



**PENGARUH PAPARAN MEDAN ELEKTROMAGNETIK
EXTREMELY LOW FREQUENCY (ELF) TERHADAP PROSES
FERMENTASI BIJI KOPI ARABIKA (*Coffea arabica*)**

*diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana pada
program studi Pendidikan Fisika*

SKRIPSI

Oleh

**Najma Zahiroh Fauziah
220210102007**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JEMBER
FAKULTAS KEGURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN
PENDIDIKAN FISIKA
JEMBER
2026**



**PENGARUH PAPARAN MEDAN ELEKTROMAGNETIK
EXTREMELY LOW FREQUENCY (ELF) TERHADAP PROSES
FERMENTASI BIJI KOPI ARABIKA (*Coffea arabica*)**

*diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana pada
program studi Pendidikan Fisika*

SKRIPSI

Oleh

**Najma Zahiroh Fauziah
220210102007**

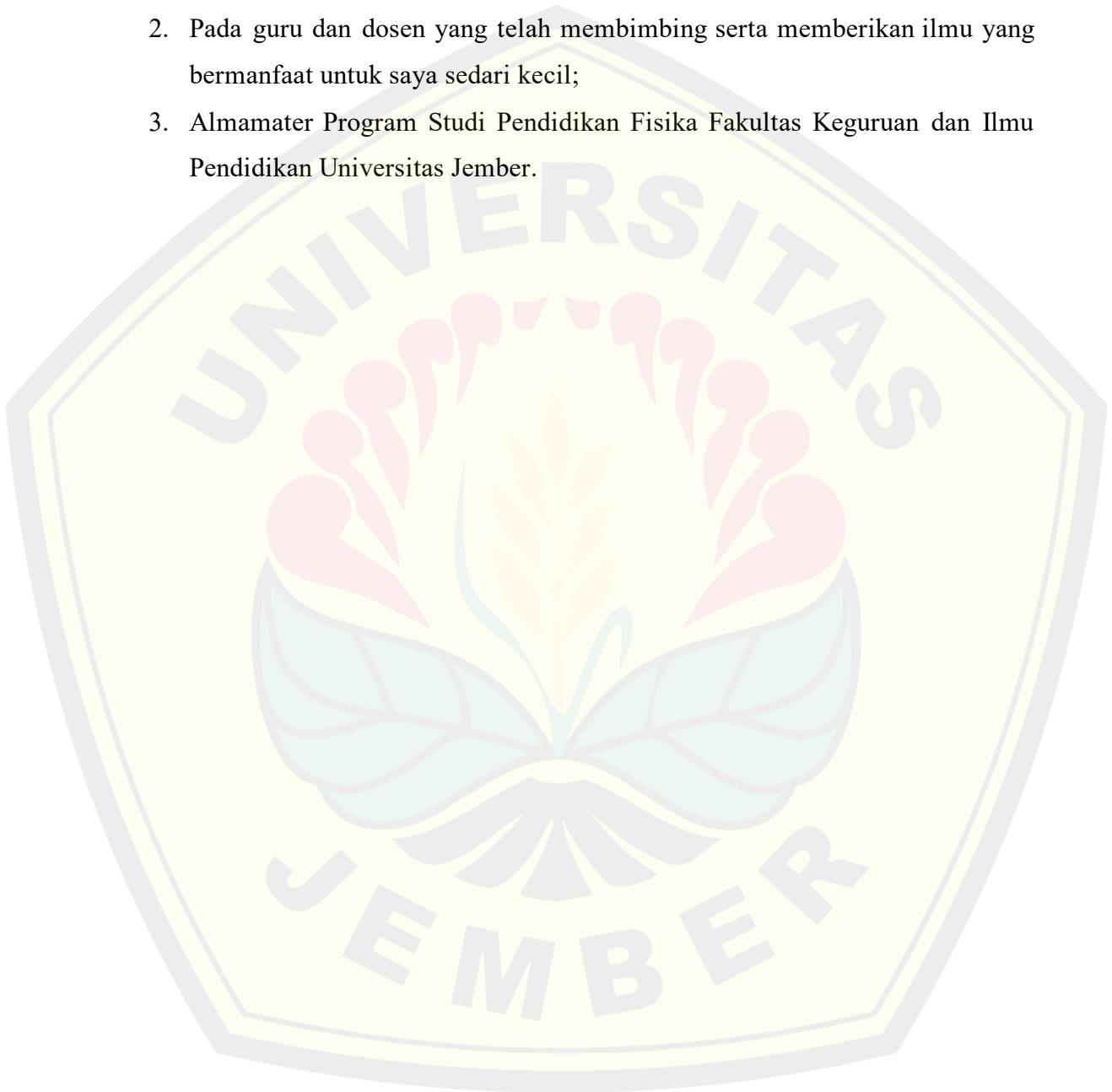
Dosen Pembimbing Utama : Dr. Sudarti, M.Kes.

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JEMBER
FAKULTAS KEGURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN
PENDIDIKAN FISIKA
JEMBER
2026**

HALAMAN PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Kedua orang tua terkasih, Ayah Faozan dan Ibu Siti Fathonah yang selalu mendukung saya selama ini untuk menyelesaikan penulisan tugas akhir;
2. Pada guru dan dosen yang telah membimbing serta memberikan ilmu yang bermanfaat untuk saya sedari kecil;
3. Almamater Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Jember.



HALAMAN MOTTO

“Dan bahwa manusia hanya memperoleh apa yang telah diusahakannya.”

(Terjemahan QS. *An-Najm*: 53:39)¹



¹ Kementerian Agama RI. 2022. Qur'an Kemenag. Jakarta: Lajnah Penafsiran Mushaf Al-Quran

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Najma Zahiroh Fauziah

NIM : 220210102007

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul: *Pengaruh Paparan Medan Elektromagnetik Extremely Low Frequency (ELF) terhadap Proses Fermentasi Biji Kopi Arabika (Coffea arabica)* adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini penulis buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika terjadi dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 23 Juni 2026

Yang menyatakan,

Najma Zahiroh Fauziah

NIM. 220210102007

HALAMAN PERSETUJUAN

Skripsi berjudul " Pengaruh Paparan Medan Elektromagnetik *Extremely Low Frequency* (ELF) terhadap Proses Fermentasi Biji Kopi Arabika (*Coffea arabica*)" telah diuji dan disahkan oleh Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember pada:

Hari : Selasa

Tanggal: 23 Juni 2026

Tempat: Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember

Pembimbing Tanda Tangan

1. Pembimbing Utama

Nama : Dr. Sudarti, M.Kes.

(.....)

NIP : 196201231988022001

Penguji

1. Penguji Utama

Nama : Firdha Kusuma Ayu Anggraeni, S.Si., M.Si. M.C.E.

NIP : 199102112019032016 (.....)

2. Penguji Anggota

Nama : Drs. Alex Harijanto, M.Si., M.C.E. (.....)

NIP : 196411171991031001

ABSTRACT

The Extremely Low Frequency (ELF) electromagnetic field is an electromagnetic wave within the 0–300 Hz frequency range. This work aimed to evaluate the effect of ELF-EMF exposure on the Arabica coffee beans' fermentation process, particularly evaluating the pH during fermentation, as well as the final pH, density, and caffeine content of the fermented coffee beans. A 3×2 factorial design was performed, with the first factor being intensity (control, 300 μ T, and 500 μ T) and the second factor being exposure time (30 and 60 min). Statistical analysis by ANOVA showed a significant difference compared to the control group at 20 h of fermentation, with the LSD post-hoc test revealing that the treatment exposed to 300 μ T for 30 min had the highest pH compared to the control. Meanwhile, the Kruskal-Wallis analysis indicated a significant difference in the coffee beans' pH and density. The Mann-Whitney post-hoc test demonstrated that the 300 μ T for 60 min treatment presented a higher pH than the control. Furthermore, the highest density was observed in the treatment exposed to 500 μ T for 60 min. The treatment exposed to 300 μ T for 30 min showed a decrease in caffeine content after fermentation compared to the control. Thus, these results indicate that ELF-EMF influences the Arabica coffee beans' fermentation process, which is dependent on the appropriate intensity and exposure time.

Keywords: *ELF Magnetic Field, Arabica Coffee, Fermentation, Caffeine.*

RINGKASAN

Pengaruh Paparan Medan Elektromagnetik *Extremely Low Frequency* (ELF) terhadap Proses Fermentasi Biji Kopi Arabika (*Coffea arabica*); Najma Zahiroh Fauziah, 220210102007; 43 halaman; Program Studi Pendidikan Fisika; Jurusan Pendidikan MIPA Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Jember.

Medan EM-ELF adalah salah satu spektrum gelombang yang terdiri antara medan magnet dan medan listrik. ELF memiliki rentang frekuensi dari 0 hingga 300 Hz, yang tergolong dalam radiasi non ionisasi. Karakteristik dari medan EM-ELF adalah mampu menembus materia tanpa memutuskan ikatan ion, sehingga berpotensi untuk dimanfaatkan dalam pengolahan berbagai bahan pangan, khususnya pada proses fermentasi. Kopi arabika adalah kopi dengan cita rasa yang unggul, namun memiliki kadar kafein yang berdampak pada kesehatan jika dikonsumsi berlebihan. Salah satu upaya untuk meningkatkan kualitas dan dekafeinasi secara alami adalah fermentasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh medan EM-ELF dengan variasi intensitas 300 μ T dan 500 μ T serta lama paparan 30 menit dan 60 menit terhadap nilai pH selama proses fermentasi, nilai pH biji kopi, massa jenis biji kopi, dan kadar kafein pasca fermentasi. Desain peneitian yang digunakan adalah faktorial 3 $\times$ 2 dengan kelompok kontrol (negatif dan positif) serta kelompok eksperimen. Penelitian ini menggunakan sampel berupa *green beans* kopi sebanyak 6 kg berkualitas super yang akan difermentasi menggunakan bantuan ragi tapai sebagai starter.

Kopi dibagi menjadi 6 kelompok penelitian, dengan masing-masing 1 kg kopi, diantaranya kontrol negatif (-), kontrol positif (+), paparan 300 μ T selama 30 menit, 300 μ T selama 60 menit, 500 μ T selama 30 menit, dan 500 μ T selama 60 menit. Lokasi penelitian dilakukan di Laboratorium ELF Pendidikan Fisika Uniiversitas Jember sebagai tempat pemaparan, Laboratorium Inovasi Hasil Pertanian dan Kewirausahaan Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Jember sebagai tempat pengeringan dan penghalusan biji kopi pasca fermentasi, dan

Laboratorium Pangan Fungsional dan Neutraceutical Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Jember sebagai tempat pengukuran kadar kafein.

Hasil uji statistik menunjukkan tidak ada perbedaan ($p\text{-value} > 0,05$) antar kelompok penelitian pada jam ke-5 dan 10 fermentasi. Sedangkan pada jam ke-15 dan 20 fermentasi menunjukkan perbedaan ($p\text{-value} \leq 0,05$). Berdasarkan uji lanjutan, pada jam ke-20 fermentasi, menunjukkan bahwa kontrol positif (+) menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan terhadap seluruh kelompok perlakuan EM-ELF, kelompok paparan 300 μT selama 30 menit memiliki pH tertinggi dibandingkan seluruh kelompok, meskipun tidak ada perbedaan yang nyata antar kelompok paparan. Nilai pH biji kopi pasca fermentasi menunjukkan adanya perbedaan (Asymp. Sig. $< 0,001$). Nilai pH biji kopi dengan perbedaan yang signifikan ditunjukkan oleh kelompok kontrol (negatif dan positif) terhadap seluruh kelompok perlakuan. Nilai pH biji paling tinggi adalah kelompok paparan 300 μT selama 60 menit. Perlakuan 500 μT selama 60 menit menghasilkan massa jenis tertinggi dengan perbedaan yang nyata terhadap kontrol dan hampir seluruh kelompok perlakuan EM-ELF, kecuali terhadap paparan 500 μT selama 30 menit (Exact Sig. = 0,174). Seluruh kelompok dengan paparan medan EM-ELF menunjukkan kadar kafein lebih rendah dibandingkan kontrol negatif (-) (0,0329%). Kadar kafein terendah dimiliki oleh kelompok paparan 300 μT selama 30 menit (0,0234%). Hasil tersebut bahkan menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan kontrol positif (+) (0,0237%). Namun, kadar kafein cenderung mengalami peningkatan pada kelompok dengan intensitas lebih tinggi (500 μT).

Kesimpulan dari penelitian ini adalah paparan medan EM-ELF berpengaruh terhadap nilai pH selama fermentasi, nilai pH, massa jenis, dan kadar kafein biji kopi arabika pasca fermentasi. Perlakuan 300 μT selama 30 menit terbukti efektif dalam menstabilkan pH dan menghasilkan kadar kafein yang rendah. Di sisi lain, peningkatan pH tertinggi dicapai pada durasi 60 menit (300 μT), sedangkan massa jenis tertinggi dihasilkan oleh paparan 500 μT selama 60 menit.

PRAKATA

Rasa syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT yang Maha Pemurah telah memberikan rahmat dan ridho-Nya, sehingga penulisan skripsi yang berjudul “Pengaruh Paparan Medan Elektromagnetik *Extremely Low Frequency* (ELF) terhadap Proses Fermentasi Biji Kopi Arabika (*Coffea arabica*)” dapat terselesaikan dengan baik. Skripsi ini disusun dan diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar sarjana (S1) pada Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari dukungan berbagai pihak. Maka dari itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Dr. Mohammad Na'im, M.Pd., selaku Dekan Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember yang telah memberikan surat permohonan izin penelitian;
2. Dr. Erfan Yudianto, S.Pd., M.Pd., selaku Ketua Jurusan Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember yang telah membantu proses administrasi selama penyusunan skripsi;
3. Rayendra Wahyu Bachtiar, S.Pd., M.Pd., Ph.D., selaku Ketua Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember yang telah memberikan fasilitas selama proses penyusunan skripsi;
4. Drs. Subiki, M.Kes., M.C.E., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing penulis selama menyelesaikan studi di Pendidikan Fisika, Universitas Jember;
5. Dr. Sudarti, M.Kes., selaku Dosen Pembimbing yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk membimbing penyusunan skripsi ini;
6. Firdha Kusuma Ayu Anggraeni, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji Utama dan Drs. Alex Harijanto, M.Si., M.C.E., selaku Dosen Penguji Anggota telah memberikan kritik dan saran yang membangun untuk penulis selama penyusunan skripsi;

7. Keluarga tercinta, Adik, Paman, dan Bibi. Terima kasih karena selalu memberikan nasihat dan dukungan kepada penulis. Semoga Allah SWT memberikan waktu yang lama agar kalian tetap menjadi saksi pencapaian penulis;
8. Sahabat seperjuangan penulis: Ami, Izzha, Denisa, Umi, Friska, Karin, dan Fida. Terima kasih karena telah memberikan waktunya dalam menemani penulis dalam suka dan duka dalam setiap momen perkuliahan. Semoga kita tetap dapat merayakan keberhasilan satu sama lain kedepannya;
9. Spesial untuk Abizar Restu Andaru, yang selalu menjadi pendukung terdepan penulis. Terima kasih telah menjadi penguat di saat penulis ingin menyerah. Semoga kita dapat berjalan beriringan menuju pencapaian selanjutnya;
10. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu, yang telah memberikan bantuan dalam penyusunan skripsi ini.

Penulis mengharapkan adanya kritik atau saran dari pihak pembaca demi penyempurnaan skripsi ini. Besar harapan penulis semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Jember, 23 Juni 2026

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iv
HALAMAN PERSETUJUAN	v
ABSTRACT	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
DAFTAR NOTASI	xvi
DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN	xvii
BAB 1 . PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Penelitian	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB 2 . TINJAUAN TEORI	6
2.1 Gelombang Elektromagnetik (EM)	6
2.2 Gelombang Elektromagnetik ELF	8
2.3 Kopi Arabika	9
2.4 Pemanfaatan Medan EM-ELF untuk Fermentasi	10
2.5 Mekanisme Fisika Medan EM-ELF terhadap Sel	10
2.6 Pengaruh Medan EM-ELF terhadap Nilai pH	11
2.7 Pengaruh Medan EM-ELF terhadap Massa Jenis pada Biji Kopi Hasil Fermentasi	12
2.8 Pengaruh Medan EM-ELF terhadap Kadar Kafein pada Biji Kopi Hasil Fermentasi	12
2.9 Pengaruh Ragi Tapai terhadap Proses Fermentasi Biji Kopi	13
2.10 <i>State of The Art</i>	14
2.11 Kerangka Konsep Penelitian	15
2.12 Pengembangan Hipotesis	15
BAB 3 . METODOLOGI PENELITIAN	16
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian	16

3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	16
3.3 Variabel Penelitian.....	17
3.4 Desain Penelitian.....	18
3.5 Prosedur Penelitian.....	19
3.6 Pengumpulan Data Penelitian.....	19
3.7 Metode Analisis	19
BAB 4 . HASIL DAN PEMBAHASAN.....	21
4.1 Hasil Penelitian	21
4.2 Analisis Data	27
4.3 Pembahasan.....	33
BAB 5 . KESIMPULAN DAN SARAN.....	42
5.1 Kesimpulan	42
5.2 Saran.....	43
DAFTAR PUSTAKA	44
LAMPIRAN.....	50

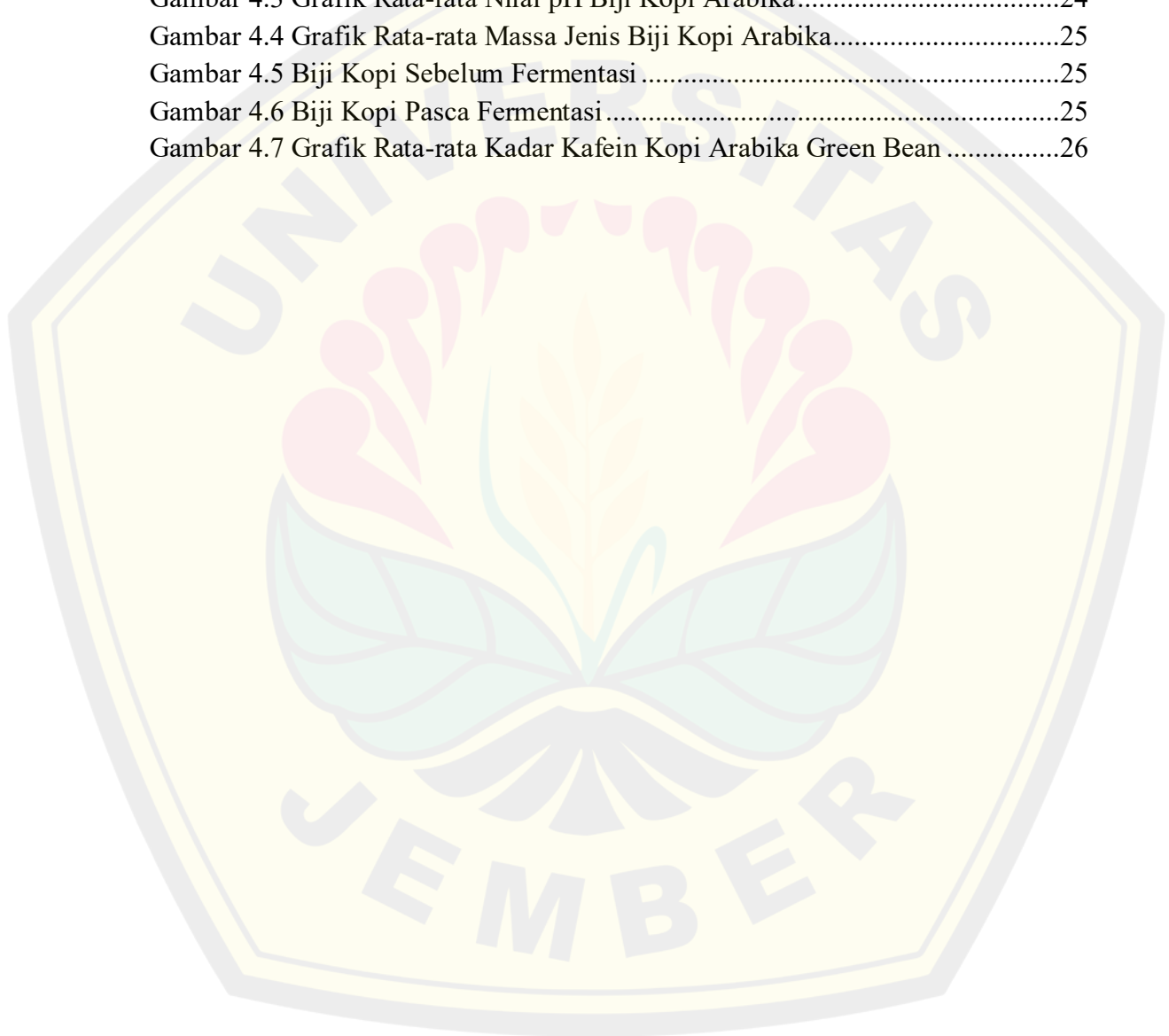
DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu	14
Tabel 4.1 Pengukuran Medan EM-ELF Alamiah	21
Tabel 4.2 Pengukuran Meda EM-ELF Kelompok Paparan 1	21
Tabel 4.3 Pengukuran Medan EM-ELF Kelompok Paparan 2	21
Tabel 4.4 Uji Homogenitas Data Nilai pH Proses Fermentasi.....	27
Tabel 4.5 Uji Mean Rank pH Biji Kopi Arabika	29
Tabel 4.6 Uji Kruskal-Wallis Nilai pH Biji Kopi Arabika	30
Tabel 4.7 Uji Mean Rank Massa Jenis Biji Kopi Arabika.....	31
Tabel 4.8 Uji Kruskal-Wallis Massa Jenis Biji Kopi Arabika.....	31
Tabel 4.9 Uji Kadar Kafein Kopi Arabika Green Bean	32



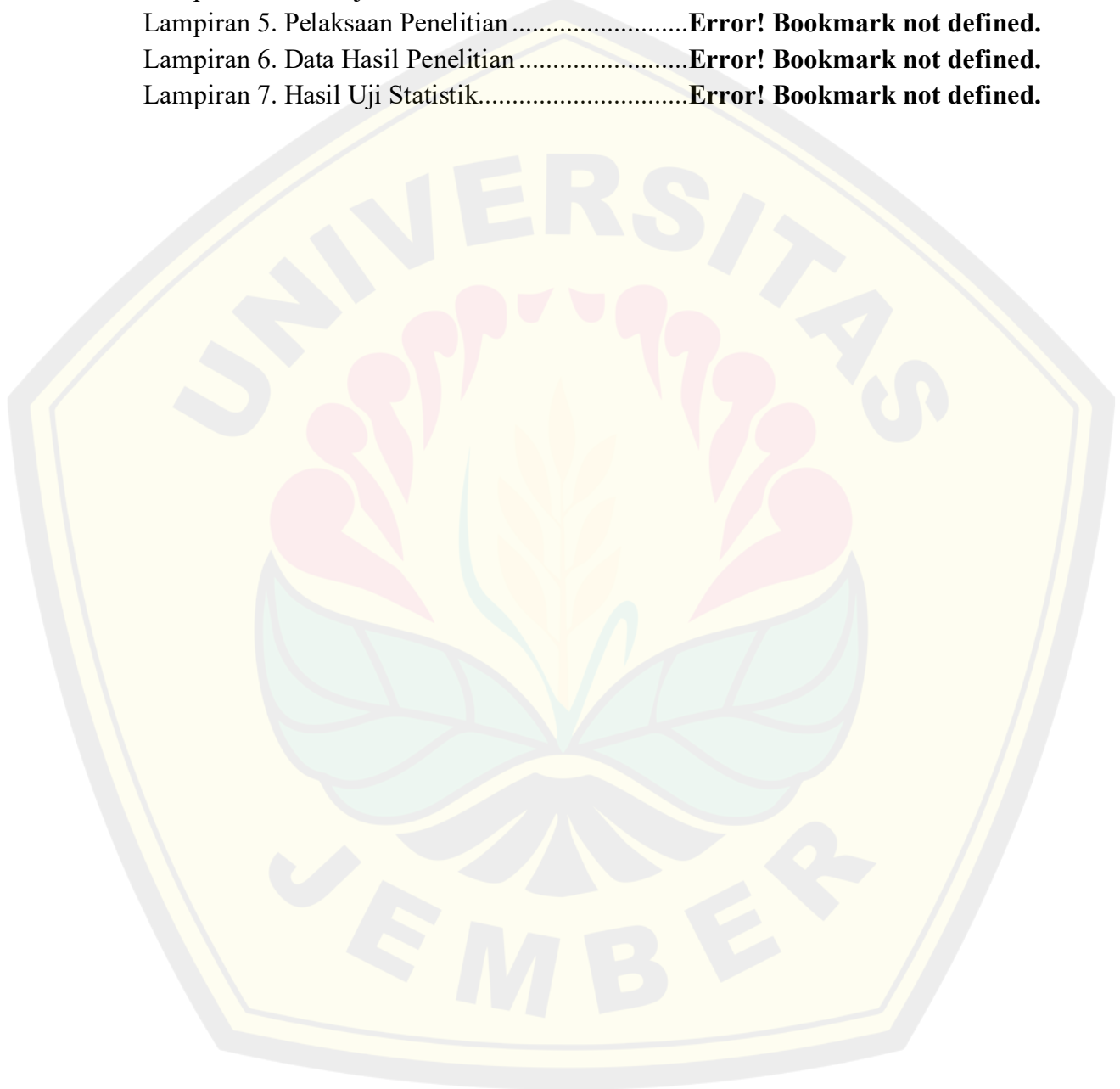
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Gelombang Elektromagnetik.....	6
Gambar 2.2 Spektrum Gelombang Elektromagnetik.....	8
Gambar 2.3 Kerangka Konsep Penelitian.....	15
Gambar 3.1 Desain Penelitian.....	18
Gambar 4.1 Alat Penghasil Medan EM-ELF.....	22
Gambar 4.2 Grafik Rata-rata Nilai pH Proses Fermentasi.....	23
Gambar 4.3 Grafik Rata-rata Nilai pH Biji Kopi Arabika.....	24
Gambar 4.4 Grafik Rata-rata Massa Jenis Biji Kopi Arabika.....	25
Gambar 4.5 Biji Kopi Sebelum Fermentasi.....	25
Gambar 4.6 Biji Kopi Pasca Fermentasi.....	25
Gambar 4.7 Grafik Rata-rata Kadar Kafein Kopi Arabika Green Bean.....	26



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Matriks Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
Lampiran 2. Prosedur Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
Lampiran 3. Pengumpulan Data Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
Lampiran 4. Surat Ijin Penelitian	Error! Bookmark not defined.
Lampiran 5. Pelaksanaan Penelitian	Error! Bookmark not defined.
Lampiran 6. Data Hasil Penelitian	Error! Bookmark not defined.
Lampiran 7. Hasil Uji Statistik.....	Error! Bookmark not defined.



DAFTAR NOTASI

$\cdot$	: Opertor <i>Dot product</i>
$\times$	: Operator <i>Cross Product</i>
E	: Medan Listrik (V/m)
B	: Medan Magnet (T atau $\frac{Wb}{m^2}$)
D	: Medan Perpindahan Listrik (C/m ²)
H	: Medan Magnetisasi (A/m)
ρ_f	: Rapat Muatan Bebas (C/m ³)
J_f	: Rapat Arus Listrik Bebas (A/m ²)
ρ	: Massa Jenis (g/m ³)
m	: Massa Benda (g atau kg)
V	: Volume Benda (cm ³ atau m ³)
μ_0	: Permeabilitas Vakum (T.m/A atau H/m)

DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN

Singkatan/Istilah	Arti dan Keterangan
ELF	<i>Extremely Low Frequency</i>
EM-ELF	<i>Electro Magnetic Extremely Low Frequency</i>
WHO	<i>World Health Organization</i>
Ca ²⁺	Kalsium
H ⁺	Hidrogen
IARC	<i>International Agency for Research on Cancer</i>
EMF	<i>Electromagnetik Field</i>
EHC	<i>Environmental Health Criteria</i>

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Gelombang elektromagnetik adalah gelombang yang tercipta karena medan magnet dan medan listrik saling berosilasi. Gelombang elektromagnetik dibagi menjadi tiga berdasarkan kepada tingkat frekuensinya. Medan elektromagnetik dengan frekuensi < 300 Hz disebut dengan medan elektromagnetik dengan frekuensi rendah (Sa'diyah *et al.*, 2024). Karakteristik dari medan EM-ELF salah satunya adalah mampu menembus seluruh material, tanpa memecahkan ion-ion didalamnya. Berdasarkan dasar tersebut, banyak penelitian menggunakan gelombang elektromagnetik ELF dalam berbagai bidang kehidupan (Nur *et al.*, 2022). Salah satunya adalah pemanfaatan medan elektromagnetik ELF pada bahan pangan, yaitu pada saat proses fermentasi kopi (Faridawati *et al.*, 2023).

Kopi adalah minuman yang digemari oleh semua kalangan masyarakat Indonesia. Hal ini didukung dengan data bahwa konsumsi kopi di Indonesia selama tahun 2020 mencapai 5 juta kemasan 60 kg/lb (Adithia dan Jaya, 2021). Indonesia memiliki dua varietas kopi unggulan yaitu arabika dan robusta (Martauli, 2018). Jumlah konsumsi kopi di dunia terdiri dari 70% kopi arabika dan 26% kopi robusta (Agustine *et al.*, 2021). Kopi arabika adalah kopi yang memiliki cita rasa yang lebih baik dibandingkan dengan jenis kopi lain (Siregar *et al.*, 2020). Pada secangkir kopi, standar kandungan kafein berada pada rentang 0,96-1,6%, sedangkan kopi arabika mengandung kadar kafein sebesar 1,4% -2,4% dari jumlah keseluruhan berat keringnya (Swiranata *et al.*, 2020). Kopi mengandung antioksidan yang merangsang kinerja otak dan antikanker. Namun, konsumsi kopi yang berlebihan dengan kadar kafein yang tinggi khususnya pada anak-anak dapat menyebabkan kesehatan menurun (Anisa dan Hamidy, 2025). Kadar kafein yang tinggi mengakibatkan gangguan kesehatan, antara lain iritasi perut, mual hingga muntah, insomnia, kegelisahan, hipertensi, jantung berdebar, dan lain sebagainya (Rosalinda *et al.*, 2021). Oleh sebab itu, diperlukan upaya untuk mengurangi kadar kafein dalam kopi dengan dekafeinasi. Dekafeinasi adalah metode untuk mengurangi

ataupun menghilangkan kadar kafein pada kopi dengan cara alami atau menggunakan bahan kimia (Rosalinda *et al.*, 2021).

Di sisi lain, (Farah, 2009 dalam Bastian *et al.*, 2024) menemukan bahwa produk kopi yang sudah terdekafeinasi mengalami penurunan cita rasa, sehingga salah satu upaya untuk mengoptimalkan profil rasa yang terbentuk pasca panen merupakan pada saat proses fermentasi (Saripah *et al.*, 2021). Proses fermentasi pada kopi mencakup tiga cara yaitu proses kering (*dry process*), proses semi kering (*semi dry process*), dan proses basah (*wet process*) (Hidayat, 2024). Proses fermentasi juga dapat ditambahkan dengan mikroorganisme seperti ragi tapai, yang mampu menciptakan cita rasa lebih baik daripada fermentasi alami atau yang tidak difermentasi. Hal tersebut terjadi, karena mikroba dalam ragi dapat bekerja dengan optimal pada proses fermentasi biji kopi (Marcella dan Mulyanti, 2022). Nilai pH dapat mempengaruhi pertumbuhan dari *Saccharomyces cerevisiae* (Saripah *et al.*, 2021), yang merupakan mikroorganisme dalam ragi tapai (Saputra *et al.*, 2020). Pertumbuhan *Saccharomyces cerevisiae* yang meningkat, menyebabkan proses penguraian gula (Fatima *et al.*, 2024). Glukosa yang terurai akan berubah menjadi asam laktat dan alkohol (Rasyida, 2014 dalam Fatima *et al.*, 2024).

Fermentasi pada kopi arabika lebih sering menggunakan proses basah (Lee *et al.*, 2015 dalam Hidayat, 2024). Proses basah merupakan kopi yang difermentasi menggunakan redaman air dalam waktu tertentu (Ferreira *et al.*, 2023 dalam Hidayat, 2024). Namun, kadar air yang tinggi mampu memicu pertumbuhan jamur (Sulistyaningtyas, 2017). Sehingga, permasalahan tersebut dapat diatasi dengan menggunakan medan EM-ELF sebagai teknologi alternatif untuk meningkatkan kualitas proses fermentasi basah pada biji kopi.

Hal tersebut dibuktikan dengan serangkaian penelitian yang konsisten mengemukakan bahwa medan EM-ELF dengan intensitas dibawah 500 μT mampu meningkatkan pertumbuhan sel, seperti medan elektromagnetik dengan intensitas 300 μT selama 45 menit mampu mengoptimalkan proliferasi bakteri *Lactobacillus* pada proses fermentasi kopi luwak buatan (Sudarti *et al.*, 2020), intensitas sebesar 200 μT selama 30 menit optimal dalam menurunkan pH dan intensitas 200 μT selama 90 menit mampu meningkatkan pH pada fermentasi kering biji kopi lanang

(Purbawati *et al.*, 2021), intensitas 400 μT durasi 30 menit mampu mempercepat aktivitas enzim α -amilase yang mempengaruhi pH, sementara 300 μT durasi 30 menit membantu α -amilase dan bakteri asam laktat untuk mengendalikan ion H^+ pada fermentasi basah kopi liberika (Kanza *et al.*, 2020), intensitas sebesar 200 μT selama 60 menit dan intensitas 300 μT selama 45 menit berpengaruh terhadap nilai pH dan daya hantar listrik pada fermentasi *green coffee* robusta (Anam, 2020).

Berdasarkan pada penelitian terdahulu, intensitas medan elektromagnetik ELF yang efektif untuk fermentasi kopi berada pada rentang 200 μT hingga 400 μT . Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada intensitas 300 μT yang berdasar pada penelitian Sudarti *et al.*, 2020; Kanza *et al.*, 2020; Anam, 2020, serta intensitas 500 μT sebagai pembuktian batas atas dari paparan yang efektif. Lama paparan yang digunakan yaitu 30 dan 60 menit berdasarkan pada rentang waktu yang umum digunakan dan terbukti memberikan pengaruh yang signifikan pada penelitian-penelitian tersebut. Dengan demikian, akan sangat relevan untuk mengkaji nilai pH proses fermentasi, nilai pH biji kopi, massa jenis, dan kadar kafein pada proses fermentasi kopi arabika dengan paparan medan elektromagnetik ELF.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang berbentuk berdasarkan latar belakang tersebut sebagai berikut:

- 1.2.1 Apakah paparan medan EM-ELF pada intensitas 300 μT dan 500 μT dengan durasi paparan 30 dan 60 menit berpengaruh terhadap nilai pH pada proses fermentasi biji kopi arabika?
- 1.2.2 Apakah paparan medan EM-ELF pada intensitas 300 μT dan 500 μT dengan durasi paparan 30 dan 60 menit berpengaruh terhadap nilai pH biji kopi arabika pasca fermentasi?
- 1.2.3 Apakah paparan medan EM-ELF pada intensitas 300 μT dan 500 μT dengan durasi paparan 30 dan 60 menit berpengaruh terhadap massa jenis biji kopi arabika pasca fermentasi?

- 1.2.4 Apakah paparan medan EM-ELF pada intensitas 300 μ T dan 500 μ T dengan durasi pemaparan 30 dan 60 menit berpengaruh terhadap kadar kafein kopi arabika *green beans* pasca fermentasi?

1.3 Batasan Penelitian

Untuk fokus permasalahan dan pembahasan dalam penelitian ini, diperlukannya batasan penelitian. Berikut adalah batasan-batasan pada penelitian ini:

- 1.3.1 Besar intensitas yang diaplikasikan dalam penelitian ini mencakup 300 μ T dan 500 μ T.
- 1.3.2 Durasi pemaparan yang digunakan adalah 30 menit dan 60 menit.
- 1.3.3 Objek penelitian ini melibatkan 6 kg kopi arabika *green beans* kualitas super.
- 1.3.4 Variabel yang diukur adalah nilai pH proses fermentasi, nilai pH biji kopi, massa jenis biji kopi, dan kadar kafein kopi arabika *green beans*.
- 1.3.5 Penelitian ini secara khusus dilakukan untuk mengaplikasikan paparan medan EM-ELF pada proses fermentasi pada biji kopi arabika (*Coffea arabica*).

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang didapatkan, dari rumusan masalah diatas ialah:

- 1.4.1 Mengkaji pengaruh paparan medan EM-ELF dengan intensitas (300 μ T dan 500 μ T) pada durasi pemaparan (30 dan 60 menit) terhadap nilai pH selama proses fermentasi biji kopi arabika.
- 1.4.2 Mengkaji pengaruh paparan medan EM-ELF dengan intensitas (300 μ T dan 500 μ T) pada durasi pemaparan (30 dan 60 menit) terhadap nilai pH biji kopi arabika pasca fermentasi.
- 1.4.3 Mengkaji pengaruh paparan medan EM-ELF dengan intensitas (300 μ T dan 500 μ T) pada durasi pemaparan (30 dan 60 menit) terhadap massa jenis biji kopi arabika pasca fermentasi.

- 1.4.4 Mengkaji pengaruh paparan medan EM-ELF dengan intensitas ($300\ \mu\text{T}$ dan $500\ \mu\text{T}$) pada durasi pemaparan (30 dan 60 menit) terhadap kadar kafein kopi arabika *green beans* pasca fermentasi.

1.5 Manfaat Penelitian

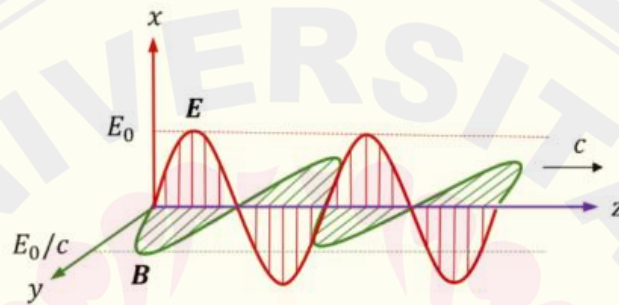
Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

- 1.5.1 Bagi peneliti lain, sebagai bahan pertimbangan untuk melakukan penelitian selanjutnya, terutama pemanfaatan medan elektromagnetik ELF dalam proses fermentasi.
- 1.5.2 Bagi pembelajaran fisika, sebagai bahan ajar yang relevan terutama dalam pembelajaran kontekstual, tentang pemanfaatan medan elektromagnetik ELF.
- 1.5.3 Bagi masyarakat, memberikan informasi kepada para petani kopi terkait penggunaan medan elektromagnetik ELF sebagai salah satu alternatif dalam proses fermentasi biji kopi arabika.

BAB 2. TINJAUAN TEORI

2.1 Gelombang Elektromagnetik (EM)

Gelombang elektromagnetik ialah gelombang hasil osilasi dari medan listrik dan medan magnet. Gelombang ini dapat merambat melalui ruang hampa atau tanpa medium perantara. Selain itu, gelombang elektromagnetik disebut gelombang transversal, karena arah dari osilasi gelombang tegak lurus dengan cara perambatannya (Utami et al., 2024). Adapun ilustrasi gelombang elektromagnetik:



Gambar 2.1 Gelombang Elektromagnetik
(Sumber: Fauzia, 2025:70)

Medan listrik terbentuk karena adanya perbedaan tegangan, semakin kuat medan listrik yang terbentuk, semakin besar tegangan yang dibutuhkan (WHO, 2016 dalam Rosyidah, 2017). Sesuai dengan sifatnya, medan magnet listrik intensitas yang rendah akan terhalangi oleh benda (Rosyidah, 2017). Di sisi lain, medan magnet dapat terbentuk karena arus yang mengalir. Berbeda dengan medan listrik, medan magnet memiliki sifat yang tidak mudah terhalangi, sehingga mampu menembus benda (Rosyidah, 2017).

Sifat kelistrikan dan kemagnetan pada bahan dijelaskan dalam empat persamaan Maxwell yang dapat dituliskan sebagai:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_f + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.4)$$

(Griffiths, 2013: 341).

Hukum Faraday dan Ampere-Maxwell menunjukkan bahwa adanya keterkaitan antara medan listrik dan medan magnet. Oleh karena itu, membentuk sebuah gelombang elektromagnetik. Gelombang memiliki kemampuan membawa energi. Energi per satuan waktu per satuan luas permukaan berkas pada gelombang elektromagnetik disebut dengan vektor Poynting. Vektor Poynting dapat dijelaskan sebagai berikut:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \quad (2.5)$$

$$u = \frac{1}{2} \left(\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right) \quad (2.6)$$

Dengan $B^2 = E^2/c^2 = E^2 \epsilon_0 \mu_0$, sehingga

$$u = \frac{1}{2} (\epsilon_0 E^2 + \epsilon_0 E^2) = \epsilon_0 E^2 \quad (2.7)$$

Sesuai dengan persamaan (2.1) serta Gambar 2.1 maka

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) = \mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} E^2 \mathbf{z} = c u \mathbf{z} \quad (2.8)$$

(Fauzia, 2025: 70).

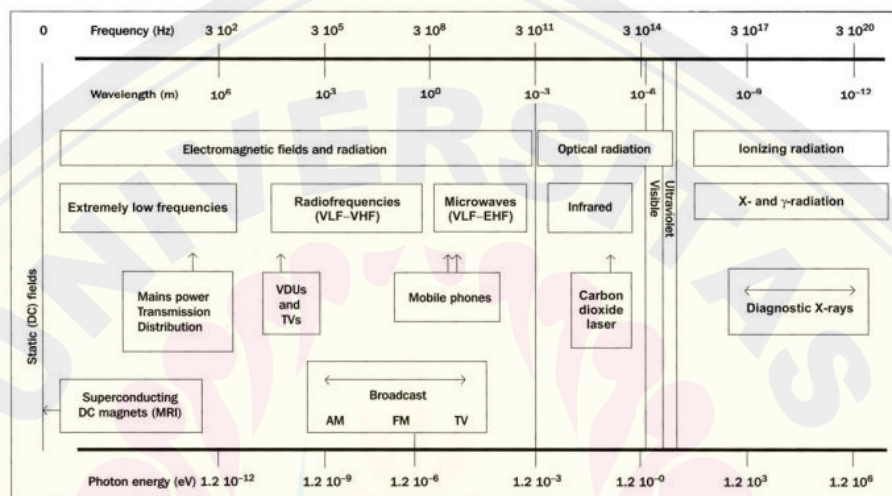
Pada sebuah medan magnet $\mathbf{B}$ dengan partikel bermuatan terdapat interaksi satu sama lain yang disebut dengan Gaya Lorentz. Secara ringkas, dapat dinyatakan sebagai:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.9)$$

$\mathbf{F}$ memiliki arah tegak lurus terhadap arah $\mathbf{v}$ dan $\mathbf{B}$, dengan q adalah muatan bersih partikel dan $\vec{v} \times \vec{B}$ adalah hasil perkalian vektor dari kecepatan partikel dan medan magnetik (Liboff *et al.*, 1987).

2.2 Gelombang Elektromagnetik ELF

Gelombang EM-ELF adalah gelombang yang memiliki frekuensi berkisar 0 hingga 300 Hz. Menurut EHC 238 terdapat tiga kriteria EMF (*Electromagnetic Fields*) dengan rentang frekuensi 0-300 Ghz. Tiga kriteria tersebut meliputi medan statis memiliki frekuensi 0 Hz, medan ELF (*Extremely Low Frequency*) hingga 100 kHz, dan medan RF (*Radio Frequency*) dimulai dari 100 kHz – 300 Ghz (WHO, 2007).



Gambar 2.2 Spektrum Gelombang Elektromagnetik
(Sumber: IARC, 2002)

Gelombang elektromagnetik ELF dibagi menjadi dua sumber yaitu sumber alamiah dan sumber buatan. Contoh dari sumber alamiah adalah medan geomagnetik yang merupakan dwikutub utara di alam. Besarnya intensitas total maksimal pada kutub magnet adalah $60 \mu\text{T}$, sedangkan pada dekat ekuator memiliki minimal $30 \mu\text{T}$, dan di laut serta mendekati garis lintang besar geomagnetiknya berkisar $45\text{-}50 \mu\text{T}$. Contoh lain dari gelombang elektromagnetik ELF dengan sumber alamiah adalah paparan sinar matahari, dengan intensitas rata-rata dihasilkan sebesar $\frac{10^{-4}\text{V}}{\text{m}}$ untuk medan listrik dan 10^{-9} mT untuk medan magnet. Gelombang EM-ELF dengan sumber buatan dapat dihasilkan dari perangkat elektronik yang menggunakan listrik agar dapat beroperasi dengan frekuensi tertentu. ELF yang ada di rumah memiliki tiga sumber utama yaitu kabel, peralatan rumah tangga, dan peralatan listrik (Rosyidah, 2017).

2.3 Kopi Arabika

Kopi arabika (*Coffea arabica*) merupakan kopi yang pertama kali dibawa oleh bangsa Arab yang selanjutnya di populerkan oleh bangsa Eropa ke seluruh dunia. Kopi arabika merupakan kopi hasil persilangan antara *Coffea eugeniodes* dan *Coffea canephora* (Anam *et al.*, 2023:5-6). Menurut data Statistik Kopi Indonesia (2024), ekspor kopi Indonesia mencapai lima negara yaitu Egypt, Malaysia, India, Amerikat Serikat, dan Italia. Menurut (Petracco, 2005 dalam Rosalinda *et al.*, 2021), kadar kafein pada kopi arabika berkisar 0,4%-2,4% dari keseluruhan berat kering. Selain itu, nilai pH pada biji kopi ini adalah 4,85-5,15.

Kopi arabika memiliki daun yang kecil mengkilap dengan warna hijau tua pada permukaannya dan warna hijau muda pada bagian bawah. Buah kopi arabika berwarna merah kehitaman jika siap panen yang berbentuk lonjong yang memiliki ukuran relatif besar dibanding kopi robusta (Anam *et al.*, 2023:11-12). Kopi arabika memiliki aroma wangi dengan perpaudan bunga dan buah, serta memiliki profil rasa asam, halus (*mild*), serta pahit (Afriliana, 2018:18). Kopi arabika tumbuh di dataran rendah pada wilayah yang beriklim subtropis. Kopi arabika dapat tumbuh pada suhu berkisar 17-21°C, karena jika suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan bunga pada kopi akan tumbuh terlalu awal dan akan rentan terkena serangan penyakit karat daun, sedangkan jika suhu terlalu rendah maka pertumbuhan akan melambat yang disebabkan karena tumbuhnya banyak cabang sekunder dan tersier yang menghambat pertumbuhan (Anam *et al.*, 2023:11-12).

Menurut (Anam *et al.*, 2023:9) adapun klasifikasi dari kopi arabika sebagai berikut:

Kerajaan: *Plantae*

Divisi: *Tracheophyta*

Kelas: *Magnoliopsida*

Ordo: *Gentianales*

Famili: *Rubiaceae*

Genus: *Coffea* L.

Spesies: *Coffea arabica* L.

2.4 Pemanfaatan Medan EM-ELF untuk Fermentasi

Seiring dengan berjalannya waktu, pemanfaatan gelombang elektromagnetik ELF semakin berkembang di berbagai bidang kehidupan. Satu diantaranya adalah pada bidang pangan dapat memperpanjang masa simpan makanan dan mempercepat proses fermentasi bahan pangan (Firdausi *et al.*, 2023). Medan elektromagnetik ELF menimbulkan perpindahan energi dari medan magnet menuju ion-ion seperti kalsium (Ca^{2+}) yang terlibat dalam proses proliferasi sel. Medan magnet ELF yang melalui membran sel dapat mengaktifkan saluran menuju inti sel. Kalsium dalam sel yang mengalami peningkatan akan berdampak pada laju pertumbuhan bakteri (Kanza, 2021).

Terdapat tiga tahapan proses fermentasi, yaitu tahap pertama adalah anaerobik yang terjadi pada awal fermentasi seperti pada hari ke-2 dan ke-3. Pada fase ini, mikroba yang berperan adalah ragi. Ragi mampu mengubah gula menjadi alkohol dengan kondisi alkohol yang rendah dan pH dibawah 4 (Sudarti *et al.*, 2022). Tahap kedua adalah pemecahan gula dan beberapa asam organik menjadi asam laktat pada hari ke-4 atau ke-5. Mikroba yang bertanggung jawab pada fase ini adalah bakteri asam laktat (Sudarti *et al.*, 2022). Tahap terakhir adalah pembentukan asam asetat yang berasal dari pemecahan senyawa organik seperti gula dan alkohol. Fase ini dilakukan oleh bakteri asam asetat yang termasuk dalam genus *Acetobacter* (Mannaa *et al.*, 2021).

2.5 Mekanisme Fisika Medan EM-ELF terhadap Sel

Dalam fisika, medan magnet statis bumi (medan geomagnetik) mampu mempengaruhi ion-ion yang bergerak di dalam saluran transmembran (Liboff, 1985). Mekanisme ini berdasar dari Gaya Lorentz yang dijelaskan oleh (McLeod dan Liboff, 1987 dalam Blank dan Findl, 1987:98). Mereka memodelkan sebuah ion bermuatan (q) yang bergerak dengan kecepatan (v) dalam medan magnet B . Ion tersebut akan mengalami gaya magnet yang dapat ditulis dengan $F = q(v \times B)$, karena gaya tersebut bergerak tegak lurus terhadap arah pergerakan ion, maka ion akan bergerak secara melingkar atau heliks. Frekuensi dari gerakan melingkar disebut dengan frekuensi siklotron, yang bergantung pada rasio muatan terhadap

massa (q/m) dan kekuatan medan magnet (B). Frekuensi siklotron ini, secara kebetulan memiliki rentang frekuensi yang sama dengan ELF (*Extremely Low Frequency*) (Liboff, 1985). Jika diterapkan medan elektromagnetik ELF dari luar pada sel dengan frekuensi yang sama antara keduanya, maka akan terjadi resonansi dengan ion tertentu, yang menyebabkan terjadinya transfer energi yang efektif ke ion tersebut. Transfer energi tersebut meningkatkan kecepatan ion yang bergerak pada saluran membran, yang berdampak pada proses seluler (Liboff, 1985).

2.6 Pengaruh Medan EM-ELF terhadap Nilai pH

Dalam radiasi medan elektromagnetik ELF, medan magnet dan medan listrik dapat diukur secara terpisah. Medan magnet dapat menembus material, tetapi medan listrik tidak mampu menembus materi lain. Secara biologis, dalam membran sel terdapat kanal ion yang digunakan sebagai keluar masuknya cairan, sehingga terciptanya lalu lintas pada membran. Selama proses lalu lintas tersebut terjadi beda potensial karena adanya perbedaan konsentrasi pada ion. Beda potensial yang terjadi menyebabkan terciptanya arus listrik (Anam, 2020).

Nilai pH pada proses fermentasi dapat mengalami penurunan dan peningkatan, yang diakibatkan oleh medan magnet ELF mengalami perubahan ion ekstraseluler pada mikroorganisme dalam proses fermentasi, sehingga ion yang melintasi daerah fluks magnetik dapat bergerak lebih cepat. Salah satu ion yang terpengaruh adalah Ca^{2+} , karena ion ini memiliki sifat paramagnetik. Medan magnet ELF yang menyebabkan ion Ca^{2+} ekstraseluler yang bergerak melalui membran sel akan menjadi lebih cepat, sehingga kebutuhan ion Ca^{2+} dapat cepat terpenuhi. Oleh karena itu, proses pertumbuhan sel akan berjalan lebih cepat dan meningkatkan pertumbuhan bakteri (Purbawati *et al.*, 2021). Jadi, penurunan pH terjadi jika paparan medan elektromagnetik ELF mampu merangsang mikroorganisme penghasil asam yaitu bakteri asam laktat, karenanya produksi asam akan meningkat. Sebaliknya, jika paparan medan elektromagnetik ELF berada pada tahap lanjut fermentasi mampu mengoptimalkan aktivitas mikroba yang mengonsumsi asam, maka nilai pH akan mengalami peningkatan. (Purbawati *et al.*, 2021).

2.7 Pengaruh Medan EM-ELF terhadap Massa Jenis pada Biji Kopi Hasil Fermentasi

Massa jenis merupakan salah satu sifat bahan yang menunjukkan perbandingan antara massa benda terhadap volumenya. Pada kopi arabika, massa jenis digunakan sebagai indikator mutu fisik yang berhubungan dengan struktur biji, tingkat kematangan, kadar air, dan proses pasca panen (Hernández-Alcántara *et al.*, 2026). Massa jenis dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.10)$$

Pada proses fermentasi, mikroorganisme yang berperan seperti khamir, bakteri asam laktat, serta bakteri asam asetat akan menghasilkan enzim yang berperan dalam proses degradasi senyawa organik. Aktivitas tersebut menyebabkan perubahan massa ataupun volume yang diakibatkan karena perubahan komposisi kimia, kadar air, dan struktur jaringan biji pada kopi (Vaz *et al.*, 2023). Oleh karena itu, fermentasi berpotensi mempengaruhi massa jenis kopi arabika. Paparan medan elektromagnetik ELF diketahui dapat mempengaruhi aktivitas mikroorganisme selama fermentasi melalui perubahan permeabilitas membran sel, transport ion, aktivitas enzim, dan metabolisme sel. Menurut Berreta *et al.* (2019), paparan medan elektromagnetik ELF dapat meningkatkan aktivitas metabolik mikroorganisme, sehingga proses biodegradasi dan fermentasi berlangsung lebih efektif. Proses tersebut yang menyebabkan adanya perubahan pada komponen penyusun bahan yang di fermentasi.

2.8 Pengaruh Medan EM-ELF terhadap Kadar Kafein pada Biji Kopi Hasil Fermentasi

Medan EM-ELF dapat menghasilkan penurunan kadar kafein biji kopi fermentasi yang dimediasi oleh mikroba. Saat proses fermentasi, medan magnet ELF mempercepat laju pergerakan ion di sekitar membran sel mikroba, yang membuat kebutuhan akan ion tersebut cepat terpenuhi (Purbawati *et al.*, 2021). Mikroorganisme seperti bakteri dan ragi mampu memecahkan senyawa, seperti kafein dalam biji kopi. Pada proses fermentasi, kafein dapat berubah menjadi asam

urat, 7 -metilksantin, dan ksantin (Komaria *et al.*, 2023). Kafein merupakan bagian alkaloid yang berubah menjadi ester melalui proses esterifikasi. Pada proses esterifikasi beberapa bahan kompleks yang terdapat dalam kafein terpisah menjadi asam klorogenat. Asam klorogenat akan berubah menjadi zat organik lain yang dapat larut dalam fermentasi. Pada proses fermentasi, asam klorogenat yang larut mengalami peningkatan, sehingga terjadinya penurunan kadar kafein di dalam kopi (Komaria *et al.*, 2023).

2.9 Pengaruh Ragi Tapai terhadap Proses Fermentasi Biji Kopi

Penambahan mikroorganisme dalam proses fermentasi dapat mempercepat penghilangan *mucilage* dan memperbaiki cita rasa pada kopi (Saripah *et al.*, 2021). Selain itu, proses penambahan mikroorganisme mampu mempengaruhi dinamika populasi mikroba fermentasi, yang berdampak pada waktu fermentasi yang lebih singkat (Taringan *et al.*, 2020). Salah satunya adalah penambahan ragi tapai. Mikroorganisme yang terdapat pada ragi tapai antara lain kapang (*Rhizopus oryzae*), khamir (*Saccharomyces cerevisiae*), serta bakteri (*Pediococcus sp.* dan *Bacillus sp.*). Ragi tapai mampu menguraikan senyawa kimia seperti tannin, glukosa, lemak, protein, dan selulosa pada biji kopi. Selain itu, kopi yang difermentasi menggunakan ragi tapai menghasilkan senyawa volatil karena adanya reaksi dari gula reduksi, asam organik, lipid, dan asam amino selama proses fermentasi. Fermentasi ini juga mengakibatkan adanya penurunan kadar kafein menjadi 0,51% dari 1,83% (Saputra *et al.*, 2020).

2.10 *State of The Art*

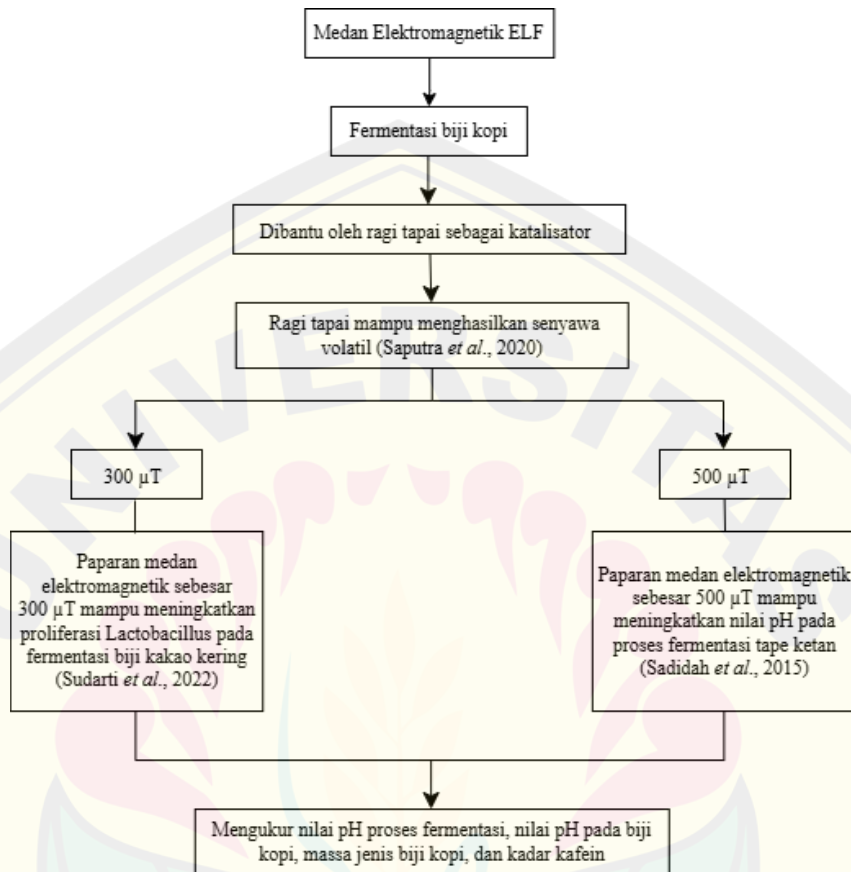
Adapun beberapa penelitian yang relevan tentang paparan medan elektromagnetik ELF terhadap proses fermentasi kopi dijabarkan sebagai berikut:

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian Sebelumnya	Intensitas	Lama Paparan	Hasil
Purbawati <i>et al.</i> , (2021) mengkaji perubahan pH proses fermentasi menggunakan enzim α -amilase pada biji kopi lanang dengan bantuan medan magnet ELF	200 μ T dan 300 μ T	30, 60, dan 90 menit	Medan magnet dengan intensitas 200 μ T dengan durasi paparan 30 menit mampu menurunkan nilai pH sedangkan pada durasi paparan 90 menit dengan intensitas yang sama, mampu menaikkan pH proses fermentasi biji kopi lanang.
Anam (2020) meneliti nilai pH dan daya hantar listrik pada proses fermentasi <i>green coffee</i> robusta berbantuan medan magnet ELF	200 μ T dan 300 μ T	45 dan 60 menit	Perlakuan intensitas 200 μ T (60 menit) dan 300 μ T (45 menit) menghasilkan penurunan pH pada jam ke-16 yang diikuti dengan kenaikan pH pada jam ke-24, serta terjadi peningkatan daya hantar listrik [ada jam ke-32 fermentasi.
Kanza <i>et al.</i> , (2020) mengkaji perubahan pH dan daya hantar listrik pada proses fermentasi basah kopi liberika menggunakan enzim α -amilase berbantuan medan magnet ELF	300 μ T dan 400 μ T	30, 60, dan 90 menit	Intensitas 400 μ T (30 menit) mempengaruhi kadar pH serta intensitas 300 μ T (30 menit dan 90 menit) mengendalikan ion H^+ dengan mempengaruhi bakteri asam laktat dan α -amilase
Sudarti <i>et al.</i> , (2020) meneliti pertumbuhan bakteri <i>Lactobacillus</i> dalam fermentasi kopi luwak buatan dengan bantuan medan magnet ELF	100 μ T dan 300 μ T	15, 30, dan 45 menit	Paparan sebesar 300 μ T selama 45 menit mampu meningkatkan jumlah bakteri <i>Lactobacillus</i> dalam mempengaruhi aktivitas fermentasi.

2.11 Kerangka Konsep Penelitian

Adapun alur dan konsep penelitian ditunjukkan oleh kerangka konsep berikut ini:



Gambar 2.3 Kerangka Konsep Penelitian

2.12 Pengembangan Hipotesis

Adapun hipotesis penelitian ini adalah:

- 2.12.1 Paparan medan EM-ELF berpengaruh terhadap nilai pH proses fermentasi kopi arabika.
- 2.12.2 Paparan medan EM-ELF berpengaruh terhadap nilai pH biji kopi arabika pasca fermentasi.
- 2.12.3 Paparan medan EM-ELF berpengaruh terhadap massa jenis biji kopi arabika pasca fermentasi.
- 2.12.4 Paparan medan EM-ELF berpengaruh terhadap kadar kafein kopi arabika *green beans* pasca fermentasi.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

3.1.1 Lokasi Penelitian

- a. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium ELF, Pendidikan Fisika Gedung 3, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember sebagai tempat pemaparan, serta tempat diukurnya nilai pH pada proses fermentasi.
- b. Kadar kafein diukur di Laboratorium Pangan Fungsional dan Neutraceutical, Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Jember.
- c. Pengeringan dan penghalusan biji kopi setelah fermentasi dilaksanakan di Laboratorium Inovasi Hasil Pertanian dan Kewirausahaan, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Jember.

3.1.2 Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada semester genap 2025/2026.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Alat Penelitian

- a. *Current Transformer* (CT). Mesin yang digunakan untuk menghasilkan medan elektromagnetik ELF.
- b. *EMF Tester*. Digunakan dalam mengukur besar medan elektromagnetik yang dihasilkan oleh mesin CT yang menjadi acuan dalam penelitian.
- c. *Regulating Oven Selecta* Model 4000779. Digunakan untuk memeringkan biji kopi hasil fermentasi.
- d. *Dry Food Grinder FGD-Z100*. Digunakan untuk menghaluskan biji kopi yang telah di keringkan.
- e. *80 Sieve test mesh*. Digunakan untuk menyaring bubuk kopi yang telah dihaluskan agar sesuai dengan standar pengukuran kadar kafein.
- f. pH-meter. Digunakan untuk mengukur tingkat keasaman pada biji kopi selama proses fermentasi.
- g. *Food pack* 3800 ml. Digunakan sebagai tempat fermentasi kopi.
- h. Saringan. Digunakan untuk tempat meniriskan biji kopi setelah di rehidrasi.

- i. Gelas ukur. Digunakan untuk mengukur volume air aquades.
- j. Gelas beaker. Digunakan untuk wadah pengukuran pH biji kopi arabika.
- k. Neraca digital. Digunakan untuk mengukur massa dari biji kopi kering dan ragi tapai.
- l. Sarung tangan plastik. Digunakan untuk mengaduk dan mencampur bahan yang akan di fermentasi.
- m. *Air lock*. Digunakan untuk tempat keluarnya udara pada proses fermentasi.
- n. Lakban. Digunakan untuk merekatkan tutup wadah fermentasi agar tidak terkena udara luar secara terus menerus.
- o. Plastik $\frac{1}{2}$ kg. Digunakan untuk tempat sampel kopi yang telah dikeringkan dan dihaluskan.
- p. Kuas cat 2 inch. Digunakan untuk membantu proses penyaringan bubuk kopi.

3.2.2 Bahan Penelitian

- a. Biji kopi arabika. Biji kopi kering yang digunakan adalah biji kopi berkualitas super sebanyak 6 kg dengan 4 kg kelompok eksperimen dan 2 kg kelompok kontrol.
- b. Ragi Tapai. Ragi tapai merupakan katalisator dalam proses fermentasi biji kopi.
- c. Air aquades. Air digunakan untuk merendam biji kopi selama proses fermentasi.

3.3 Variabel Penelitian

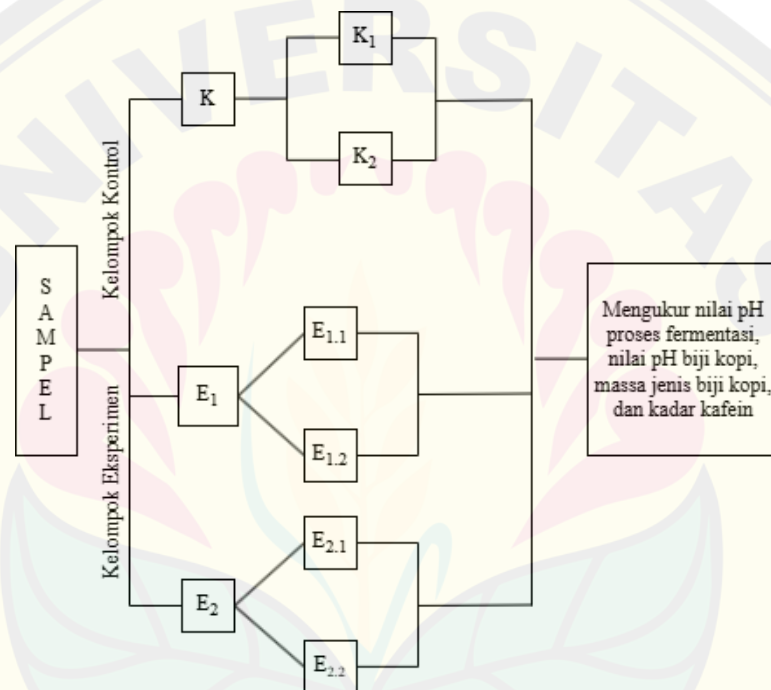
Penelitian ini menggunakan populasi biji kopi arabika yang berwarna hijau dengan kualitas super dari daerah Ijen, Bondowoso. Berikut adalah variabel pada penelitian ini:

- a. Variabel Bebas
 - 1. Besar intensitas yang digunakan adalah 300 dan 500 μ T.
 - 2. Lama paparan yang digunakan sebesar 30 dan 60 menit
- b. Variabel Terikat
 - 1. Nilai pH pada proses fermentasi biji kopi arabika
 - 2. Nilai pH biji kopi arabika pasca fermentasi
 - 3. Massa jenis biji kopi arabika pasca fermentasi

4. Kadar Kafein pada biji kopi arabika *green beans*.

3.4 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan *Factorial Completely Randomized Desain*. Desain ini bertujuan dalam menguji adanya variabel moderator dalam mempengaruhi variabel independen terhadap variabel dependen (Sugiyono *et al.*, 2019: 117). Desain yang digunakan adalah desain faktorial 3×2 , dengan tiga faktor intensitas (kontrol, 300 μ T, dan 500 μ T) serta lama paparan (30 dan 60 menit). Adapun desain penelitian yang digunakan akan dijelaskan pada bagan berikut:



Gambar 3.1 Desain Penelitian

Keterangan:

K₁: Kelompok kontrol negatif (-) tanpa perlakuan apapun.

K₂: Kelompok kontrol positif (+) dengan fermentasi tanpa paparan medan EM-ELF pada jam ke-5, 10, 15, dan 20.

E_{1.1}: Kelompok paparan 300 μ T selama 30 menit pada jam ke-5, 10, 15, dan 20.

E_{1.2}: Kelompok paparan 300 μ T selama 60 menit pada jam ke-5, 10, 15, dan 20.

E_{2.1}: Kelompok paparan 500 μ T selama 30 menit pada jam ke-5, 10, 15, dan 20.

E_{2.2}: Kelompok paparan 500 μ T selama 60 menit pada jam ke-5, 10, 15, dan 20.

3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini terdiri dari persiapan dan penentuan sampel, prosedur fermentasi kopi menggunakan ragi tapai, prosedur pemaparan gelombang elektromagnetik ELF, prosedur pengukuran nilai pH pada proses fermentasi biji kopi arabika, prosedur pengeringan biji kopi hasil fermentasi, prosedur penghalusan biji kopi hasil fermentasi, penyaringan bubuk kopi hasil fermentasi, prosedur pengukuran pH biji kopi, prosedur pengukuran massa jenis biji kopi, prosedur pengukuran kadar kafein pada biji kopi fermentasi, serta bagan prosedur penelitian. Prosedur-prosedur tersebut akan dijelaskan secara terperinci pada lampiran 2.

3.6 Pengumpulan Data Penelitian

Data penelitian dikumpulkan dengan metode eksperimen laboratorium. Hasil dari pengumpulan data akan disajikan dalam bentuk tabel pada lampiran 3.

3.7 Metode Analisis

Analisis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah *One Way* ANOVA dengan tahapan sebagai berikut:

- a. Uji normalitas dan homogenitas, data yang dianalisis harus memiliki $p\text{-value} > 0,05$
- b. Uji *One way ANOVA*, pengambilan keputusan dilakukan berdasarkan dari nilai $p\text{-value}$ yang dihasilkan. Apabila $p\text{-value} \leq 0,05$ maka H_0 ditolak, yang berarti terdapat perbedaan antar kelompok. Sebaliknya, apabila $p\text{-value} > 0,05$ maka H_0 diterima, yang berarti tidak terdapat perbedaan antar kelompok.
- c. Uji Post Hoc *Least Significance Different* (LSD), Jika $p\text{-value} \leq 0,05$ menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antar kelompok, sedangkan $p\text{-value} > 0,05$, yang berarti tidak terdapat perbedaan yang signifikan antar kelompok.

Apabila data yang dihasilkan tidak memenuhi uji normalitas, analisis diganti dengan uji non parametrik Kruskal-Wallis dengan tahapan sebagai berikut:

- a. Uji *mean rank* untuk melihat tingkatan dari setiap kelompok perlakuan

- b. Uji Kruskal-Wallis, $p\text{-value} \leq 0,05$ menunjukkan H_0 ditolak (terdapat perbedaan). Sedangkan, $p\text{-value} > 0,05$ menunjukkan H_0 diterima (tidak terdapat perbedaan).
- c. Uji Mann-Whitney, memiliki syarat $p\text{-value} \leq 0,05$ menunjukkan H_0 ditolak (terdapat perbedaan). Apabila $p\text{-value} > 0,05$ menunjukkan H_0 diterima (tidak terdapat perbedaan).

Adapun hipotesis pada penelitian ini adalah:

1. H_0 berarti medan EM-ELF tidak memberikan pengaruh terhadap nilai pH proses fermentasi, pH biji kopi pasca fermentasi, massa jenis biji kopi pasca fermentasi, dan kadar kafein biji kopi arabika *green beans*.
2. H_a berarti medan EM-ELF memberikan pengaruh nyata terhadap nilai pH proses fermentasi, pH biji kopi pasca fermentasi, massa jenis biji kopi pasca fermentasi, dan kadar kafein biji kopi arabika *green beans*.

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

4.1.1 Hasil Pengukuran Medan Elektromagnetik ELF pada Proses Fermentasi Biji Kopi Arabika

a. Hasil Pengukuran Medan Elektromagnetik Alamiah

Tabel 4.1 Pengukuran Medan EM-ELF Alamiah

<i>Output (Measurement System)</i>		Hasil Konversi Medan Magnet (μT)
Medan Magnet (m A/m)	Medan Listrik (V/m)	
10,41	1,455	0,01308

b. Hasil Pengukuran pada Proses Paparan Kelompok Eksperimen 1

Tabel 4.2 Pengukuran Meda EM-ELF Kelompok Paparan 1

<i>Input (AC)</i>		<i>Output (Measurement System)</i>		Hasil Konversi Medan Magnet (μT)
Tegangan (V)	Arus (A)	Medan Magnet (A/m)	Medan Listrik (V/m)	
35	835,45	224,4	7,439	282

c. Hasil Pengukuran pada Proses Paparan Kelompok Eksperimen 2

Tabel 4.3 Pengukuran Medan EM-ELF Kelompok Paparan 2

<i>Input (AC)</i>		<i>Output (Measurement System)</i>		Hasil Konversi Medan Magnet (μT)
Tegangan (V)	Arus (A)	Medan Magnet (A/m)	Medan Listrik (V/m)	
54,8	1340,9	406,156	9,592	510,375

Pada tabel tersebut, dapat dilihat rata-rata besar intensitas medan magnet yang digunakan saat proses fermentasi biji kopi arabika adalah $282 \mu\text{T}$ dan $510,375 \mu\text{T}$ yang termasuk cukup berbeda dengan variabel yang digunakan untuk melakukan penelitian yaitu 300 dan $500 \mu\text{T}$. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan adanya perbedaan *input* tegangan yang dialirkan oleh listrik pada alat *Current Transformer* EM-ELF di tempat penelitian. Sedangkan, medan magnet alamiah yang berapa pada ruang tersimpannya kelompok negatif (-) (tanpa paparan) berada pada rentang $0,01308 \mu\text{T}$. Sehingga terdapat perbedaan yang sangat nyata akan dirasakan oleh kedua kelompok, yaitu kelompok kontrol dan eksperimen.

4.1.2 Pemaparan pada Proses Fermentasi Biji Kopi Arabika

Proses fermentasi dilakukan dengan menggunakan metode fermentasi basah dengan bantuan ragi tapai sebagai katalisator. Proses fermentasi dilakukan satu jam sebelum pemaparan. Hal ini dilakukan karena ragi tapai dapat aktif setelah satu jam proses peragian

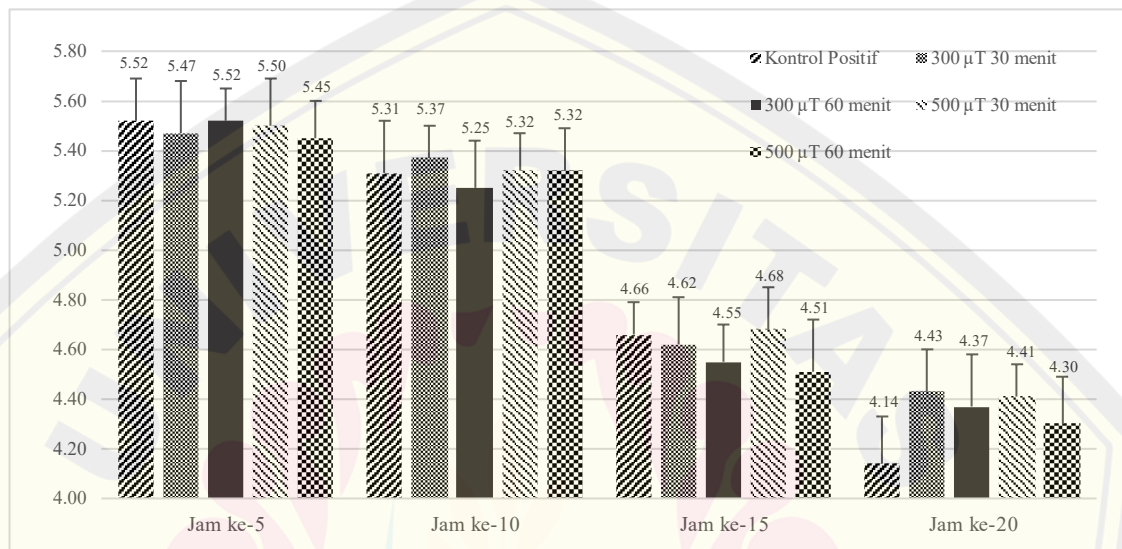


Gambar 4.1 Alat Penghasil Medan EM-ELF

Pemaparan dilakukan selama berurutan, dengan dua kelompok intensitas $300 \mu\text{T}$ dan $500 \mu\text{T}$, dengan lama paparaan selama 30 dan 60 menit. Pemaparan dan penyimpanan proses fermentasi dilakukan pada suhu berkisar 31°C dan kelembapan 90%. Gambar diatas menunjukkan alat yang digunakan untuk penelitian yang disebut dengan *Current Transformer*, dengan (a) menunjukkan generator ELF yang dapat menghasilkan medan EM-ELF sesuai dengan intensitas yang digunakan untuk penelitian. Sedangkan (b) merupakan sangkar ELF yang berupa tempat untuk meletakkan objek penelitian, sehingga dapat terpapar medan EM-ELF.

4.1.3 Hasil Pengukuran Nilai pH pada Proses Fermentasi Biji Kopi Arabika dengan Paparan Medan Elektromagnetik ELF

Proses pengukuran pH dilaksanakan pada jam ke 5, 10, 15, dan 20 setelah fermentasi. Proses ini dilakukan secara bergantian dengan 15 kali pengulangan pada semua sampel penelitian. Rata-rata hasil pengukuran nilai pH pada proses fermentasi disajikan dalam grafik berikut ini:



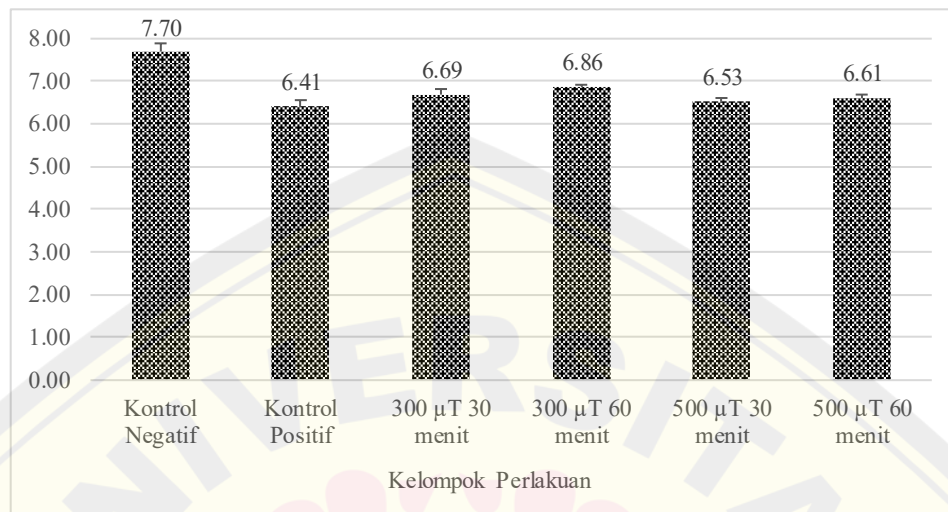
Gambar 4.2 Grafik Rata-rata Nilai pH Proses Fermentasi

Pada grafik ini, pada jam ke-5, nilai pH pada seluruh kelompok perlakuan memiliki rata-rata nilai pH yang seragam. Pada fase ini pemberian paparan medan elektromagnetik ELF belum memberikan adanya pengaruh yang berbeda. Semakin berjalannya waktu, seluruh kelompok perlakuan memiliki rata-rata nilai pH yang semakin menurun. Pada jam ke-20 setelah fermentasi kelompok kontrol positif (+) memiliki pH yang rendah yaitu 4,14. Sementara itu, kelompok dengan paparan medan elektromagnetik ELF, memiliki rata-rata nilai pH yang cenderung lebih tinggi yaitu berkisar 4,30 – 4,41, yang secara khusus kelompok paparan 300 μ T selama 30 menit menghasilkan pH yang paling tinggi.

4.1.4 Hasil Pengukuran pH Biji Kopi Hasil Fermentasi dengan Paparan Medan Elektromagnetik ELF

Pada setiap kelompok perlakuan, menjalani 15 kali pengukuran menggunakan alat pH meter sudah dikalibrasi. Proses tersebut dilakukan

menggunakan biji kopi yang sudah dihaluskan. Lalu, ditimbang sebesar 2g per satu pengukuran. Rata-rata hasil pengukuran pH biji kopi pada masing-masing sampel disajikan dalam grafik berikut:

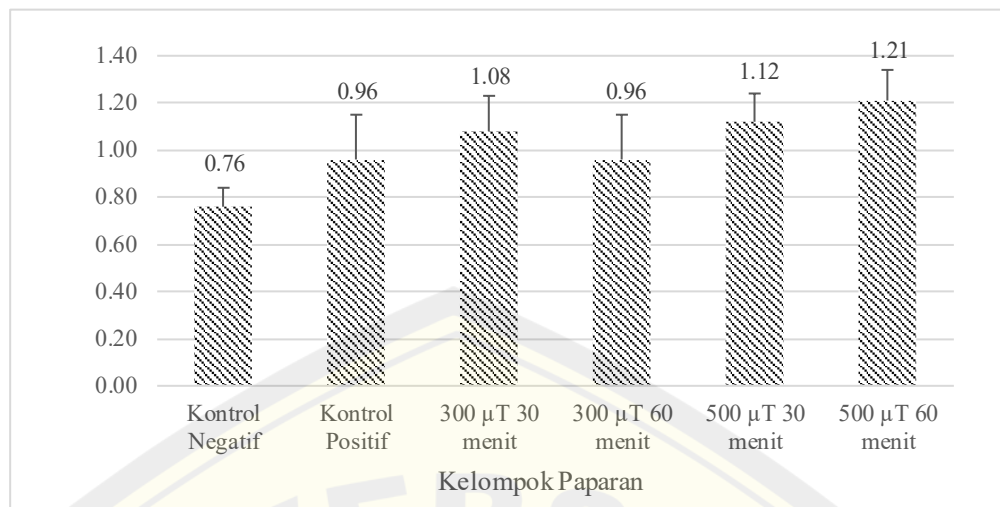


Gambar 4.3 Grafik Rata-rata Nilai pH Biji Kopi Arabika

Pada grafik diatas, biji kopi tanpa perlakuan apapun (kontrol negatif (-)) mempunyai rata-rata pH tertinggi yaitu 7,69. Pada kelompok kontrol positif (+) besar rata-rata pH yang paling rendah yaitu 6,42. Hal tersebut membuktikan bahwa proses fermentasi dapat mempengaruhi kadar pH yang dimiliki oleh biji kopi. Berdasarkan data diatas, rata-rata pH pada kelompok eksperimen dengan paparan medan elektromagnetik ELF lebih tinggi dibandingkan dengan kelompok kontrol positif (+), namun lebih rendah dari pada kelompok kontrol negatif (-).

4.1.5 Hasil Pengukuran Massa Jenis Biji Kopi Hasil Fermentasi dengan Paparan Medan Elektromagnetik ELF

Proses pengukuran massa jenis menggunakan perbandingan massa biji kopi dan selisih dua volume air aquades. Konsisten dengan metode variabel lainnya, massa jenis biji kopi pasca fermentasi diukur sebanyak 15 kali pada masing-masing kelompok. Rata-rata massa jenis biji kopi disajikan dalam grafik berikut ini:



Gambar 4.4 Grafik Rata-rata Massa Jenis Biji Kopi Arabika

Pada grafik diatas, kelompok kontrol negatif (-) memiliki rata-rata masa jenis lebih rendah dibandingkan dengan semua kelompok kontrol positif (+) dan kelompok eksperimen. Kelompok dengan paparan 500 µT (60 menit) memiliki rata-rata massa jenis paling tinggi yaitu 1,21 g/cm³. Hal ini dikarenakan biji kopi memiliki penyusutan karena proses fermentasi yang membuat biji kopi semakin padat. Selain itu, kelompok paparan 300 µT selama 60 menit menghasilkan rata-rata massa jenis yang sama dengan kelompok kontrol positif (+).



Gambar 4.5 Biji Kopi Sebelum Fermentasi



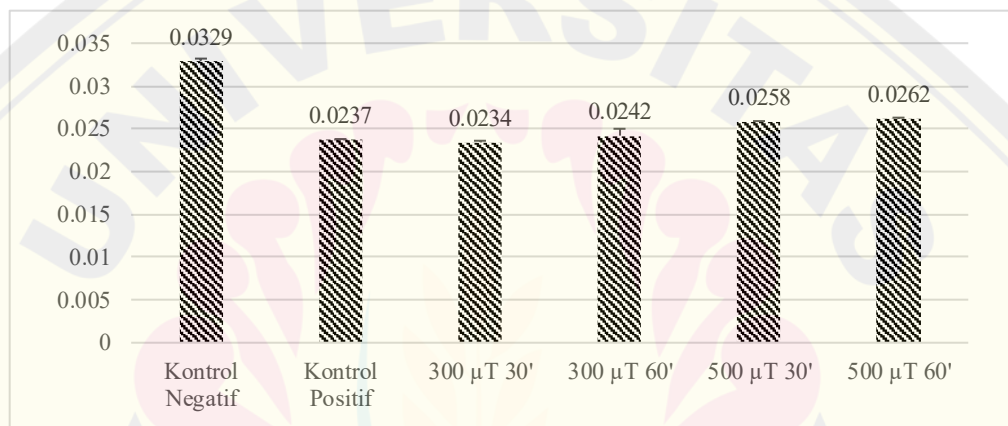
Gambar 4.6 Biji Kopi Pasca Fermentasi

Berdasarkan pengamatan visual yang disajikan pada Gambar 4.6 dan 4.7 , biji kopi arabika menunjukkan perubahan fisik yang signifikan setelah proses fermentasi. Terjadi perubahan warna biji dari hijau pucat menjadi kecoklatan. Selain perubahan warna, terjadi penyusutan struktur biji kopi. Perubahan tersebut, berhubungan dengan peningkatan massa jenis biji kopi pasca fermentasi. Sehingga

secara visual, biji kopi hasil fermentasi dengan paparan medan EM-ELF tampak lebih padat dan pigmentasi yang lebih gelap dibandingkan dengan biji kopi sebelum fermentasi.

4.1.6 Hasil Pengukuran Kadar Kafein pada Biji Kopi Hasil Fermentasi dengan Paparan Medan Elektromagnetik ELF

Proses pengukuran kadar kafein pada biji kopi dilakukan dalam bentuk *greenbean*. Kopi yang telah di keringkan menggunakan oven lalu dihaluskan menggunakan grinder, kemudian bubuk kopi di ayak menggunakan *steve test 80* mesh. Hasil pengukuran kadar kafein dapat dilihat dalam grafik berikut ini:



Gambar 4.7 Grafik Rata-rata Kadar Kafein Kopi Arabika Green Bean

Pada grafik diatas, dapat dilihat bahwa terdapat enam kelompok penelitian yaitu dua kelompok kontrol dan empat kelompok eksperimen. Data di atas menunjukkan adanya penurunan kadar kafein pada kelompok eksperimen, dengan acuan kadar kafein pada kelompok kontrol negatif (-) yang merupakan biji kopi yang tidak diberikan perlakuan apapun. Kadar kafein tertinggi terdapat pada kelompok kontrol negatif (-) yang memiliki kadar kafein sebesar $0,0329\% \pm 0,0003$. Sementara itu, kadar kafein terendah terdapat pada kelompok 300 μ T selama 30 menit yang memiliki kadar kafein sebesar $0,0234\% \pm 0,0002$.

4.2 Analisis Data

4.2.1 Komparasi Nilai pH pada Proses Fermentasi Biji Kopi Arabika antar Kelompok Perlakuan

Analisis data pH proses fermentasi kopi arabika diolah melalui IBM SPSS Statistics 27, dimulai pengujian normalitas dengan uji Shapiro-Wilk dan pemeriksaan homogenitas. Uji Shapiro-Wilk digunakan untuk $n = 15$ (< 50) (Razali dan Wah, 2011). Berdasarkan hasil uji normalitas semua kelompok yang digunakan dalam penelitian yaitu kelompok kontrol dan eksperimen pada jam ke-5 hingga jam ke-20 memiliki $p\text{-value} > 0,05$, sehingga data ini berdistribusi normal. Kemudian data akan dilanjutkan dengan uji homogenitas.

Tabel 4.4 Uji Homogenitas Data Nilai pH Proses Fermentasi

Nilai pH Based on Mean	Tests of Homogeneity of Variances			Sig.
	Levene Statistic	df1	df2	
	0,887	4	70	0,476

Hasil uji homogenitas berdasarkan pada perbedaan antar kelompok pada nilai Levene Statistic sebesar 0,887. Selain itu, data hasil nilai pH pada jam ke-5 hingga jam ke-20 memiliki $p\text{-value} > 0,05$ yang data bersifat homogen atau memiliki *varians* yang sama. Selanjutnya dapat dilakukan uji *one way* ANOVA.

Berdasarkan pada lampiran 7.2 hasil uji *one way* ANOVA jam ke-5 dan 10 fermentasi, data menunjukkan bahwa tidak adanya perbedaan antar kelompok perlakuan, yang dibuktikan dengan $p\text{-value} > 0,05$. Data tersebut dilandasi dengan nilai *sum of squares between groups* yang mengindikasikan bahwa perbedaan antar kelompok bernilai sangat kecil yaitu 0,058 dan 0,110. Selain itu, nilai *sum of squares withing groups* yang merupakan indikator pendukung bahwa perlakuan yang diberikan menghasilkan dampak yang seragam, yang ditunjukkan dengan nilai yang cukup besar yaitu 2,112. Senada dengan hal tersebut, nilai F yang pada kedua data mendekati atau dibawah 1 yaitu 0,482 dan 0,910, sehingga menjadi bukti $p\text{-value}$ tidak ada perbedaan (Sig. $> 0,05$).

Justru sebaliknya, berdasarkan pada hasil uji *one way* ANOVA jam ke-15 dan 20 fermentasi, memperlihatkan bahwa nilai *sum of squares between groups* sebesar 0,314 dan 0,825 yang lebih tinggi daripada dua kelompok sebelumnya.

Begitu pula, nilai *sum of squares within groups* memiliki nilai yang sama dengan kelompok sebelumnya yaitu 2,112. Namun, pada kedua kelompok ini memiliki nilai *F* yang besar yaitu 2,600 dan 6,835. sehingga *p-value* < 0,05 membuktikan bahwa terdapat perbedaan secara statistik pada kelompok perlakuan. Kemudian, dapat dilakukan uji lanjutan yaitu uji Post-Hoc LSD.

Hasil uji post-hoc LSD pada jam ke-15 dalam lampiran 7.3, memberikan beberapa perbedaan nilai pH yang signifikan antar kelompok perlakuan. Adapun diantaranya adalah perbandingan antara kelompok paparan 300 $\mu\text{T}/60'$ dan 500 $\mu\text{T}/30'$ dengan nilai *mean difference* sebesar -0,13000 (*p-value* 0,044). Dalam hal yang sama, perbedaan yang signifikan ditunjukkan oleh kelompok paparan 500 $\mu\text{T}/60'$ dengan dua kelompok yang berbeda, seperti kelompok kontrol positif (+) yang memiliki nilai *mean difference* sebesar -0,1500 (*p-value* 0,021) dan pada kelompok paparan 500 $\mu\text{T}/30'$ dengan nilai *mean difference* sebesar -0,17000 (*p-value* 0,009).

Sejalan dengan data tersebut, hal yang paling berbeda ditunjukkan oleh kelompok paparan 500 $\mu\text{T}/30'$ yang secara signifikan memiliki nilai pH lebih tinggi dari pada dua kelompok lain yaitu 300 $\mu\text{T}/60'$ dan 500 $\mu\text{T}/60'$. Demikian pula, kelompok kontrol positif (+) memiliki nilai pH lebih tinggi dari pada kelompok paparan 500 $\mu\text{T}/60'$. Sedangkan kelompok lain tidak menunjukkan adanya perbedaan terhadap kelompok kontrol positif (+). Sehingga, mengindikasikan bahwa perlakuan tersebut memberikan pengaruh pH yang serupa dengan kelompok kontrol dalam fase fermentasi ini.

Adapun hasil analisis post-hoc LSD pada jam ke-20 terdapat beberapa perbedaan nilai pH yang signifikan. Pernyataan tersebut berdasarkan kepada perbandingan antara kontrol positif (+) terhadap empat kelompok paparan EM-ELF, seperti tiga kelompok dengan *p-value* < 0,001 yaitu 300 $\mu\text{T}/30'$ dan 60', serta 500 $\mu\text{T}/30'$. Kelompok lain yang bisa dibandingkan adalah kelompok paparan 500 $\mu\text{T}/60'$ dengan kelompok paparan 300 $\mu\text{T}/30'$ memiliki *p-value* 0,044.

Hal tersebut berarti, nilai pH fermentasi seluruh kelompok perlakuan EM-ELF (300 μT dan 500 μT) dengan durasi 30' dan 60' lebih tinggi dibandingkan

kontrol positif (+). Jika dibandingkan dengan kelompok paparan 500 $\mu\text{T}/60'$, kelompok 300 $\mu\text{T}/30'$ menghasilkan angka pH yang lebih tinggi.

4.2.2 Komparasi Nilai pH Biji Kopi Arabika Hasil Fermentasi antar Kelompok Perlakuan

Analisis data yang dilakukan untuk nilai pH Biji Kopi Hasil Fermentasi untuk setiap kelompok perlakuan dimulai dengan uji normalitas menggunakan IBM SPSS *Statistics* 27 dengan syarat $p\text{-value} > 0,05$. Berdasarkan tabel uji normalitas data, kelompok kontrol negatif (-), kontrol positif (+), paparan 500 $\mu\text{T}/30'$, dan paparan 500 $\mu\text{T}/60'$ memiliki $p\text{-value} > 0,05$ yang berarti data tersebut berdistribusi normal. Namun, kelompok paparan 300 μT (30' dan 60') memiliki $p\text{-value} < 0,05$ yang berarti data dari kedua kelompok perlakuan dianggap tidak berdistribusi normal. Sedangkan, untuk melakukan uji *one way* ANOVA data harus berdistribusi normal. Dengan demikian, analisis data akan dialihkan menggunakan uji Kruskal-Wallis sebagai uji alternatif non-parametrik.

Tabel 4.5 Uji Mean Rank pH Biji Kopi Arabika

		Ranks	
	Research Group	N	Mean Rank
pH Biji Kopi	Kontrol negatif (-)	15	83,00
	Kontrol positif (+)	15	15,47
	300/30	15	46,80
	300/60	15	66,03
	500/30	15	24,97
	500/60	15	36,73
	Total	90	

Sebelum melakukan uji non-parametrik, dibutuhkan pengujian *mean rank* untuk setiap kelompok perlakuan. Menurut tabel 4.5 kontrol negatif (-) memiliki nilai *mean rank* paling tinggi yaitu 83,00 yang berarti nilai pH pada kelompok ini lebih tinggi daripada yang lain. Kemudian, kelompok paparan 300 $\mu\text{T}/60'$ (*mean rank* 66,03), 300 $\mu\text{T}/30'$ (*mean rank* 46,80), 500 $\mu\text{T}/60'$ (*mean rank* 36,73), dan 500 $\mu\text{T}/30'$ (*mean rank* 24,97). Sementara kelompok dengan nilai pH biji kopi paling rendah adalah kelompok kontrol positif (+). Uji *mean rank* dilakukan untuk mengetahui peringkat nilai pH biji kopi. Selanjutnya akan dilakukan uji non parametrik Kruskal-Wallis.

Tabel 4.6 Uji Kruskal-Wallis Nilai pH Biji Kopi Arabika

Test Statistics ^{a,b}	
Kruskal-Wallis H	pH Biji Kopi 71,069
df	5
Asymp. Sig.	< 0,001

Menurut tabel 4.6 diatas, Nilai H merupakan hasil perhitungan seberapa besar perbedaan antar kelompok perlakuan. Semakin besar nilai H, maka perbedaan antar kelompok sangat berbeda. Dalam hal ini, nilai H yang didapatkan dalam pengukuran nilai pH biji kopi tinggi yaitu 71,069 dengan derajat kebebasan sebesar 5. Uji Kruskal-Wallis diatas, mendapatkan *p-value* sebesar $< 0,001$, yang mengidentifikasikan bahwa adanya perbedaan yang sangat nyata secara statistik. Sehingga, diperlukan adanya uji lanjutan melalui uji Mann-Whitney untuk melihat perbandingan yang lebih spesifik.

Berdasarkan uji Mann-Whitney, perbandingan kontrol negatif (-), kontrol positif (+), paparan 300 $\mu\text{T}/60'$, paparan 500 $\mu\text{T}/30'$ terhadap kelompok lain memiliki perbedaan yang sangat spesifik secara statistik. Hal tersebut dibuktikan dengan Exact Sig. $\leq 0,023$. Secara khusus, ditemukan perbandingan dua kelompok yang memiliki perbedaan nyata secara statistik yaitu kelompok kontrol positif (+) dan paparan 500 $\mu\text{T}/30'$, yang menghasilkan nilai U sebesar 54,000 (Exact Sig. 0,015). Lalu, perbandingan antara kelompok paparan 500 $\mu\text{T}/30'$ dan paparan 500 $\mu\text{T}/60'$ didapatkan nilai U sebesar 58,000 (Exact Sig. 0,023). Disisi lain, perbandingan kelompok paparan 300 $\mu\text{T}/30'$ dan 500 $\mu\text{T}/60'$ tidak menunjukkan perbedaan yang spesifik, dengan nilai U sebesar 74,000 (Exact Sig. 0,116).

Dengan demikian, terdapat perbedaan yang signifikan terhadap beberapa kelompok perlakuan. Nilai pH biji yang tinggi pada kontrol negatif (-) mencerminkan kondisi awal biji kopi tanpa perlakuan apapun. Sementara itu, tingkat keasaman paling kuat didapatkan dari kontrol positif (+) dengan nilai pH biji yang lebih rendah dibandingkan kelompok lain.

4.2.3 Komparasi Massa Jenis Biji Kopi Arabika antar Kelompok Perlakuan

Analisis data yang dilakukan untuk massa jenis biji kopi arabika diawali dengan uji normalitas Shapiro-Wilk menggunakan IBM SPSS *Statistics* 27 pada semua kelompok perlakuan, dengan syarat $p\text{-value} > 0,05$. Berdasarkan tabel uji normalitas data, kelompok kontrol negatif (-) memiliki $p\text{-value} > 0,05$. Disisi lain lima kelompok lain (kelompok kontrol positif (+), intensitas 300 μT (30' dan 60'), intensitas 500 μT (30' dan 60')) memiliki $p\text{-value} < 0,05$. Sehingga, semua data akan dilakukan uji non-parametrik Kruskal-Wallis sebagai uji alternatif.

Tabel 4.7 Uji Mean Rank Massa Jenis Biji Kopi Arabika

		Ranks	
	Research Group	N	Mean Rank
Massa Jenis Biji Kopi	Kontrol negatif (-)	15	14,43
	Kontrol positif (+)	15	38,73
	300/30	15	53,70
	300/60	15	38,57
	500/30	15	58,90
	500/60	15	68,67
	Total	90	

Dalam hasil uji ini menunjukkan massa jenis paling tinggi secara berurutan yaitu paparan 500 $\mu\text{T}/60'$, 500 $\mu\text{T}/30'$, 300 $\mu\text{T}/30'$, kontrol positif (+), 300 $\mu\text{T}/60'$. Serta, kelompok dengan massa jenis paling kecil, yaitu kelompok kontrol negatif (-). Setelah data tersebut didapatkan, akan dilakukan uji Kruskal-Wallis, guna melihat perbedaan antar kelompok penelitian.

Tabel 4.8 Uji Kruskal-Wallis Massa Jenis Biji Kopi Arabika

Test Statistics ^{a,b}	
	Massa Jenis Biji Kopi
Kruskal-Wallis H	44,354
df	5
Asymp. Sig.	< 0,001

Menurut hasil diatas, setiap kelompok perlakuan memiliki nilai H yang cenderung tinggi yaitu 44,354. Hal tersebut berarti jarak peringkat antar kelompok perlakuan sangat berbeda, sehingga mengakibatkan $p\text{-value} < 0,05$, yang mengidentifikasi bahwa terdapat perbedaan yang signifikan pada massa jenis setiap kelompok perlakuan. Untuk membuktikan perbedaan yang lebih mendetail

antar kelompok, dilakukan uji Mann-Whitney kepada data yang menggunakan uji non-parametrik.

Hasil uji Mann-Whitney menunjukkan adanya perbandingan kelompok kontrol negatif (-) dan semua kelompok perlakuan memiliki perbedaan yang signifikan (Exact Sig. $\leq 0,005$). Sejalan dengan hal tersebut, ada perbedaan signifikan antara kelompok paparan 500 $\mu\text{T}/60'$ dan hampir seluruh kelompok paparan (Exact Sig. $\leq 0,05$). Sementara itu, perbandingan kelompok kontrol positif (+) terhadap dua kelompok lain, yaitu paparan 300 μT dengan durasi 30 menit dan 60 menit menunjukkan tidak adanya perbedaan yang signifikan, dengan Exact Sig. yang berurutan yaitu 0,106 dan 0,967 ($> 0,05$). Berdasarkan hal tersebut, massa jenis terendah dimiliki oleh kontrol negatif (-). Sedangkan, untuk kelompok dengan induksi medan EM-ELF, paparan 500 $\mu\text{T}/60'$ merupakan kelompok dengan massa jenis tertinggi pada penelitian ini. Namun, paparan 300 $\mu\text{T}/60'$ memiliki nilai massa jenis yang cenderung sama dengan kontrol positif (+).

4.2.4 Komparasi Kadar Kafein Biji Kopi Arabika antar Kelompok Perlakuan

Tabel 4.9 Uji Kadar Kafein Kopi Arabika *Green Bean*

Kelompok	Kadar Kafein	
	Hasil Uji (%) $\pm$ SD	
Kontrol negatif (-)	0,0329 $\pm$ 0,0003	
Kontrol positif (+)	0,0237 $\pm$ 0,0001	
300 μT 30'	0,0234 $\pm$ 0,0002	
300 μT 60'	0,0242 $\pm$ 0,0008	
500 μT 30'	0,0258 $\pm$ 0,0001	
500 μT 60'	0,0262 $\pm$ 0,0001	

Tabel 4.9 menyajikan data kadar kafein pada biji kopi arabika pada setiap kelompok perlakuan. Berdasarkan hasil pengukuran, kelompok kontrol negatif (-) menampilkan kadar kafein tertinggi yaitu 0,0329% $\pm$ 0,0003. Selaras dengan hal tersebut, dalam kelompok paparan, peningkatan intensitas dan waktu paparan mempengaruhi peningkatan kadar kafein. Hal tersebut dibuktikan dari kelompok paparan 500 μT selama 60 menit yang memiliki kadar kafein sebesar 0,0262% $\pm$ 0,0001, lebih besar daripada kelompok paparan 500 μT selama 30 menit dengan kadar kafein 0,0258% $\pm$ 0,0001. Disisi lain, kelompok perlakuan dengan kadar

kafein paling rendah ditunjukkan oleh kelompok paparan 300 μ T selama 30 menit dengan nilai $0,0234\% \pm 0,0002$, yang lebih rendah daripada kelompok kontrol positif (+) dengan kadar kafein sebesar $0,0237\% \pm 0,0001$. Rendahnya standar deviasi menunjukkan adanya tingkat presisi dan konsistensi yang tinggi pada setiap kelompok perlakuan.

4.3 Pembahasan

Penelitian ini dilaksanakan untuk mengkaji pengaruh medan EM-ELF dengan besar intensitas 300 dan 500 μ T dengan lama paparan 30 menit dan 60 menit terhadap proses fermentasi biji kopi arabika. Penelitian ini dilaksanakan selama 7 hari dengan kelompok yang ditinjau adalah eksperimen dan kontrol. Kelompok eksperimen diberikan perlakuan dengan menginduksi sampel menggunakan alat generator yang disebut *Current Transformer* sebesar 282 μ T dan 510,4 μ T. Pada penelitian ini, indikator yang diukur adalah nilai pH selama proses fermentasi, nilai pH biji kopi, massa jenis biji kopi, dan kadar kafein pada biji kopi setelah fermentasi.

4.3.1 Pengaruh Induksi Medan Elektromagnetik ELF terhadap Nilai pH Proses Fermentasi Biji Kopi Arabika

Data pengamatan pada jam ke-5 dan 10 menunjukkan bahwa seluruh kelompok tidak memiliki perbedaan secara statistik ($p\text{-value} > 0,05$). Namun, nilai pH terlihat signifikan pada pengukuran jam ke-15 dan 20 fermentasi dengan $p\text{-value} < 0,05$, yang mengidentifikasi perlunya melakukan uji lanjutan, guna menganalisis perbedaan yang mendalam antar kelompok perlakuan. Menurut uji post-hoc LSD, pada jam ke 15, paparan 500 μ T/30' memiliki perbedaan yang sangat signifikan dari pada dua kelompok perlakuan lain, yaitu kelompok paparan 300 μ T/60' dan 500 μ T/60'. Sehingga, induksi medan EM-ELF dengan intensitas 500 μ T/30' menghasilkan nilai pH yang paling tinggi dan stabil pada jam ke-15 fermentasi. Disisi lain, kelompok paparan 500 μ T/60' merupakan kelompok dengan nilai pH terendah dibandingkan seluruh kelompok lainnya, termasuk kelompok kontrol positif (+). Tingkat keasaman yang lebih rendah (pH tinggi) terlihat pada semua kelompok paparan (300 μ T dan 500, durasi 30-60 menit) dibandingkan

dengan kontrol positif (+) di jam ke-20 fermentasi. Diantara perlakuan tersebut, intensitas 300 μ T dengan lama paparan 30 menit mencatat nilai pH lebih tinggi dibanding kelompok 500 μ T/60 menit. Fenomena ini mengisyaratkan bahwa seluruh kelompok uji mengalami penurunan pH pada setiap jam fermentasi. Namun, pada jam ke-20, kelompok dengan pH paling tinggi dimiliki oleh kelompok paparan 300 μ T selama 30 menit dibandingkan dengan kelompok lain. Sedangkan kelompok paparan 500 μ T/60' memiliki pH yang paling rendah diantara kelompok dengan paparan medan EM-ELF.

Penurunan dan peningkatan pH yang terjadi akibat adanya populasi bakteri asam laktat (Purbawati *et al.*, 2021). Dalam metode fermentasi basah biji kopi, BAL yang berperan diantaranya *L. Brevis*, *L. Plantarum*, dan *E. Casseliflavus* memegang peran yang krusial (Sudarti *et al.*, 2020). Berbagai mikroba melakukan dekomposisi senyawa kompleks menjadi asam organik, seperti asam laktat serta asam asetat. Dalam proses fermentasi, penumpukan asam organik akan meningkatkan konsentrasi proton H^+ dan menurunkan pH akibat dari adanya penguraian asam amino. Peningkatan konsentrasi asam berbanding terbalik dengan nilai pH, semakin kuat derajat keasaman maka nilai pH yang dihasilkan akan semakin rendah (Sudarti *et al.*, 2020). Selama fermentasi, ragi berkembang biak pada lingkungan minim oksigen, yang menyebabkan asam, banyaknya karbohidrat, dan menurunnya oksigen. Etanol dan gula dihasilkan dengan adanya metabolisme dari ragi yang mengkonsumsi gula (Taringan & Iflah, 2018). Setelah itu, bakteri asam asetat mengonversi residu alkohol menjadi asam asetat. Akibatnya, terjadi kematian sel biji kopi yang menyebabkan terbukanya dinding sel, sehingga memicu perubahan kimiawi seperti aktivitas enzimatik, oksidasi, dan pemecahan protein menjadi asam amino (Taringan & Iflah, 2018). Paparan medan EM-ELF diduga mempengaruhi perubahan pH melalui aktivitas mikroorganisme dan enzim pada proses fermentasi. Medan magnet ELF dapat mengubah permeabilitas dari membran sel dan transport ion yang mampu mempengaruhi proses metabolisme dari mikroba penghasil asam organik. Capaian pH yang melampaui kelompok kontrol menunjukkan bahwa laju akumulasi asam selama fermentasi berlangsung lebih lambat. Kondisi ini yang diduga sebagai akibat dari paparan medan EM-ELF yang mempengaruhi

metabolisme sel pada mikroba fermentasi sehingga produksi asam lebih rendah (Firdausi *et al.*, 2023).

Temuan ini diperkuat oleh sejumlah studi terdahulu, diantaranya Ma'rufiyanti *et al.* (2014) dalam Azizah *et al.* (2022) melaporkan bahwa penggunaan medan magnet ELF dengan intensitas serupa dalam waktu 30 menit efektif dalam menjaga stabilitas pH buah tomat. Selain itu, Ridawati (2017) dalam Azizah *et al.* (2022), mengungkapkan adanya dampak signifikan dari paparan 300 μ T berdurasi 5 menit terhadap parameter pH dan daya hantar listrik pada susu fermentasi. Dalam mekanisme ini, Medan EM-ELF berperan memelihara laju pertumbuhan mikroorganisme penghasil asam (Azizah *et al.*, 2022), yang menyebabkan tingginya nilai pH dibandingkan kelompok tanpa paparan. Secara prinsip, rendahnya angka pH mencerminkan peningkatan derajat keasaman suatu produk. Berdasarkan korelasi tersebut, dapat disimpulkan bahwa medan EM-ELF dapat menstabilkan profil pH selama fermentasi biji kopi arabika, dengan nilai pH proses fermentasi tertinggi yaitu kelompok paparan 300 μ T selama 30 menit pada jam ke-20 fermentasi.

4.3.2 Pengaruh Induksi Medan Elektromagnetik ELF terhadap Nilai pH pada Biji Kopi Arabika

Data penelitian mengungkap adanya signifikansi pengaruh induksi medan EM-ELF terhadap pH biji kopi arabika. Hasil uji Kruskal-Wallis memperlihatkan signifikansi Asymp. Sig sebesar $< 0,001$. Berdasarkan uji Mann-Whitney, nilai pH tertinggi ditemukan pada kelompok kontrol negatif (-), sedangkan kelompok dengan keasaman paling kuat (pH terendah) adalah kontrol positif (+) dibandingkan dengan seluruh kelompok paparan. Secara spesifik, kombinasi 300 μ T selama waktu paparan 60 menit merupakan paparan dengan perbedaan yang signifikan terhadap mayoritas kelompok lain, diperkuat dengan nilai $U = 0,000$ dan Exact Sig. sebesar $< 0,001$ ($< 0,05$). Sementara itu, komparasi antara paparan 300 μ T/30 menit dan 500 μ T/60 menit tidak memperlihatkan adanya perbedaan yang signifikan, dengan perolehan Exact Sig. sebesar 0,116 ($> 0,05$). Hal tersebut memberikan

indikasi bahwa medan EM-ELF mampu mempertahankan nilai pH selama proses fermentasi.

Penurunan pH terjadi karena medan EM-ELF menyebabkan meningkatnya pergerakan ion ekstraseluler yang sedang melintas pada membran sel. Induksi medan magnet tersebut memberikan energi yang mendorong ion bergerak lebih aktif melalui kanal protein, serta mendorong mekanisme pembukaan ‘pintu’ saluran pada membran sel (Ridawati, 2017 dalam Azizah *et al.*, 2022). Ion kalsium (Ca^{2+}) merupakan ion yang krusial dalam pertumbuhan sel. Hal tersebut terjadi dikarenakan ion tersebut memiliki sifat paramagnetik yang responsif terhadap medan magnet. Medan magnet yang menginduksi suatu bahan akan menyebabkan spin elektron yang semula acak menjadi lebih terarah, sehingga arus yang dihasilkan mampu mengubah pergerakan ion kalsium ekstraseluler. Akibatnya, jika ketersediaan ion kalsium dalam sistem terpenuhi dengan tepat, maka laju pertumbuhan bakteri dan sel akan meningkat. Namun, jika terjadi ketidakseimbangan jumlah kalsium (kekurangan atau kelebihan) dari ambang batas yang dibutuhkan, maka akan menghambat pertumbuhan sel (Azizah *et al.*, 2022)

Hasil pengamatan ini selaras dengan studi terdahulu yang dilakukan oleh Kanza *et al.* (2020) yang menyebutkan bahwa medan magnet memicu penurunan pH pada kopi liberika selama tiga hari pertama, terutama paparan $400 \mu\text{T}$ berdurasi 60 menit. Namun, pada hari keempat dan kelima fenomena justru berbalik menjadi peningkatan pH, dengan kelompok paparan paling signifikan adalah $400 \mu\text{T}$ selama 30 menit. Selain itu, Anam (2020) juga menerangkan induksi magnetik dengan paparan $200 \mu\text{T}/60'$ dan $300 \mu\text{T}/45'$ efektif dalam mereduksi nilai pH dalam fermentasi *green coffee* robusta pada jam ke-16. Sehingga berdasarkan hasil penelitian, medan EM-ELF memberikan pengaruh terhadap nilai pH biji kopi arabika dengan mengendalikan pembentukan bakteri penghasil asam, yang dibuktikan dengan kelompok paparan $300 \mu\text{T}$ selama 60 menit memiliki pH biji kopi tertinggi.

4.3.3 Pengaruh Medan Elektromagnetik ELF terhadap Massa Jenis pada Biji Kopi Arabika

Hasil analisis membuktikan bahwa induksi medan EM-ELF memberikan dampak yang nyata terhadap massa jenis biji kopi arabika pasca fermentasi. Temuan tersebut ditunjukkan oleh nilai H pada uji Kruskal-Wallis sebesar 44,354 dengan Asymp. Sig. $< 0,001$. Mengingat hasil yang signifikan, analisis dilanjutkan dengan uji Mann-Whitney untuk melihat perbandingan antar kelompok. Hasil dari uji lanjut menunjukkan bahwa kelompok kontrol negatif (-) memiliki perbedaan yang signifikan terhadap seluruh kelompok perlakuan lainnya dengan Exact Sig. dalam $\leq 0,005$. Sejalan dengan hal tersebut, kelompok paparan 500 μT selama 60 menit memiliki Exact Sig. $\leq 0,05$ terhadap hampir seluruh kelompok perlakuan. Sementara itu, kontrol positif (+) memperlihatkan adanya perbedaan yang signifikan terhadap tiga kelompok perlakuan, yakni kontrol negatif (-), kelompok paparan 500 μT selama 30 dan 60 menit (Exact Sig. $\leq 0,026$). Namun, perbandingan kelompok lain, tidak menunjukkan adanya perbedaan signifikan, dibuktikan dengan banyaknya perbandingan antar kelompok yang memiliki Exact Sig. $> 0,05$. Oleh sebab itu, terdapat perbedaan massa jenis antara kelompok kontrol dengan kelompok induksi EM-ELF meskipun beberapa kelompok tidak menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan. Massa jenis terendah yaitu kelompok kontrol negatif (-) dan massa jenis tertinggi adalah kelompok paparan 500 $\mu\text{T}/60'$. Temuan lain yaitu intensitas 300 $\mu\text{T}/60$ menit memiliki massa jenis yang hampir sama dengan kelompok kontrol positif (+).

Temuan ini mengidentifikasikan bahwa kelompok yang terpapar medan EM-ELF mampu menunjukkan adanya peningkatan massa jenis. Induksi medan EM-ELF mampu mempengaruhi pertumbuhan sel dan perubahan biologi pada mikroorganisme yang menyebabkan perubahan massa jenis pada kelompok dengan paparan medan EM-ELF (Grubner, 20011 dalam Astutik *et al.*, 2022). Selain itu, medan EM-ELF dapat menyebabkan biji kopi mengalami perubahan struktur molekul yang memicu penyerapan air dan perubahan kadar air didalamnya, sehingga massa jenis pada biji kopi mengalami peningkatan (Masita *et al.*, 2023). Saat proses fermentasi, ragi mengonsumsi gula menjadi etanol dan CO^2 serta

meningkatkan kadar air. Hal tersebut memicu adanya perbedaan densitas pada sampel kontrol dan sampel eksperimen (Masita *et al.*, 2023). Peningkatan massa jenis pada biji kopi setelah fermentasi dengan bantuan medan EM-ELF mengidentifikasikan bahwa struktur pada biji kopi melunak, yang diakibatkan adanya enzim pektolitik dari mikroba lebih intensif dalam menguraikan polisakarida pada lapisan kopi. Sebagaimana dilaporkan oleh Martinez *et al.* (2022) bahwa adanya interaksi antara kadar air, suhu fermentasi, dan jenis mikroba seperti ragi dalam menentukan struktur fisik dan densitas akhir dari biji kopi kering. Selain itu, penelitian Masita *et al.* (2023) menemukan bahwa induksi medan magnet ELF dengan intensitas 500 μT dengan waktu paparan 45 menit dapat meningkatkan massa jenis pada fermentasi tapai ketan.

Berdasarkan hasil pengamatan visual, biji kopi arabika pasca fermentasi menunjukkan transformasi fisik berupa perubahan warna menjadi kecokelatan dan terjadinya penyusutan struktur biji. perubahan warna ini mengidentifikasikan adanya proses enzimatik yang intensif selama proses fermentasi. Hal tersebut, dijelaskan oleh De Bruyn *et al.* (2016) bahwa akumulasi dari asam organik (asam laktat dan asetat) menyebabkan penurunan nilai pH yang memicu penggelapan pigmentasi pada biji kopi. Disisi lain, penyusutan biji kopi berasal dari penguraian lapisan lendir oleh enzim pektolitik. Bressani *et al.* (2018) mengungkapkan bahwa penggunaan starter seperti *S. cerevisiae* meningkatkan substansi pektat yang mengikat air pada biji kopi. Dalam hal ini, induksi medan EM-ELF mempercepat laju metabolisme mikroba, sehingga mengakibatkan struktur biji mengalami perubahan volume yang berkontribusi dalam peningkatan massa jenis biji kopi. Dengan demikian, biji kopi berwarna coklat dan tampak menyusut merupakan indikator bahwa proses biokimia fermentasi berjalan optimal dalam meningkatkan mutu fisik dan kepadatan biji kopi arabika.

4.3.4 Pengaruh Medan Pengaruh Medan Elektromagnetik ELF terhadap Kadar Kafein pada Biji Kopi Arabika

Data hasil penelitian mengidentifikasi bahwa paparan medan EM-ELF mempengaruhi konsentrasi kafein pada kopi arabika *green beans*. Hal tersebut dibuktikan dengan kadar kafein pada kelompok kontrol lebih tinggi daripada kelompok paparan. Berdasarkan data pengujian, kelompok kontrol negatif (-) memiliki kandungan kafein tertinggi yakni sebesar 0,0329%. Sebaliknya, tingkat kafein terendah ditemukan pada perlakuan 300 μ T selama 30 menit (0,0234%). Namun, kadar kafein pada paparan medan 300 μ T/30 menit menunjukkan kemiripan dengan kontrol positif (+) yang di fermentasi tanpa paparan medan magnet. Sedangkan kelompok paparan medan EM-ELF yang lain justru memiliki kadar kafein yang tinggi dibandingkan dengan kelompok kontrol positif (+).

Perbedaan kadar kafein tersebut diduga disebabkan adanya pengaruh medan EM-ELF meskipun menunjukkan pola yang tidak linier, melainkan dipengaruhi oleh intensitas, lama paparan, hingga kondisi sel mikroba selama fermentasi. Hal ini sejalan dengan penurunan kadar kafein pada kelompok paparan 300 μ T selama 30 menit yang merupakan paparan dengan intensitas dan waktu yang optimal untuk meningkatkan aktivitas mikroorganisme dalam degradasi kafein. Hal tersebut disebabkan karena mikroorganisme yang berperan seperti bakteri asam laktat dan khamir menggunakan kafein sebagai substrat nitrogen (N) dan Karbon (C) esensial selama fermentasi melalui jalur N-demetilasi oksidatif (Ran *et al.*, 2025). Berdasarkan struktur kimia dari kafein ($C_8H_{10}N_4O_2$), kandungan nitrogen yang tinggi diperlukan oleh mikroba dalam mendukung pertumbuhan sel. Aktivitas enzim tersebut, mikroba mengambil unsur nitrogen dalam ikatan metil pada kafein, sehingga kadar kafein pada biji kopi menurun. Sementara itu, pada intensitas yang tinggi serta durasi paparan yang lebih lama, paparan medan EM-ELF menyebabkan mikroba mengalami stress oksidatif yang mengganggu kestabilan dari enzim serta efektivitas mikroorganisme fermentasi menurun. Akibatnya, kemampuan untuk degradasi kafein menjadi berkurang, yang menyebabkan kelompok intensitas 300 μ T durasi 60 menit, 500 μ T (30 menit dan 60 menit) memiliki kadar kafein lebih tinggi. Hal tersebut sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Bayır *et al.*

(2015) bahwa paparan medan EM-ELF pada intensitas 4 mT dengan waktu paparan yang lama menghambat pembentukan *S. aureus* dan *E. Coli*.

Secara umum, dalam proses fermentasi terjadi proses mikrobiologis yang melibatkan aktivitas mikroorganisme seperti bakteri, jamur filamen, dan ragi (de Melo Pereira *et al.*, 2016). Mikroorganisme yang terlibat dapat memecahkan senyawa organik, menyebabkan struktur kimia dan membantu degradasi kafein selama fermentasi. Chadijah *et al.* (2026) melakukan penelitian tentang fermentasi kopi arabika yang menggunakan starter *Lactobacillus fermentum* menunjukkan adanya penurunan kadar kafein akibat dari metabolisme mikroba selama fermentasi. Akibat dari transportasi ion yang optimal, proses proliferasi dari mikroba seperti ragi (*S. cerevisiae*) dan bakteri asam laktat (BAL) akan lebih aktif dalam mendegradasi kafein (Ran *et al.*, 2025). Dengan demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa medan EM-ELF berpotensi membantu proses dekafeinasi kopi melalui fermentasi, dengan mengoptimalkan peningkatan mikroorganisme yang digunakan. Namun, juga bergantung pada kombinasi intensitas dan lama paparan yang optimum. Pada penelitian ini kelompok paparan 300 μ T selama 30 menit merupakan kondisi paling efektif dalam menurunkan kandungan kafein pada biji kopi arabika.

Berdasarkan berbagai penelitian, terdapat hubungan antara nilai pH, massa jenis, dan kadar kafein pada biji kopi fermentasi. Namun, hubungan antara ketiganya bersifat tidak langsung, melainkan berdasarkan pada aktivitas metabolisme dari mikroorganisme selama fermentasi. Pada proses fermentasi, mikroorganisme menghasilkan asam organik yang dapat menurunkan pH. Di saat yang bersamaan, mikroorganisme juga mendegradasi kafein dengan jalur N-demethylation, sehingga kadar kafein dapat menurun (Ran *et al.*, 2025). Fermentasi mengakibatkan terjadinya degradasi pada lapisan mucilage dan komponen dinding sel, sehingga struktur biji menjadi lebih berpori. Perubahan tersebut menyebabkan massa jenis biji kopi mengalami perubahan (Bressani *et al.*, 2018).

Kekurangan dalam penelitian ini adalah keterbatasan dari alat pengering menjadi faktor yang penting. Sampel yang diletakkan pada tatakan oven cenderung lebih lama untuk mengering, sehingga mengakibatkan adanya jamur pada sebagian

sampel. Kesalahan lain yaitu penelitian tidak menggunakan media pendukung sebagai substrat untuk mikroorganisme fermentasi, yang mengakibatkan proses fermentasi berlangsung lebih singkat. Oleh karena itu, dibutuhkan alat pengering yang memiliki kemampuan pengeringan yang lebih stabil dan melakukan proses fermentasi dengan media pendukung lainnya, seperti yogurt, agar proses fermentasi berlangsung lebih lama.



BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

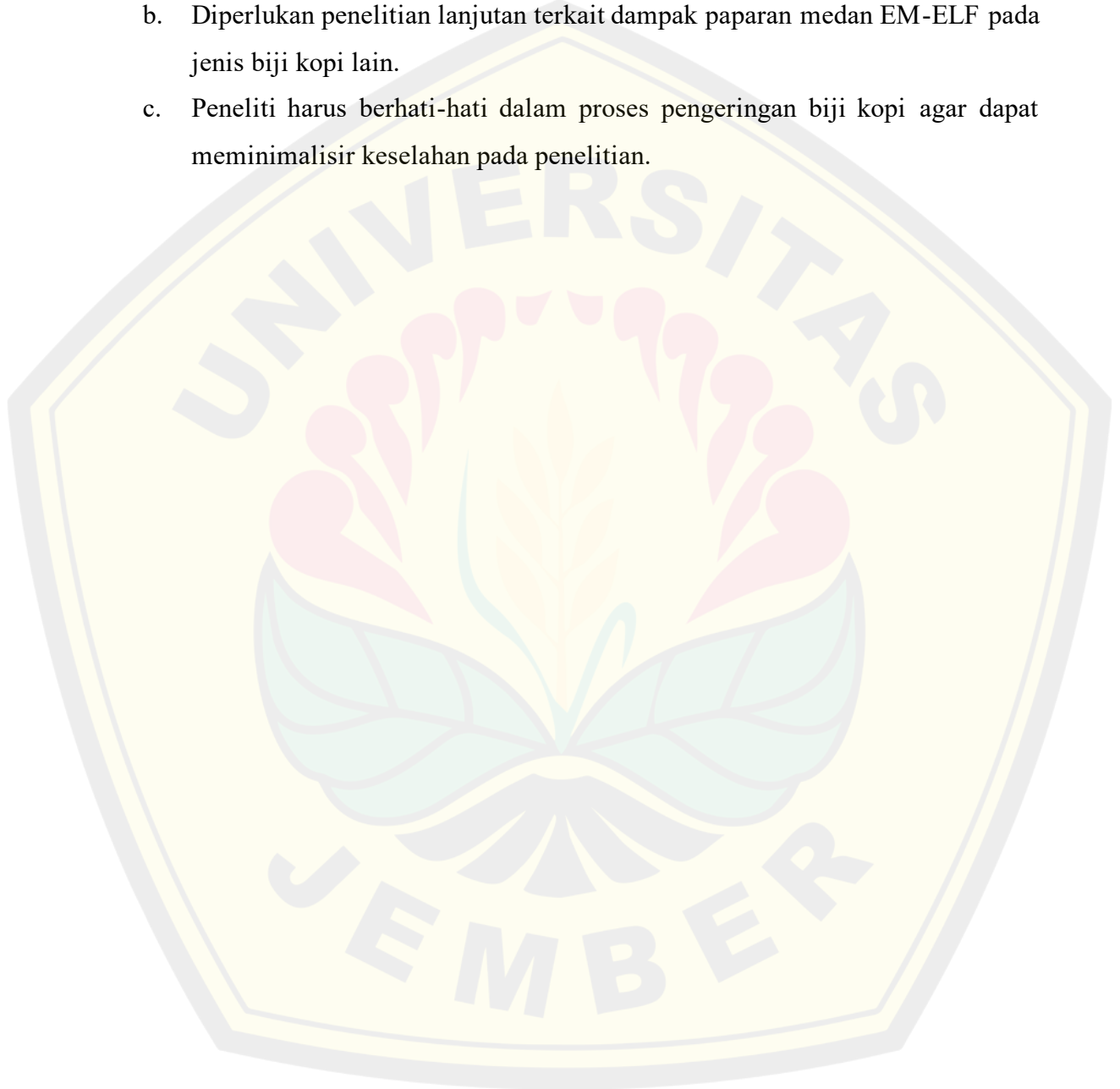
Berdasarkan rangkaian penelitian yang telah dilaksanakan, dapat dirumuskan beberapa simpulan yakni sebagai berikut:

- a. Paparan medan EM-ELF berpengaruh signifikan terhadap nilai pH selama proses fermentasi biji kopi arabika. Perlakuan dengan intensitas 300 μT selama 30 menit paling efektif dalam menjaga kestabilan (menghasilkan nilai pH tertinggi) pada akhir pengamatan (jam ke-20). Sebaliknya, intensitas 500 μT selama 60 menit memicu penurunan pH paling tajam dibandingkan kelompok perlakuan lainnya.
- b. Paparan medan EM-ELF berpengaruh secara signifikan terhadap profil pH biji kopi arabika. Kelompok paparan 300 μT selama 60 menit menghasilkan pH paling tinggi dibandingkan dengan seluruh kelompok paparan. Peningkatan intensitas cenderung mengakibatkan penurunan nilai pH pada biji kopi tersebut.
- c. Paparan medan EM-ELF berpengaruh signifikan terhadap peningkatan massa jenis biji kopi arabika pasca fermentasi. Seluruh kelompok paparan menghasilkan biji kopi dengan massa jenis yang lebih padat dibandingkan kontrol negatif. Massa jenis tertinggi secara berurutan diperoleh pada perlakuan intensitas 500 μT selama 60 menit.
- d. Paparan medan EM-ELF berpengaruh nyata terhadap perubahan kadar kafein biji kopi arabika (green beans) pasca fermentasi. Perlakuan intensitas 300 μT selama 30 menit merupakan kondisi paling optimal untuk menurunkan kadar kafein. Namun, kombinasi peningkatan intensitas yang lebih tinggi (500 μT) dan durasi yang lebih lama (60 menit) justru menyebabkan kadar kafein meningkat melampaui kelompok kontrol positif.

5.2 Saran

Mengacu pada hasil studi yang telah diperoleh, berikut beberapa usulan yang diajukan untuk penelitian selanjutnya:

- a. Diperlukan adanya penelitian lanjutan mengenai media fermentasi yang lain pada proses fermentasi biji kopi arabika dengan paparan medan EM-ELF.
- b. Diperlukan penelitian lanjutan terkait dampak paparan medan EM-ELF pada jenis biji kopi lain.
- c. Peneliti harus berhati-hati dalam proses pengeringan biji kopi agar dapat meminimalisir kesalahan pada penelitian.



DAFTAR PUSTAKA

- Adithia, S., & Jaya, M. P. P. (2021). Strategi pemasaran digital produk minuman kopi di masa pandemi. *Journal of Research on Business and Tourism*, 1(1), 37-46. <https://doi.org/10.37535/104001120213>
- Afriliana, A. (2018). *Teknologi pengolahan kopi terkini*. Deepublish.
- Agustine, P., Damayanti, R. P., & Putri, N. A. (2021). Karakteristik ekstrak kafein pada beberapa varietas kopi di Indonesia. *JITIPARI (Jurnal Ilmiah Teknologi dan Industri Pangan UNISRI)*, 6(1), 78-89. <https://doi.org/10.33061/jitipari.v6i1.5014>
- Anam, K., Sirappa, M. P., Meilin, A., Marda, A. B., Irawan, N. C., Handayani, H. T., & Masrika, N. U. E. (2023). *Budidaya tanaman kopi dan olahannya untuk kesehatan*. Tohar Media.
- Anam, M. A. K. (2020). *Pengaruh Paparan Medan Magnet Extremely Low Frequency (ELF) Terhadap Peningkatan pH dan Daya Hantar Listrik dalam Proses Fermentasi Green Coffee Robusta* [Skripsi, Universitas Jember]. Digital Repository Universitas Jember.
- Anisa, & Hamidy, S. A. (2025). Kesehatan mental mahasiswa: Studi tentang overdosis kopi dan faktor-faktor yang mempengaruhi tingkat depresi. *Edusola : Journal Education, Sociology and Law*, 1(1), 47-61.
- Astutik, N. M., Sudarti, S., & Lesmono, A. D. (2022). The effect of intensity and long exposure to extremely low frequency (elf) magnetic field on density of silk tofu. *JPF (Jurnal Pendidikan Fisika) Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar*, 10(2), 124-129.
- Azizah, M. N., Sudarti, S., & Bektiarso, S. (2022). Pengaruh paparan medan magnet extremely low frequency (ELF) 200 μ T dan 300 μ T terhadap pH dalam proses fermentasi tempe. *Orbita*, 8(1), 28-34. <https://doi.org/10.31764/orbita.v8i1.8182>
- Bayır, E., Bilgi, E., Şendemir-Ürkmez, A., & Hameş-Kocabaş, E. E. (2015). The effects of different intensities, frequencies and exposure times of extremely low-frequency electromagnetic fields on the growth of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* O157: H7. *Electromagnetic biology and medicine*, 34(1), 14-18. <https://doi.org/10.3109/15368378.2013.853671>
- Badan Pusat Statistik. (2024). *Statistik Kopi Indonesia 2023 (Indonesia Coffee Statistics 2023)* (Publikasi No. 05100.24022).

- Bastian, F., Sinaga, H. L. R., Syarifuddin, A., & Hambali, A. (2024). Peningkatan cita rasa kopi robusta terdekafeinasi melalui fermentasi ulang menggunakan mucilage tiruan. *Agrointek: Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 18(3), 593-604. <https://doi.org/10.21107/agrointek.v18i3.18556>
- Beretta, G., Mastorgio, A.F., Pedrali, L. *et al.* (2019). The effects of electric, magnetic and electromagnetic fields on microorganisms in the perspective of bioremediation. *Rev Environ Sci Biotechnol* 18, 29–75. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-09491-9>
- Blank, M., & Findl, E. (Eds.). (1987). *Mechanistic approaches to interactions of electric and electromagnetic fields with living systems*. Plenum Press.
- Bressani, A. P. P., Martinez, S. J., Evangelista, S. R., Dias, D. R., & Schwan, R. F. (2018). Characteristics of fermented coffee inoculated with yeast starter cultures using different inoculation methods. *LWT - Food Science and Technology*, 92, 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.02.029>
- Chadijah St., Fatimah, F., & Darmawan, D. (2026). Efektivitas *Lactobacillus fermentum* pada Fermentasi Kopi Arabika (*Coffea arabica*) dengan Media Rongga Batang Bambu Terhadap Kadar Kafein dan Antioksidan. *Perbal: Jurnal Pertanian Berkelanjutan*, 14(1), 166-174. <https://doi.org/10.30605/perbal.v14i1.8096>
- Faridawati, D., Maulida, R. Y., & Sudarti. (2023). Potensi medan magnet extremely low frequency (ELF) untuk meningkatkan kualitas fermentasi. *Eduproxima: Jurnal Ilmiah Pendidikan IPA*, 5(2), 199–204. <https://doi.org/10.29100/v5i2.4208>
- Fauzia, V. (2025). *Nanomaterial: Teori dasar dan aplikasi*. Penerbit Duta.
- Fatima, I., Ahmad, L., & Liputo, S. A. (2024). Pengaruh Lama Fermentasi Dan Konsentrasi *Saccharomyces cerevisiae* Terhadap Karakteristik Kimia Dan Mikrobiologi Kopi Wine Robusta Di UMKM Oishi. *Journal Of Agritech Science (JASc)*, 8(1), 25-37. <https://doi.org/10.30869/jasc.v8i1.1311>
- Firdausi, Z. E., Sudarti, & Yushardi. (2023). Pengaruh paparan medan magnet extremely low frequency (ELF) dalam proses fermentasi tapai. *Jurnal Teknologi Pendidikan Dan Pembelajaran (JTTP)*, 1(1), 211–216.
- Griffiths, D. J. (2013). *Introduction to electrodynamics* (4th ed.). Pearson.
- Hidayat, M. S. (2024). *Fermentasi kopi arabika (Coffea arabica L.) dengan penambahan bakteri asam laktat dan bakteri asam asetat* [Proposal penelitian, Universitas Mataram].

Hernández-Alcántara, G., Alarcón-Gutiérrez, E., Ronzón-Soto, S., García-Pérez, J. A., Filete, C. A., Guarçoni, R. C., Oliveira, E. C. D. S., & Pereira, L. L. (2026). Impact of fermentation duration and processing techniques on the multidimensional quality of *Coffea arabica* beans. *Journal of Food Composition and Analysis*, 153, 109102. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2026.109102>

International Agency for Research on Cancer. (2002). *Non-ionizing radiation, Part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields*. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, No. 80. IARC Press.

Kanza, N. R. F. (2021). *Pengaruh paparan medan magnet extremely low frequency (elf) terhadap pH dan daya hantar listrik pada proses fermentasi basah Kopi Liberika (Coffea liberica) dengan penambahan α -amilase* [Skripsi, Universitas Jember]. Digital Repository Universitas Jember.

Kanza, N. R. F., Sudarti, & Maryani. (2020). Pengaruh paparan medan magnet extremely low frequency (ELF) terhadap pH dan daya hantar listrik pada proses fermentasi basah kopi liberika (*Coffea liberica*) dengan penambahan α -amilase. *ORBITA: Jurnal Hasil Kajian, Inovasi, dan Aplikasi Pendidikan Fisika*, 6(2), 315–321. <https://doi.org/10.31764/orbita.v6i2.3294>

Komaria, N., Suratno, S., Sudarti, S., & Dafik, D. (2023). Optimization of the fermentation process through ELF magnetic field radiation and its effect on Cascara Caffeine. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 21(4), 885–892. <https://doi.org/10.22124/CJES.2023.7146>

Liboff, A. R., Smith, S. D., & McLeod, B. R. (1987). Experimental evidence for ion cyclotron resonance mediation of membrane transport. In *Mechanistic approaches to interactions of electric and electromagnetic fields with living systems*. Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1968-7_7

Liboff, A. R. (1985). Geomagnetic cyclotron resonance in living cells. *Journal of Biological Physics*, 13(4), 99-102. <https://doi.org/10.1007/BF01878387>

Mannaa, M., Han, G., Seo, Y. S., & Park, I. (2021). Evolution of food fermentation processes and the use of multi-omics in deciphering the roles of the microbiota. *Foods*, 10(11), 2861. <https://doi.org/10.3390/foods10112861>

Marcella, R., & Mulyanti, D. (2022). Aspek bioteknologi dan kehalalan kopi luwak serta korelasi manfaatnya untuk kesehatan. *Jurnal Riset Farmasi*, 2(1), 66–74. <https://doi.org/10.29313/jrf.v2i1.849>

- Martinez, S. J., Bressani, A. P. P., Simão, J. B. P., Pylro, V. S., Dias, D. R., & Schwan, R. F. (2022). Dominant microbial communities and biochemical profile of pulped natural fermented coffees growing in different altitudes. *Food Research International*, 159, 111605. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111605>
- Masita, A. A., Fitria, R., Nisabela, S. N., Prabandari, A. M., & Meilina, I. L. (2023). The impact of low-frequency magnetic field on ketan tape maturation: ph, density, and taste. *Jurnal Ilmiah Ilmu Terapan Universitas Jambi*, 7(2), 159-165. <https://doi.org/10.22437/jiituj.v7i2.30061>
- Martauli, E. D. (2018). Analysis of coffee production in Indonesia. *JASc (Journal of Agribusiness Sciences)*, 1(2), 112-120. <https://doi.org/10.30596/jasc.v1i2.1962>
- Nur, S. U. K., Sudarti, & Subiki. (2022). Pengaruh paparan medan magnet extremely low frequency (ELF) terhadap derajat keasaman (pH) buah tomat. *ORBITA: Jurnal Hasil Kajian, Inovasi, Dan Aplikasi Pendidikan Fisika*, 8(1), 73–77. <https://doi.org/10.31764/orbita.v8i1.8395>
- Nurcholis, M., Maligan, J. M., Sunarharum, W. B., Mahatmanto, T., Mulyadi, A. F., & Sriherfyna, F. H. (2025). *Fermentasi Kopi: Dinamika Perubahan Karakteristik Selama Proses*. Media Nusa Creative (MNC Publishing).
- De Bruyn, F., Zhang, S. J., Pothakos, V., Torres, J., Lambot, C., Moroni, A. V., Callanan, M., Sybesma, W., Weckx, S., & De Vuyst, L. (2016). Exploring the Impacts of Postharvest Processing on the Microbiota and Metabolite Profiles during Green Coffee Bean Production. *Applied and environmental microbiology*, 83(1), e02398-16. <https://doi.org/10.1128/AEM.02398-16>
- de Melo Pereira, G. V., Soccol, V. T., & Soccol, C. R. (2016). Current state of research on cocoa and coffee fermentations. *Current Opinion in Food Science*, 7, 50-57. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2015.11.001>
- Purbawati, M., Sudarti, S., & AA, F. K. (2021). Pengaruh paparan medan magnet extremely low frequency (elf) terhadap perubahan ph pada proses fermentasi biji kopi lanang (Peaberry) kering. *Jurnal Kumparan Fisika*, 4(2), 129-136. <https://doi.org/10.33369/jkf.4.2.129-136>
- Ran, L. X., Wei, X. Y., Ren, E. F., Qin, J. F., Rasheed, U., & Chen, G. L. (2025). Application of microbial fermentation in caffeine degradation and flavor modulation of coffee beans. *Foods*, 14(15), 2606. <https://doi.org/10.3390/foods14152606>
- Razali, N. M., & Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. *Journal of statistical modeling and analytics*, 2(1), 21-33.

- Rosalinda, S., Febriananda, T., & Nurjanah, S. (2021). Penggunaan berbagai konsentrasi kulit buah pepaya dalam penurunan kadar kafein pada Kopi. *Jurnal Teknotan*, 15(1), 27. <https://doi.org/10.24198/jt.vol15n1.5>
- Rosyidah, A. (2017). *Pengaruh medan magnet ELF (extremely low frequency) pada proses pertumbuhan jamur tiram (Pleurotus ostreatus)* [Skripsi, Universitas Jember]. Digital Repository Universitas Jember.
- Sadidah, K. R., Sudarti, & Gani, A. A. (2015). Pengaruh paparan medan magnet ELF (Extremely Low Frequency) 300 μ T dan 500 μ T terhadap perubahan jumlah mikroba dan pH pada proses fermentasi tapai ketan. *Jurnal Pendidikan Fisika*, 4(1), 1–8.
- Saputra, A. P. A., Baco, A. R., & Asyik, N. (2020). Fermentasi ragi tapai (*Saccharomyces cereviceae*), terhadap sifat fisik, kimia dan organoleptik produk kopi bubuk robusta (*Coffea coneophora*). *J. Sains dan Teknologi Pangan*, 5(6), 3412–3423.
- Saripah, Aini, A. F., Manfaati, R., & Hariyadi, T. (2021). Pengaruh suhu lingkungan dan waktu fermentasi biji kopi arabika terhadap kadar kafein, etanol, dan pH. In *Prosiding The 12th Industrial Research Workshop and National Seminar* (Vol.12, pp. 124–128).
- Sa'diyah, H., Fitria, N., Yusiana, S., Arista, R., Kelvin, M., Prihandono, T., & Mahmudi, K. (2024). Pengaruh radiasi extremely low frequency (ELF) terhadap pertumbuhan tanaman. *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi Dan Teknologi*, 10(1), 173–179. <https://doi.org/10.35308/jmkn.v10i1.8648>
- Siregar, Z. A., Suthamihardja, R. T. M., & Susanty, D. (2020). Karakterisasi kopi arabika (*Coffea arabica* L.) hasil fermentasi dengan bakteri asam laktat (*Lactobacillus* sp.). *Jurnal Sains Natural Universitas Nusa Bangsa*, 10(2), 87-94. <https://doi.org/10.31938/jsn.v10i2.285>
- Sudarti, S., Bektiarso, S., Prastowo, S. H. B., Prihandono, T., Maryani, M., & Handayani, R. D. (2020). Optimizing *Lactobacillus* growth in the fermentation process of artificial civet coffee using extremely-low frequency (ELF) magnetic field. *Journal of Physics: Conference Series*, 1465(1), 012010. Doi: 10.1088/1742-6596/1465/1/012010
- Sudarti, S., Hariyati, Y., Sari, A. B. T., Sumardi, S., & Muldayani, W. (2022). Fermentation process of dry cocoa beans through extremely low frequency (ELF) magnetic field exposure. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 8(2), 584–591. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v8i2.1356>

- Sugiyono. (2019). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D* (2nd ed.). Alfabeta Bandung.
- Sulistyaningtyas, A. R. (2017, October). Pentingnya pengolahan basah (wet processing) buah kopi robusta (*coffea robusta* Lindl. ex. de. Will) untuk menurunkan resiko kecacatan biji hijau saat coffee grading. In *prosiding seminar nasional & internasional* (Vol. 1, pp. 90-94).
- Swiranata, I. W., Mangku, I. G. P., & Rudianta, I. N. (2020). Pengaruh metode fermentasi dan pengeringan terhadap mutu biji kopi arabika (*Coffea arabica* L.). *Gema Agro*, 25(2), 150-158. <https://doi.org/10.22225/.25.2.2615.150-158>
- Tarigan, E. B., Iflah, T., & Purwanto, E. H. (2020). Pengaruh starter dan lama fermentasi terhadap kandungan kimia dan citarasa kopi arabika Gunung Putri. In *Prosiding Seminar Nasional Online* (pp. 184–192).
- Tarigan, E. B., & Iflah, T. (2017). Beberapa komponen fisikokimia kakao fermentasi dan non fermentasi. *Jurnal Agroindustri Halal*, 3(1), 48–62.
- Utami, R. D. S., Aminingrum, A., El Firdausi, Z., Sudarti, S., & Anggraeni, F. K. A. (2024). Analisis potensi pemanfaatan radiasi electromagnetic extremely low frequency untuk meningkatkan ketahanan ikan. *Jurnal Informasi, Sains dan Teknologi*, 7(1), 226-238. <https://doi.org/10.55606/isaintek.v7i1.217>
- Vaz, C.J.T., de Menezes, L.S., de Santana, R.C. *et al.* (2023). Effect of fermentation on the physicochemical characteristics and sensory quality of Arabica coffee. *3 Biotech* **13**, 403. <https://doi.org/10.1007/s13205-023-03768-9>
- World Health Organization. (2007). *Extremely low frequency fields* (Environmental Health Criteria 238).

LAMPIRAN

- Lampiran 1. Matriks Penelitian
- Lampiran 2. Prosedur Penelitian
- Lampiran 3. Pengumpulan Data Penelitian
- Lampiran 4. Surat Izin Penelitian
- Lampiran 5. Pelaksanaan Penelitian
- Lampiran 6. Data Hasil Penelitian
- Lampiran 7. Hasil Uji Statistik

