

**PENGARUH KONSENTRASI OZON TERHADAP
KARAKTERISTIK FISIK DAN KIMIA GABAH BERAS
HITAM VARIETAS JELITENG**

TUGAS AKHIR

**Karya tulis sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik dari
Universitas Pasundan**

Oleh:
Nazwa Amelia Cahyani
223020095



**PROGRAM STUDI TEKNOLOGI PANGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS PASUNDAN
BANDUNG
2026**

ABSTRAK

PENGARUH KONSENTRASI OZON TERHADAP KARAKTERISTIK FISIK DAN KIMIA GABAH BERAS HITAM VARIETAS JELITENG

Oleh
Nazwa Amelia Cahyani
223020095
(Program Studi Teknologi Pangan)

Beras hitam (*Oryza sativa L. indica*) memiliki kandungan antosianin tinggi yang bersifat sensitif terhadap panas, sehingga diperlukan teknologi pascapanen alternatif seperti ozon. Namun penelitian mengenai pengaruh konsentrasi ozon pada gabah beras hitam masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisik dan kimia gabah beras hitam varietas Jeliteng.

Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Kelompok (RAK) dengan faktor tunggal 5 taraf konsentrasi ozon yaitu 0, 2, 4, 6, dan 8 ppm dengan durasi paparan 30 menit pada gabah dan 3 kali pengulangan, sehingga didapatkan 15 satuan percobaan. Respon penelitian terdiri dari respon kimia meliputi kadar air, kadar pati, kadar antosianin, aktivitas air (aw), dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), serta respon fisik meliputi *X-Ray Diffractometer* (XRD), *Scanning Electron Microscope* (SEM), dan *Rapid Visco Analyzer* (RVA).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi ozon berpengaruh nyata terhadap kadar pati dan kadar antosianin, dan RVA gabah beras hitam, namun tidak berpengaruh nyata terhadap kadar air dan aktivitas air (aw). Hasil XRD, SEM, dan FTIR menunjukkan perubahan yang konsisten dengan mekanisme oksidasi ozon pada seluruh konsentrasi, meskipun ketiga analisis ini bersifat deskriptif karena diinterpretasikan berdasarkan pola perubahan yang teramati pada tiap konsentrasi, bukan melalui uji hipotesis statistik seperti pada parameter lainnya.

Kata kunci: Ozon, Gabah Beras Hitam, Karakteristik Fisik, Karakteristik Kimia

ABSTRACT

THE EFFECT OF OZONE CONCENTRATION ON THE PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF JELITENG VARIETY BLACK ROUGH RICE

By

Nazwa Amelia Cahyani

223020095

(Department of Food Technology)

Black rice (*Oryza sativa L. indica*) has a high anthocyanin content that is sensitive to heat, so an alternative postharvest technology such as ozone is needed. Research on the effect of ozone concentration on black rough rice, however, remains limited. This study aims to determine the effect of ozone concentration on the physical and chemical characteristics of Jeliteng variety black rough rice.

This study used a Randomized Block Design (RBD) with a single factor of 5 levels of ozone concentration, namely 0, 2, 4, 6, and 8 ppm, with an exposure duration of 30 minutes on rough rice and 3 repetitions, resulting in 15 experimental units. The responses consisted of chemical responses, including moisture content, starch content, anthocyanin content, water activity (aw), and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), as well as physical responses, including X-Ray Diffractometer (XRD), Scanning Electron Microscope (SEM), and Rapid Visco Analyzer (RVA).

The results showed that ozone concentration significantly affected starch content, anthocyanin content, and RVA of black rough rice, but did not significantly affect moisture content and water activity (Aw). XRD, SEM, and FTIR results showed changes consistent with the ozone oxidation mechanism across all concentrations, although these three analyses were descriptive in nature, as they were interpreted based on the pattern of change observed at each concentration rather than through formal statistical hypothesis testing as used for the other parameters.

Keywords: Ozone, Black Rough Rice, Physical Characteristics, Chemical Characteristics

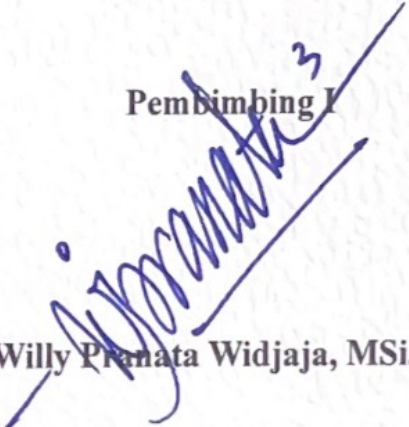
**PENGARUH KONSENTRASI OZON TERHADAP
KARAKTERISTIK FISIK DAN KIMIA GABAH BERAS
HITAM VARIETAS JELITENG**

Oleh:
Nazwa Amelia Cahyani
223020095

Fakultas Teknik
Universitas Pasundan

Menyetujui
Tim pembimbing

Pembimbing I


(Ir. Willy Pranata Widjaja, MSi., Ph.D)

Pembimbing II


(Dr. Hari Hariadi, S.TP., M.T.)

**PENGARUH KONSENTRASI OZON TERHADAP
KARAKTERISTIK FISIK DAN KIMIA GABAH BERAS
HITAM VARIETAS JELITENG**

Oleh:
Nazwa Amelia Cahyani
223020095

Fakultas Teknik
Universitas Pasundan

Menyetujui

**Koordinator Pembelajaran dan Kemahasiswaan
Program Studi Teknologi Pangan Fakultas Teknik
Universitas Pasundan**



(Rizal Maulana Ghaffar, S.T., M.T.)

PEDOMAN PENGGUNAAN TUGAS AKHIR

Tugas akhir yang tidak dipublikasikan terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Fakultas dan Universitas, dan terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada penulis dengan mengikuti aturan HaKI yang berlaku di Universitas Pasundan. Referensi kepustakaan diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau peringkasan hanya dapat dilakukan seizin penulis dan harus disertai dengan kaidah ilmiah untuk menyebutkan sumbernya.

Sitasi hasil penelitian Tugas Akhir ini dapat di tulis dalam bahasa Indonesia sebagai berikut:

Cahyani, N.A. (2026). Pengaruh Konsentrasi Ozon Terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Gabah Beras Hitam, Tugas Akhir Program Sarjana, Universitas Pasundan.

Dan dalam bahasa inggris sebagai berikut:

Cahyani, N.A. (2026). *The Effect Of Ozone Concentration On Physical and Chemical Characteristics Of Black Rough Rice*, Bachelor's Thesis, Universitas Pasundan.

Memperbanyak atau menerbitkan sebagian atau seluruh tugas akhir haruslah seizin Dekan Fakultas Teknik Universitas Pasundan.

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu Wata'ala, karena atas berkat dan rahmat-Nya penulis diberikan kesehatan, kemampuan, serta kelancaran sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **”PENGARUH KONSENTRASI OZON TERHADAP KARAKTERISTIK FISIK DAN KIMIA GABAH BERAS HITAM”**.

Penulis menyadari bahwa penyusunan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ir. Willy Pranata Widjaja, M.Si., Ph.D. dosen pembimbing utama yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta ilmu yang bermanfaat kepada penulis selama proses penyusunan laporan tugas akhir.
2. Dr. Hari Hariadi, S.TP., M.T. dosen pembimbing pendamping yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta ilmu yang bermanfaat kepada penulis selama proses penyusunan laporan tugas akhir.
3. Dr. Ir. Dede Zainal Arief, M.Sc. dosen penguji Tugas Akhir Program Studi Teknologi Pangan Universitas Pasundan, atas saran dan masukan yang telah diberikan kepada penulis.
4. Jaka Rukmana, S.T., M.T. Ketua Program Studi Teknologi Pangan dan Dr. Ira Endah Rohima, S.T., M.Si. Sekretaris Program Studi Teknologi Pangan Fakultas Teknik Universitas Pasundan Bandung.
5. Rizal Maulana Ghaffar, S.T., M.T. Koordinator Kerja Praktik dan Tugas Akhir Program Studi Teknologi Pangan Fakultas Teknik Universitas Pasundan Bandung.

6. Keluarga tercinta, yaitu kedua orang tua dan saudara kandung penulis yang senantiasa memberikan doa, dukungan, serta motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan ini dengan baik.
7. Leonardus Calvin Wicaksana yang senantiasa memberikan dukungan, perhatian, dan semangat kepada penulis dalam setiap proses penyusunan, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan baik.
8. Indah Wulandari, Revalina Putri Khaerunissa, Bella Indah Crisfana, dan Nazwa Ismi Nasyita yang telah menjadi bagian dari perjalanan penulis selama masa perkuliahan serta selalu memberikan dukungan, semangat, dan motivasi hingga penulis dapat menyelesaikan laporan ini.
9. Teman-teman penelitian tugas akhir beras yaitu Nazmi Ghita Fauziah, Zahra Putri Alviena, Riafany Agustin, Ismail Ahmad Danial, dan Hani Uswatun Hasanah serta teh Elvia dan teh Widia yang telah memberikan dukungan, bantuan, serta motivasi kepada penulis.
10. Teman-teman penulis, Miftakhul Laili, Vioni Aisyah, Alima Aliya, Yasmin Nabilah, Salsabilla Heydi, Aqila Azzahra, dan Meidintha Ivana yang selalu memberikan dukungan kepada penulis.
11. Orang-orang terdekat penulis yang selalu memberikan bantuan dan dukungan sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan ini.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi perbaikan di masa yang akan datang. Akhir kata, penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat serta menambah wawasan bagi para pembaca.

Bandung, Juli 2026

Nazwa Amelia Cahyani

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
<i>ABSTRACT</i>	ii
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	5
1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Kerangka Pemikiran	6
1.6 Hipotesis Penelitian	13
1.7 Waktu dan Tempat Penelitian	13
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	14
2.1 Beras Hitam	14
2.1.1 Varietas Beras Hitam Jeliteng	14
2.1.2 Taksonomi dan Kandungan Gizi Beras Hitam	15
2.2 Gabah	17
2.2.1 Struktur Anatomi Gabah	18
2.2.2 Klasifikasi Mutu Gabah	19
2.3 Ozon	20
2.3.1 Sifat dan Karakteristik Ozon	21
2.3.2 Pembentukan Ozon	21
2.3.3 Mekanisme Oksidasi Ozon	22

2.3.4 Keunggulan Ozon	23
2.3.5 Aplikasi Ozon dalam Pangan	23
2.3.6 Perbandingan dengan Metode Konvensional	24
2.3.7 Keamanan dan Efektifitas Ozon	25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	27
3.1 Bahan dan Alat Penelitian	27
3.1.1 Bahan Penelitian	27
3.1.2 Alat Penelitian.....	27
3.2 Metode Penelitian.....	27
3.2.1 Penelitian Utama.....	27
3.3 Prosedur Penelitian.....	31
3.3.1 Prosedur Perlakuan Ozonisasi pada Gabah Beras Hitam	31
3.4 Jadwal Pelaksanaan Penelitian	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	36
4.1 Hasil Penelitian Utama	36
4.1.1 Respon Fisik	36
4.1.2 Respon Kimia	61
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	86
5.1 Kesimpulan.....	86
5.2 Saran	86
DAFTAR PUSTAKA	87
LAMPIRAN.....	98

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Konsentrasi Ozon	28
Tabel 2.	Matriks Rancangan Percobaan	29
Tabel 3.	Denah (<i>Lay Out</i>) Kelompok Ulangan.....	29
Tabel 4.	Analisis Variansi Rancangan Acak Kelompok (RAK)	30
Tabel 5.	Rencana Jadwal Penelitian	35
Tabel 6.	Hasil Data XRD Gabah Beras Hitam	37
Tabel 7.	Hasil Analisis <i>Scanning Electron Microscope</i> pada 0 ppm.....	42
Tabel 8.	Hasil Analisis <i>Scanning Electron Microscope</i> pada 2 ppm.....	44
Tabel 9.	Hasil Analisis <i>Scanning Electron Microscope</i> pada 4 ppm.....	46
Tabel 10.	Hasil Analisis <i>Scanning Electron Microscope</i> pada 6 ppm.....	48
Tabel 11.	Hasil Analisis <i>Scanning Electron Microscope</i> pada 8 ppm.....	50
Tabel 12.	Hasil Data Analisis Rapid Visco Analyzer (RVA)	54
Tabel 13.	Hasil Analisis Kadar Air	62
Tabel 14.	Hasil Analisis Kadar Pati.....	64
Tabel 15.	Hasil Analisis Kadar Antosianin.....	72
Tabel 16.	Hasil Analisis Aktivitas Air (<i>Aw</i>)	77
Tabel 17.	Hasil Data FTIR pada Gabah Beras Hitam	81
Tabel 18.	Perhitungan Kebutuhan Sampel Gabah Beras Hitam.....	108
Tabel 19.	Perhitungan Kebutuhan Bahan Baku.....	108
Tabel 20.	Rincian Biaya Analisis Penelitian	109
Tabel 21.	Hasil Analisis Kadar Air Gabah Beras Hitam	110
Tabel 22.	ANAVA Kadar Air Gabah Beras Hitam	111
Tabel 23.	Hasil Analisis Kadar Pati Gabah Beras Hitam	112
Tabel 24.	ANAVA Kadar Pati Gabah Beras Hitam	113
Tabel 25.	Uji Lanjut Duncan Analisis Kadar Pati Gabah Beras Hitam.....	113
Tabel 26.	Hasil Analisis Kadar Antosianin Gabah Beras Hitam	115
Tabel 27.	ANAVA Kadar Antosianin Gabah Beras Hitam	116

Tabel 28.	Uji Lanjut Duncan Analisis Kadar Antosianin Gabah Beras Hitam	116
Tabel 29.	Hasil Analisis Aktivitas Air Gabah Beras Hitam.....	118
Tabel 30.	ANAVA Aktivitas Air Gabah Beras Hitam.....	119
Tabel 31.	Hasil Analisis Profil Gelatinisasi pada Data <i>Peak Viscosity</i>	120
Tabel 32.	ANAVA Hasil Data <i>Peak Viscosity</i> pada Profil Gelatinisasi (RVA)	120
Tabel 33.	Uji Lanjut Duncan Hasil Data <i>Peak Viscosity</i> pada Profil Gelatinisasi (RVA)	120
Tabel 34.	Hasil Analisis Profil Gelatinisasi pada Data <i>Trough</i>	121
Tabel 35.	ANAVA Hasil Data <i>Trough</i> pada Profil Gelatinisasi (RVA).....	121
Tabel 36.	Uji Lanjut Duncan Hasil Data <i>Trough</i> pada Profil Gelatinisasi (RVA).....	122
Tabel 37.	Hasil Analisis Profil Gelatinisasi pada Data <i>Breakdown</i>	122
Tabel 38.	ANAVA Hasil Data <i>Breakdown</i> pada Profil Gelatinisasi (RVA) .	122
Tabel 39.	Uji Lanjut Duncan Hasil Data <i>Breakdown</i> pada Profil Gelatinisasi (RVA).....	123
Tabel 40.	Hasil Analisis Profil Gelatinisasi pada Data <i>Final Viscosity</i>	123
Tabel 41.	ANAVA Hasil Data <i>Final Viscosity</i> pada Profil Gelatinisasi (RVA)	124
Tabel 42.	Uji Lanjut Duncan Hasil Data <i>Final Viscosity</i> pada Profil Gelatinisasi (RVA)	124
Tabel 43.	Hasil Analisis Profil Gelatinisasi pada Data <i>Setback</i>	125
Tabel 44.	ANAVA Hasil Data <i>Setback</i> pada Profil Gelatinisasi (RVA).....	125
Tabel 45.	Uji Lanjut Duncan Hasil Data <i>Setback</i> pada Profil Gelatinisasi (RVA).....	125
Tabel 46.	Hasil Analisis Profil Gelatinisasi pada Data <i>Peak Time</i>	126
Tabel 47.	ANAVA Hasil Data <i>Peak Time</i> pada Profil Gelatinisasi (RVA) ..	126
Tabel 48.	Uji Lanjut Duncan Hasil Data <i>Peak Time</i> pada Profil Gelatinisasi (RVA).....	127
Tabel 49.	Hasil Analisis Profil Gelatinisasi pada Data <i>Pasting Temperatur</i>	127

Tabel 50.	ANAVA Hasil Data <i>Pasting Temperatur</i> pada Profil Gelatinisasi (RVA).....	127
Tabel 51.	Uji Lanjut Duncan Hasil Data <i>Pasting Temperatur</i> pada Profil Gelatinisasi (RVA).....	128

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Beras Hitam	16
Gambar 2.	Gabah	18
Gambar 3.	Struktur Anatomi Gabah	19
Gambar 4.	Ozon Generator.....	20
Gambar 5.	Pembentukan Gas Ozon melalui Proses Tumbukan	22
Gambar 6.	Diagram Alir Penelitian Utama	34
Gambar 7.	Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf (XRD) Gabah Beras Hitam	39
Gambar 8.	Grafik RVA Profil Gelatinisasi (RVA) Gabah Beras Hitam.....	59
Gambar 9.	Grafik Gugus Fungsi (FTIR) Gabah Beras Hitam.....	83
Gambar 10.	Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf menggunakan <i>X-Ray Diffractometer</i> (XRD) Gabah Beras Hitam pada Konsentrasi 0 ppm	129
Gambar 11.	Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf menggunakan <i>X-Ray Diffractometer</i> (XRD) Gabah Beras Hitam pada Konsentrasi 2 ppm	129
Gambar 12.	Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf menggunakan <i>X-Ray Diffractometer</i> (XRD) Gabah Beras Hitam pada Konsentrasi 4 ppm	130
Gambar 13.	Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf menggunakan <i>X-Ray Diffractometer</i> (XRD) Gabah Beras Hitam pada Konsentrasi 6 ppm	130
Gambar 14.	Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf menggunakan <i>X-Ray Diffractometer</i> (XRD) Gabah Beras Hitam pada Konsentrasi 8 ppm	131
Gambar 15.	Grafik Analisis Gugus Fungsi menggunakan <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR) Gabah Beras Hitam pada Konsentrasi 0 ppm	132

Gambar 16.	Grafik Analisis Gugus Fungsi menggunakan <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR) Gabah Beras Hitam pada Konsentrasi 2 ppm	132
Gambar 17.	Grafik Analisis Gugus Fungsi menggunakan <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR) Gabah Beras Hitam pada Konsentrasi 4 ppm	133
Gambar 18.	Grafik Analisis Gugus Fungsi menggunakan <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR) Gabah Beras Hitam pada Konsentrasi 6 ppm	133
Gambar 19.	Grafik Analisis Gugus Fungsi menggunakan <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR) Gabah Beras Hitam pada Konsentrasi 8 ppm	134

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Prosedur Analisis Kadar Air Metode Gravimetri (AOAC, 2005)	98
Lampiran 2.	Prosedur Analisis Kadar Pati Metode Luff Schoorls (Wardhani et al., 2024)	99
Lampiran 3.	Prosedur Analisis <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR) (Alrasyid, 2025).....	101
Lampiran 4.	Prosedur Analisis Antosianin Metode <i>pH-Differensial</i> (Anggraeni et al., 2018)	102
Lampiran 5.	Prosedur Analisis <i>X-Ray Diffractometer</i> (XRD) (Laboratorium X-Ray, 2020).....	104
Lampiran 6.	Prosedur Analisis Mikroskopis (Microscopic Analysis) Metode Scanning Electron Microscope (SEM) (Rohmah et al., 2022)	105
Lampiran 7.	Prosedur Analisis RVA (<i>Rapid Visco Analyzer</i>) (Hebishy et al., 2024)	106
Lampiran 8.	Prosedur Analisis Aktivitas Air (Aw) dengan menggunakan Aw Meter (AOAC, 2005)	107
Lampiran 9.	Perhitungan Kebutuhan Sampel Gabah Beras Hitam	108
Lampiran 10.	Perhitungan Kebutuhan Bahan Baku	108
Lampiran 11.	Rincian Biaya Analisis Penelitian.....	109
Lampiran 12.	Perhitungan Analisis Kadar Air	110
Lampiran 13.	Perhitungan Analisis Kadar Pati	112
Lampiran 14.	Perhitungan Analisis Kadar Antosianin	115
Lampiran 15.	Perhitungan Analisis Aktivitas Air.....	118
Lampiran 16.	Perhitungan Analisis <i>Rapid Visco Analyzer</i> (RVA)	120
Lampiran 17.	Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf menggunakan <i>X-Ray</i> <i>Diffractometer</i> (XRD).....	129

Lampiran 18. Grafik Analisis Gugus Fungsi menggunakan <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR) Gabah Beras Hitam	132
Lampiran 19. Dokumentasi Proses Ozonisasi Gabah Beras Hitam	135
Lampiran 20. Dokumentasi Proses Beras Hitam Pecah Kulit menjadi tepung	135
Lampiran 21. Dokumentasi Penelitian	136

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini akan menjelaskan mengenai : 1.1. Latar Belakang, 1.2. Identifikasi Masalah, 1.3. Maksud dan Tujuan Penelitian, 1.4. Manfaat Penelitian, 1.5. Kerangka Pemikiran, 1.6. Hipotesis Penelitian, 1.7. Tempat dan Waktu Penelitian.

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara yang sebagian besar masyarakatnya bekerja dibidang pertanian, dimana padi merupakan komoditas utama sektor pertanian nasional. Tanaman padi (*Oryza sativa* L.) yaitu tanaman penghasil beras yang merupakan sumber karbohidrat bagi sebagian besar penduduk dunia. Padi adalah salah satu tanaman budidaya terpenting dalam peradaban manusia dan menjadi sumber karbohidrat utama bagi mayoritas penduduk dunia setelah serelia, jagung dan gandum (Putri, 2021).

Jumlah penduduk Indonesia yang besar menjadikan kebutuhan beras semakin meningkat. Pada tahun 2024 terdapat 281,6 juta jiwa dan akan selalu mengalami peningkatan setiap tahunnya. Berdasarkan data tersebut kebutuhan beras bagi penduduk Indonesia akan selalu mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya penduduk di Indonesia (BPS, 2024). Secara umum, lebih dari 50% penduduk dunia bergantung pada beras sebagai sumber kalori utama. Selain menyumbang energi, beras juga menyediakan protein dan zat besi masing – masing sebesar 37,7% dan 25,30% dari total kebutuhan tubuh (Martina *et al.*, 2024).

Beras merupakan kebutuhan pangan masyarakat Indonesia yang harus dipenuhi dan dijaga ketahanan pangannya selain gula, kedelai, dan jagung untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari. Konsumsi masyarakat Indonesia terhadap pangan sumber karbohidrat seperti beras sangat tinggi, yaitu lebih dari 60% dibandingkan dengan pangan hewani, sayur, buah serta kacang-kacangan yang relatif lebih rendah (Habibah L *et al.*, 2024).

Tingginya tingkat konsumsi dan kebutuhan beras menyebabkan ketersediaan serta mutu beras perlu dipertahankan selama distribusi dan penyimpanan. Penyimpanan menjadi tahapan penting karena berfungsi menjaga ketersediaan

beras dan mempertahankan kualitas beras hingga dapat dikonsumsi. Namun selama penyimpanan, beras dapat mengalami penurunan mutu baik secara fisik, kimia maupun biologis. Penurunan mutu tersebut dapat berupa perubahan warna, aroma, peningkatan kerusakan akibat serangan hama, pertumbuhan mikroorganisme, serta penurunan kualitas produk secara keseluruhan (Mahi *et al.*, 2023).

Kerusakan selama penyimpanan dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kadar air, lama penyimpanan, serta aktivitas organisme perusak. Menurut penelitian Putri *et al* (2024) menunjukkan bahwa semakin lama masa penyimpanan, maka tingkat kerusakan beras semakin meningkat akibat berkembangnya populasi hama penyimpanan. Penyimpanan hingga 120 hari menyebabkan kerusakan lebih tinggi dibandingkan penyimpanan dalam waktu lebih singkat. Selain itu, kadar air yang lebih tinggi mempercepat perkembangan organisme perusak dan meningkatkan susut bobot selama penyimpanan. Menurut Dharmaputra *et al* (2014) menunjukkan bahwa hama gudang diketahui menjadi salah satu penyebab utama kehilangan hasil pascapanen karena dapat merusak butir beras, meningkatkan pertumbuhan kapang, dan mempercepat penurunan mutu produk selama penyimpanan. Selain itu diketahui bahwa kerusakan pascapanen di negara berkembang dilaporkan dapat mencapai 25-50% dari total produksi pertanian (Setiasih *et al.*, 2020). Oleh karena itu, diperlukan teknologi penanganan pascapanen yang tepat untuk menekan kerusakan dan menjaga mutu beras selama penyimpanan.

Permasalahan yang terjadi selama penyimpanan tidak hanya terjadi pada skala rumah tangga tetapi juga pada skala penyimpanan besar. Penelitian pada gudang penyimpanan beras BULOG menunjukkan keberadaan beberapa jenis hama produk seperti *Tribolium spp.*, *Sitophilus spp.*, dan *Psocids* selama penyimpanan beras, yang berpotensi menurunkan kualitas produk simpan. (Labida, 2014). Temuan tersebut menunjukkan bahwa pengendalian mutu selama penyimpanan masih menjadi tantangan, bahkan pada sistem penyimpanan skala besar.

Selain tingkat konsumsinya yang tinggi, Indonesia memiliki beragam jenis beras dengan bermacam-macam warna antara lain beras putih, beras hitam, dan beras merah (A. R. Sari *et al.*, 2020). Keanekaragaman tersebut dibedakan berdasarkan pigmennya, diantaranya beras tidak berpigmen (beras putih) dan beras

berpigmen (merah, cokelat, ungu dan hitam). Beras berpigmen memiliki kandungan senyawa bioaktif sehingga digolongkan sebagai pangan fungsional yang dapat memiliki efek sebagai antioksidan (Fitriyah *et al.*, 2021).

Diantara beras berpigmen, beras hitam menjadi salah satu varietas yang memiliki kandungan senyawa bioaktif yang tinggi. Beras hitam mengandung senyawa polifenol, γ -orizanol, asam fitat, fenolik, antosianin serta flavonoid, yang berperan sebagai antioksidan dan antiinflamasi serta dapat memberikan manfaat kesehatan lainnya. Tingginya kandungan antioksidan dan antosianin menjadi salah satu keunggulan pada beras hitam. Antosianin merupakan senyawa organik dari golongan flavonoid yang terdapat pada lapisan aleuron, sehingga jika semakin gelap warna beras hitam dapat menunjukkan semakin tinggi kandungan antosianinnya (Fitriyah *et al.*, 2021).

Sebelum menjadi beras, padi berbentuk gabah yang masih diselimuti sekam sehingga memerlukan serangkaian proses pascapanen (Rianda, 2018). Pada tahap penanganan pascapanen, gabah umumnya melalui proses pengeringan untuk menurunkan kadar air, kemudian dilanjutkan dengan penggilingan dan tahapan pemisahan komponen sehingga diperoleh beras konsumsi. Seluruh rangkaian ini akan menghasilkan beberapa produk samping seperti sekam, dedak, dan menir (Handayani *et al.*, 2024).

Proses penanganan pascapanen sangat mempengaruhi kualitas beras hitam yang memiliki kandungan senyawa bioaktif yang cukup tinggi, terutama pada tahap penanganan gabah. Kandungan air yang tinggi pada saat pascapanen mempengaruhi mutu gabah, sehingga dapat menimbulkan risiko kontaminasi jamur yang dapat berkembang pada gabah dengan kadar air $>14\%$ (Badan Standarisasi Nasional, 2023). Hal tersebut dapat menurunkan mutu, sehingga menyebabkan perubahan warna, bau dan risiko pertumbuhan mikroba pada gabah.

Selain dipengaruhi kondisi penyimpanan, kualitas beras hitam juga dipengaruhi oleh proses penanganan pascapanen. Metode pascapanen konvensional seperti pengeringan suhu tinggi, penjemuran sinar matahari, penyimpanan pada suhu ruang, serta perlakuan termal lainnya juga diketahui memiliki keterbatasan dalam mempertahankan kandungan senyawa bioaktif. Kajian literatur menunjukkan

bahwa metode konvensional tersebut umumnya menyebabkan penurunan kandungan antosianin dan aktivitas antioksidan pada beras hitam. Sebagai contoh, menurut penelitian Pramitasari & Angelica (2020) menunjukkan bahwa proses pengeringan semprot pada suhu tinggi (200 °C) menyebabkan penurunan kadar antosianin secara drastis dari 0,85 mg/g menjadi 0,12 mg/g dengan aktivitas antioksidan (DPPH) sekitar 46,2%. Selain itu, menurut Suhartatik *et al* (2013) melaporkan bahwa pemanasan ekstrak beras hitam pada suhu di atas 70 °C menyebabkan degradasi antosianin lebih dari 50%, bahkan aktivitas penangkapan radikal bebas hampir hilang pada suhu di atas 60 °C.

Temuan tersebut menunjukkan bahwa antosianin sebagai komponen utama antioksidan pada beras hitam sangat sensitif terhadap perlakuan termal, oksidasi, dan paparan lingkungan. Dengan demikian, metode pascapanen konvensional tidak hanya berpotensi menurunkan mutu fisik, tetapi juga dapat mengurangi nilai fungsional beras hitam sebagai pangan sumber antioksidan. Keterbatasan ini menunjukkan perlunya teknologi pascapanen alternatif yang lebih mampu menjaga stabilitas senyawa bioaktif.

Teknologi alternatif yang dapat dilakukan yaitu dengan penggunaan ozon. Meskipun penggunaan ozon telah banyak diteliti pada berbagai komoditas pangan, penelitian mengenai pengaruh variasi konsentrasi ozon pada gabah beras hitam masih terbatas. Gas ozon (O₃) adalah bentuk triatomik oksigen yang dikenal sebagai agen pengobatan hijau untuk dekontaminasi mikroba pada pangan, air, dan permukaan pengolahan pangan. Ozon memiliki potensi oksidasi yang lebih kuat dibandingkan dengan klorin, menjadikannya sebagai pengaruh aktif dalam menghancurkan berbagai mikroorganisme seperti bakteri, virus, dan spora tanpa meninggalkan residu berbahaya. Teknologi ini dianggap aman oleh FDA dan telah digunakan secara luas untuk aplikasi antimikroba pada berbagai produk pangan (Siska *et al.*, 2024).

Terdapat berbagai penelitian yang menunjukkan penggunaan ozon dapat menurunkan populasi mikroba pada komoditas pangan tanpa menimbulkan perubahan yang dapat merugikan apabila digunakan pada konsentrasi dan durasi yang tepat. Jika pada penggunaan ozon konsentrasinya terlalu tinggi atau paparan

yang terlalu lama, ozon dapat memicu perubahan warna, penurunan kualitas dan sifat lainnya yang tidak diinginkan. Efektivitas ozon sebagai agen dekontaminasi sangat dipengaruhi oleh konsentrasi, lama paparan, dan jenis mikroorganisme yang dihadapi (Siska *et al.*, 2024).

Dalam penelitian ini, perlakuan ozon diberikan dalam bentuk gas pada gabah beras hitam yang telah disesuaikan pada kadar air 14%. Penetapan kadar air tersebut tidak hanya mengacu pada standar mutu gabah, tetapi juga disesuaikan dengan SNI 224:2023, sehingga kondisi bahan dapat mendukung terjadinya interaksi yang efektif antara ozon dan gabah.

Dengan demikian, aplikasi ozon dalam bentuk gas berpotensi menjadi alternatif penanganan pascapanen yang aman dan ramah lingkungan untuk gabah beras hitam. Mengingat mutu gabah sangat menentukan kualitas beras hitam yang dihasilkan, kajian mengenai pengaruh variasi konsentrasi ozon diperlukan untuk memperoleh perlakuan yang paling efektif dalam mempertahankan mutu fisik dan kimia selama pascapanen.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian, maka dapat diidentifikasi masalah tersebut yaitu bagaimana pengaruh konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisik dan kimia pada gabah beras hitam.

1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui pengaruh berbagai konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisik dan kimia gabah beras hitam.

Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui pengaruh perbedaan konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisik dan kimia gabah beras hitam.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini yaitu :

1. Memberikan informasi mengenai bagaimana perbedaan konsentrasi ozon dapat mempengaruhi sifat fisik dan kimia gabah beras hitam.

2. Memberikan alternatif pada perlakuan pascapanen yang lebih aman dan tidak meninggalkan residu pada gabah beras hitam dengan lebih praktis dan ramah lingkungan.
3. Memberikan landasan bagi penerapan perlakuan ozon pada proses penanganan gabah beras hitam, sehingga kandungannya tetap terjaga pada proses pengolahan.

1.5 Kerangka Pemikiran

Beras merupakan makanan pokok yang berfungsi sebagai sumber energi dengan kandungan karbohidrat yang tinggi tetapi kandungan proteinnya rendah (Pranata *et al.*, 2022). Berdasarkan jenisnya, beras digolongkan menjadi beras berpigmen dan beras tidak berpigmen. Beras tidak berpigmen yaitu beras putih yang paling banyak dikonsumsi, sedangkan beras berpigmen yaitu beras merah dan beras hitam yang diketahui sebagai makanan yang sangat bermanfaat bagi kesehatan atau disebut sebagai makanan fungsional. Kondisi tersebut dapat terjadi karena terdapat kandungan senyawa bioaktif yang mampu meningkatkan imunitas, menurunkan risiko pada munculnya penyakit tertentu, dan memberikan manfaat pada kesehatan secara optimal jika dibandingkan dengan beras putih (Akbar *et al.*, 2024).

Diantara beras berpigmen, beras hitam menjadi salah satu komoditas yang banyak dikembangkan karena kandungan senyawa bioaktifnya relatif tinggi dan dikenal sebagai pangan fungsional. Beras hitam mengandung protein, berbagai senyawa antioksidan, dan serat pangan yang cukup tinggi diantara seluruh jenis padi. Kandungan senyawa bioaktif tersebut menjadikan beras hitam sebagai pangan fungsional karena aktivitas antioksidan yang dapat memberikan manfaat penting bagi kesehatan (Palupi *et al.*, 2023). Salah satu senyawa yang berperan adalah antosianin, yaitu pigmen yang tersimpan pada bagian perikarp, aleuron, dan endosperma sehingga dapat menghasilkan warna merah, biru, hingga ungu pekat yang akan tampak sebagai warna hitam, warna tersebut menunjukkan jika semakin pekat warnanya maka kandungan antosianinnya semakin tinggi. Selain itu, beras hitam memiliki kadar serat pangan (*dietary fiber*) dan hemiselulosa yang tinggi jika dibandingkan dengan beras putih (Wicaksono *et al.*, 2019).

Senyawa utama yang berperan dalam aktivitas antioksidan pada beras hitam adalah antosianin. Antosianin merupakan senyawa yang dikenal mampu untuk mencegah dan menghambat proses oksidasi dengan melalui kemampuannya dalam menangkap radikal bebas, sehingga dapat membantu menurunkan stres oksidatif dalam tubuh. Beras hitam mengandung *cyanidin-3-glucoside* (C3G) yang merupakan jenis antosianin yang paling dominan pada beras hitam. Menurut A. R. Dewi & Wihandani (2025) C3G banyak ditemukan pada kelompok pangan seperti *grains* dan *berries*, dengan proporsinya mencapai sekitar 82% dari total antosianin. Sementara itu, *peonidin-3-glycoside* (P3G) menjadi antosianin terbesar kedua yang terkandung dalam beras hitam. Antosianin memiliki banyak manfaat kesehatan, tetapi sangat sensitif terhadap faktor lingkungan seperti suhu, oksidasi, dan penyimpanan. Sensitivitas ini menyebabkan beras hitam lebih mudah mengalami penurunan kualitas apabila tidak ditangani dengan tepat, khususnya pada tahap awal yaitu saat pascapanen dan masih berupa gabah (H. Setiawati *et al.*, 2013).

Sensitivitas antosianin tersebut dipengaruhi oleh berbagai faktor fisik dan kimia, diantaranya suhu, pH, oksigen, dan cahaya. Suhu tinggi dan paparan panas dapat mempercepat degradasi melalui reaksi oksidasi dan hidrolisis (Suhartatik *et al.*, 2013). Selain itu, antosianin bersifat tidak stabil pada kondisi netral, sehingga konsentrasinya dapat menurun seiring waktu. Pada kondisi asam cenderung bersifat lebih stabil (Pramitasari & Angelica, 2020).

Gabah merupakan bahan pangan yang berasal dari padi dan masih diselimuti oleh sekam serta menjadi bahan baku utama dalam proses pengolahan beras. Sebelum diolah menjadi beras, gabah melalui beberapa tahap pascapanen, termasuk proses pengeringan untuk menurunkan kadar air dan mempertahankan mutu fisiknya sebelum masuk pada tahap penggilingan. Mutu gabah menentukan kualitas beras yang dihasilkan, karena dapat mempengaruhi rendemen, warna, serta stabilitas senyawa bioaktif dalam beras (Handayani *et al.*, 2024). Kondisi tersebut menjadikan tahap pascapanen sebagai fase kritis dalam mempertahankan mutu gabah beras hitam.

Pada tahap pascapanen, gabah sangat rentan mengalami penurunan kualitas akibat berbagai faktor lingkungan seperti kelembapan, suhu, dan aktivitas air.

Kondisi penyimpanan yang tidak terkendali dapat memicu pertumbuhan jamur, serangga hama, serta kerusakan mekanis yang pada akhirnya menurunkan mutu fisik dan kimia gabah. Pada komoditas berpigmen seperti beras hitam, kondisi ini menjadi tantangan yang lebih signifikan, karena kualitas gabah sangat menentukan stabilitas kandungan senyawa bioaktifnya. Oleh karena itu, diperlukan metode penanganan pascapanen yang efektif dan aman untuk mempertahankan mutu gabah beras hitam (Romadani & Hendrival, 2018).

Namun, proses pascapanen konvensional seperti pengeringan suhu tinggi, pemanasan, serta penyimpanan dalam kondisi terbuka dengan paparan oksigen diketahui dapat mempercepat degradasi antosianin. Menurut penelitian oleh (Pramitasari & Angelica, 2020) menunjukkan bahwa pengeringan semprot pada suhu 200°C menyebabkan penurunan kadar antosianin dari 0,85 mg/g menjadi 0,12 mg/g. Hal ini menunjukkan bahwa metode konvensional kurang efektif dalam mempertahankan senyawa bioaktif dibandingkan dengan teknologi alternatif seperti ozon.

Sebagai alternatif, salah satu teknologi pascapanen yang aman digunakan yaitu ozon. Ozon (O_3) merupakan oksidator kuat yang efektif menginaktivasi mikroorganisme dan tidak meninggalkan residu berbahaya, sehingga banyak digunakan sebagai agen dekontaminasi pangan serta telah dinilai aman oleh FDA. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa ozon efektif menurunkan populasi mikroba tanpa mempengaruhi sifat sensori pada konsentrasi tertentu, namun efektivitasnya dipengaruhi oleh konsentrasi, waktu, dan jenis mikroorganisme (Siska *et al.*, 2024).

Ozon dapat dihasilkan melalui beberapa metode, antara lain elektrolisis, fotokimia, radiokimia, serta lucutan listrik. Untuk kebutuhan skala besar, metode lucutan listrik merupakan cara yang paling banyak digunakan secara komersial. Prinsip metode ini adalah melewati udara kering atau oksigen ke dalam suatu ruang di antara elektroda yang dialiri listrik bolak-balik bertegangan tinggi, sehingga terjadi lucutan terputus-putus (intermittent discharge). Lucutan tersebut menyebabkan elektron bertumbukan dengan molekul oksigen, yang selanjutnya membentuk senyawa ozon (O_3) (Anggraini, 2011).

Ozon yang dihasilkan melalui berbagai metode tersebut kemudian dapat diaplikasikan pada proses pascapanen pangan. Dalam aplikasinya, ozon bekerja sebagai oksidator kuat melalui reaksi oksidasi terhadap komponen sel mikroba sehingga menyebabkan kerusakan membran, inaktivasi enzim, hingga kematian sel mikroba (Ağagündüz *et al.*, 2025). Mekanisme ini menjadikan ozon efektif dalam menurunkan kontaminasi kapang, bakteri, serta mikotoksin pada bahan pangan, termasuk biji-bijian, melalui kerusakan dinding sel dan perubahan permeabilitas sel mikroba (Hidayah *et al.*, 2021). Namun, karena sifatnya yang sangat reaktif, penggunaan ozon pada konsentrasi tinggi atau waktu paparan yang terlalu lama dapat menyebabkan penurunan mutu, seperti perubahan warna dan degradasi senyawa bioaktif akibat stres oksidatif (Ağagündüz *et al.*, 2025).

Selain memberikan efek antimikroba, sifat oksidatif ozon juga dapat memengaruhi karakteristik fisikokimia bahan pangan. Pada gabah beras hitam, perubahan tersebut dapat terjadi pada komponen penyusunnya, terutama pati dan amilosa. Kandungan pati dan amilosa merupakan komponen utama yang menentukan sifat fungsional gabah beras hitam. Respons fraksi pati terhadap ozon dipengaruhi oleh intensitas perlakuan, karakteristik varietas bahan, serta struktur awal pati. Penelitian menunjukkan bahwa perlakuan ozon dapat menyebabkan depolimerisasi rantai pati, perubahan struktur granula dari daerah amorf ke kristalin, serta perubahan sifat gelatinisasi (Li *et al.*, 2023). Selain itu, paparan ozon juga dilaporkan menurunkan kadar amilosa pada beras sekitar 5,9%, meskipun responsnya dipengaruhi oleh kondisi perlakuan dan karakteristik bahan (Zhang *et al.*, 2019). Namun, perubahan tersebut dipengaruhi oleh karakteristik bahan dan kondisi perlakuan, sehingga respons terhadap ozon dapat bervariasi (An & King, 2009).

Selain komponen pati, gabah beras hitam memiliki karakteristik penting berupa kandungan antosianin tinggi yang terakumulasi pada lapisan perikarp dan aleuron. Senyawa antosianin sangat sensitif terhadap oksidasi sehingga berpotensi mengalami degradasi akibat ozon. Penelitian pada bahan kaya antosianin menunjukkan penurunan sangat signifikan, seperti pada jus stroberi yang turun hingga 98,2% dan jus *blackberry* lebih dari 90% akibat ozonisasi (Tiwari *et al.*,

2009). Meskipun penelitian spesifik pada gabah beras hitam masih terbatas, hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi dan lama paparan ozon berpotensi mempercepat degradasi antosianin sehingga penggunaan dosis perlu dikendalikan agar tidak menurunkan senyawa bioaktif secara berlebihan.

Perubahan yang terjadi akibat perlakuan ozon pada gabah beras hitam dapat dikaji secara komprehensif menggunakan berbagai instrumen analisis, yaitu *Rapid Visco Analyzer* (RVA), *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), *Scanning Electron Microscopy* (SEM), dan *X-Ray Diffraction* (XRD). RVA digunakan untuk mengevaluasi perubahan sifat viskositas dan profil gelatinisasi pati, yang mencerminkan bagaimana struktur pati mengalami modifikasi akibat oksidasi. FTIR digunakan untuk mengidentifikasi perubahan gugus fungsi kimia akibat oksidasi, seperti terbentuknya gugus karbonil dan karboksil pada rantai polisakarida yang dilaporkan pada pati termodifikasi ozon (Du *et al.*, 2024).

Lebih lanjut, perubahan pada tingkat morfologi dan struktur kristalin dapat diamati melalui SEM dan XRD. Analisis SEM menunjukkan bahwa perlakuan ozon dapat menyebabkan kerusakan fisik pada permukaan granula pati berupa erosi, pembentukan pori, dan retakan yang menandakan terjadinya degradasi struktur akibat oksidasi (Li *et al.*, 2023). Adapun XRD digunakan untuk melihat perubahan tingkat kristalinitas pati, yang mencerminkan reorganisasi struktur molekul akibat serangan oksidatif pada bagian amorf hingga kristalin granula.

Karakteristik bahan juga menjadi faktor yang menentukan respons perlakuan ozon. Dalam penelitian ini, komoditas yang digunakan adalah gabah beras hitam varietas Jeliteng yang diketahui memiliki kemampuan adaptasi yang baik terhadap berbagai kondisi lingkungan. Varietas ini relatif tahan terhadap cekaman kekeringan dan merupakan hasil persilangan antara ketan hitam dan beras Pandan Wangi Cianjur yang dirilis pada tahun 2019 (Rahmayuni *et al.*, 2024). Pemilihan varietas menjadi penting karena karakteristik genetik bahan dapat memengaruhi komposisi kimia, kandungan senyawa bioaktif, serta respons bahan terhadap perlakuan pascapanen.

Dalam penerapannya pada gabah beras hitam, kondisi bahan menjadi faktor penting yang mempengaruhi efektivitas perlakuan ozon. Pemilihan gabah dengan

kadar air sekitar 14% didasarkan pada standar mutu SNI sebagai batas aman penyimpanan karena mampu menekan pertumbuhan mikroorganisme dan menjaga stabilitas komponen kimia. Penggunaan sampel kering bertujuan mencegah pelarutan antosianin serta menghindari reaksi hidrolisis dan oksidasi. Selain itu, kadar air yang terkontrol meningkatkan efektivitas interaksi ozon dalam fase gas dengan permukaan gabah karena tidak terhalang lapisan air. Oleh karena itu, kadar air 14% menjadi kondisi optimum untuk mendukung efektivitas ozon sekaligus mempertahankan kandungan antioksidan. Kondisi tersebut juga berkaitan dengan kemampuan penetrasi ozon pada struktur gabah.

Pada gabah beras hitam, perlakuan ozon cenderung lebih efektif dalam mempertahankan kandungan antosianin karena senyawa tersebut terutama terletak pada lapisan perikarp dan aleuron yang masih dilindungi oleh sekam. Lapisan sekam ini berperan sebagai penghalang fisik yang membatasi penetrasi ozon ke bagian dalam biji, sehingga ozon lebih banyak bereaksi pada permukaan untuk menurunkan mikroba dan menekan aktivitas enzim oksidatif yang dapat merusak senyawa fenolik. Dengan demikian, kondisi penyimpanan menjadi lebih stabil dan degradasi antosianin dapat diminimalkan. Sebaliknya, pada beras giling, hilangnya lapisan pelindung menyebabkan antosianin lebih rentan terhadap oksidasi, sehingga berpotensi mengalami penurunan apabila terpapar ozon secara langsung (Cetinkaya *N et al.*, 2022).

Sejalan dengan hal tersebut, penentuan konsentrasi ozon (0–8 ppm) dilakukan dengan waktu paparan konstan untuk memperoleh kondisi optimum. Konsentrasi rendah (2–4 ppm) digunakan untuk mengevaluasi efektivitas penurunan mikroba, sedangkan konsentrasi lebih tinggi (6–8 ppm) untuk melihat batas terjadinya degradasi mutu. Rentang ini didasarkan pada uji pendahuluan guna menentukan batas aman dan efektif perlakuan, mengingat efektivitas ozon dipengaruhi oleh konsentrasi, waktu paparan, dan karakteristik bahan. Selain itu, karena antosianin pada gabah beras hitam berada di lapisan luar dan rentan terhadap oksidasi, pengujian bertahap diperlukan untuk memperoleh dosis yang mampu mempertahankan kandungan antioksidan.

Di sisi lain, penggunaan ozon memiliki keunggulan yang membuatnya menarik sebagai teknologi pascapanen pada gabah beras hitam. Ozon bersifat sangat tidak stabil dan akan terdekomposisi secara spontan menjadi oksigen setelah proses selesai sehingga tidak meninggalkan residu kimia persisten pada pangan. Karakteristik inilah yang membedakan ozon dengan klorin atau disinfektan kimia lain yang dapat meninggalkan residu. Berbagai kajian melaporkan bahwa ozon mengalami autodekomposisi secara cepat menjadi oksigen (O_2) tanpa meninggalkan residu pada pangan, sehingga banyak dikembangkan sebagai teknologi ramah lingkungan (*green technology*) (Xue *et al.*, 2023; Botondi *et al.*, 2021).

Walaupun sering disebut “bebas residu”, istilah tersebut perlu dipahami secara tepat. Bebas residu bukan berarti ozon tidak menimbulkan efek apa pun, melainkan gas ozon itu sendiri tidak tertinggal pada produk setelah perlakuan selesai karena terurai menjadi oksigen. Akan tetapi, reaksi oksidasi ozon terhadap komponen pangan dapat menghasilkan produk hasil oksidasi seperti aldehida, keton, atau perubahan pada komponen sensitif seperti vitamin, lipid, protein, maupun antosianin apabila dosis yang digunakan terlalu tinggi. Produk tersebut bukan residu ozon, tetapi konsekuensi dari reaksi oksidasi yang terjadi selama perlakuan (Botondi *et al.*, 2021).

Meskipun ozon telah banyak dimanfaatkan pada bidang pangan dan dinilai aman dalam penggunaan terkontrol, paparan ozon bebas pada konsentrasi tinggi dapat menimbulkan risiko kesehatan apabila terhirup secara langsung oleh manusia. Ozon merupakan oksidator kuat yang dapat menyebabkan iritasi saluran pernapasan, batuk, sesak napas, penurunan fungsi paru-paru, hingga memicu stres oksidatif pada jaringan respirasi. Oleh karena itu, penggunaan ozon memerlukan pengaturan konsentrasi dan ventilasi yang baik selama proses aplikasi. Menurut standar *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA), batas paparan ozon yang diizinkan pada lingkungan kerja sebesar 0,1 ppm selama 8 jam paparan, sedangkan konsentrasi yang lebih tinggi berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan (OSHA, 2023). Dengan demikian, keamanan penggunaan ozon pada

bidang pangan tidak hanya dipengaruhi oleh efektivitasnya terhadap bahan, tetapi juga perlu mempertimbangkan keselamatan operator selama proses aplikasi.

Pemanfaatan ozon pada komoditas sereal, khususnya gabah beras hitam, masih relatif terbatas. Hingga saat ini, penelitian mengenai pengaruh variasi konsentrasi ozon terhadap stabilitas antosianin, sifat fisik, dan karakteristik kimia gabah beras hitam masih belum banyak dilaporkan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi konsentrasi ozon terhadap mutu gabah beras hitam serta menentukan konsentrasi paling efektif dalam mempertahankan kualitasnya. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan teknologi pascapanen yang aman, efisien, dan ramah lingkungan.

1.6 Hipotesis Penelitian

Berdasarkan kerangka pemikiran yang telah diuraikan, maka hipotesis yang dapat diambil yaitu diduga bahwa konsentrasi ozon berpengaruh terhadap karakteristik fisik dan kimia gabah beras hitam.

1.7 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di dua tempat yaitu di Laboratorium Penelitian, Program Studi Teknologi Pangan, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan, Jl. Dr. Setiabudi No. 193, Bandung dan Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jl. Cisarung, Bandung. Adapun waktu penelitian dilakukan mulai dari bulan Mei 2026 hingga Juni.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menguraikan mengenai : 2.1 Beras Hitam, 2.2 Gabah, 2.3 Ozon.

2.1 Beras Hitam

Beras hitam (*Oryza sativa L. indica*) merupakan salah satu jenis beras berpigmen yang dibudidayakan di berbagai negara Asia dan semakin dikenal karena masyarakat mulai beralih ke pangan yang memberikan manfaat kesehatan dan termasuk ke dalam kelompok pangan fungsional (Arifa *et al.*, 2021). Secara morfologis, beras hitam memiliki lapisan perikarp, aleuron dan endosperm yang kaya dengan kandungan antosianinnya (Wicaksono *et al.*, 2019). Kandungan tersebut yang dapat memberikan tampilan warna gelap ketika masih berupa beras dan berubah menjadi ungu pekat saat dimasak. Beras hitam memiliki karakteristik berbeda dibandingkan beras putih maupun beras berwarna lainnya, baik dari segi tekstur, cita rasa, maupun nutrisinya. Selain itu, beras hitam berbeda dari ketan hitam karena komposisi amilopektinnya lebih rendah, sehingga memiliki tekstur yang tidak sepele ketan (Nurhidayah & Firmansyah, 2021). Di beberapa daerah di Indonesia seperti Yogyakarta, Sulawesi, dan Jawa Barat, budidaya beras hitam mulai meningkat seiring dengan pertumbuhan permintaan masyarakat terhadap pangan yang dianggap lebih menyehatkan (Arifa *et al.*, 2021).

2.1.1 Varietas Beras Hitam Jeliteng

Salah satu varietas padi hitam yang menunjukkan adaptabilitas tinggi adalah varietas Jeliteng, yang diketahui memiliki kemampuan adaptasi yang baik terhadap berbagai kondisi lingkungan (Rahmayuni *et al.*, 2024). Varietas Jeliteng relatif tahan terhadap cekaman kekeringan dan dirilis pada 2019 sebagai hasil persilangan antara ketan hitam dan beras Pandan Wangi Cianjur. Rata-rata hasil Gabah Kering Giling (GKG) Jeliteng tercatat sekitar 6,18 ton/ha dengan potensi hasil hingga 9,87 ton/ha pada umur panen sekitar 113 hari (Mudhor *et al.*, 2022). Beras Jeliteng menghasilkan nasi dengan tekstur pulen dan memiliki kandungan fenolik yang sangat tinggi, yaitu sebesar $7104,3 \pm 417,9$ mg GAE/100 g BPK. Umur yang genjah dan tinggi tanaman yang tidak terlalu besar menjadikan varietas ini vigor

pertumbuhan yang baik. Selain itu, Jeliteng menunjukkan ketahanan terhadap beberapa hama dan penyakit, antara lain cukup tahan terhadap WBC biotipe 1, tahan HDB kelompok IV, serta tahan penyakit blas ras 033 dan 073 (Subekti & Abdullah, 2023).

2.1.2 Taksonomi dan Kandungan Gizi Beras Hitam

Beras hitam (*Oryza sativa* L. *indica*) memiliki lapisan perikarp, aleuron dan endosperm yang berwarna merah, biru, dan ungu pekat sehingga tampak terlihat seperti warna hitam. Warna-warna tersebut menunjukkan adanya kandungan antosianin dalam beras hitam. Selain itu, beras hitam mempunyai kandungan serat pangan (*dietary fiber*) dan hemiselulosa yang cukup tinggi jika dibandingkan dengan beras putih. Kandungan serat pangan dan hemiselulosa beras hitam masing-masing sebesar 7,5% dan 5,8%, sementara pada beras putih yaitu mengandung masing-masing sebesar 5,4% dan 2,2% (Wicaksono *et al.*, 2019).

Menurut Tjitrosoepomo (2005), kedudukan taksonomi dari beras hitam yaitu sebagai berikut:

Kingdom	: Plantae
Divisi	: Spermatophyta
Sub divisi	: Angiospermae
Kelas	: Monocotyledoneae
Bangsa	: Poales (Glumiflorae)
Famili	: Poaceae (Graminea)
Marga	: <i>Oryza</i>
Spesies	: <i>Oryza sativa</i> L. <i>indica</i>



Gambar 1. Beras Hitam

(Istiqomah, 2022)

Beras hitam memiliki kandungan gizi yang cukup lengkap, jika beras hitam sudah diolah menjadi nasi, kandungan yang terdapat di dalamnya meliputi karbohidrat, protein, lemak, vitamin B kompleks, asam amino, serta berbagai jenis mineral seperti zat besi, seng, kalsium, fosfor, dan selenium (Palupi *et al.*, 2023). Selain itu, beras hitam diketahui memiliki kadar serat pangan yang lebih tinggi dibandingkan beras putih, sehingga berperan dalam memperlancar pencernaan, memperlambat proses pelepasan glukosa, serta mendukung pengendalian kadar gula darah. Kandungan amilosa pada beras hitam berada pada kisaran 25,49% yang bernilai lebih rendah dari beras putih dan turut berkontribusi pada nilai indeks glikemik yang lebih rendah (<55%) yaitu sesuai dengan kategori yang ditetapkan oleh FAO/WHO, dengan demikian beras hitam menjadi salah satu pilihan pangan yang mendukung dalam pengendalian gula darah (A. R. Dewi & Wihandani, 2025).

Di samping kandungan nutrisi makro dan mikro tersebut, beras hitam juga kaya akan senyawa bioaktif seperti polifenol, flavonoid, γ -orizanol, asam fitat, serta berbagai metabolit sekunder lainnya yang diketahui dapat berperan sebagai antioksidan dan antiinflamasi (Fitriyah *et al.*, 2021; Arifa *et al.*, 2021). Pigmen antosianin merupakan salah satu komponen bioaktif yang paling dikenal pada beras hitam yang berkontribusi terhadap warna gelap pada biji beras hitam serta mengandung sifat antioksidan (A. R. Dewi & Wihandani, 2025).

Keberagaman kandungan nutrisi dan komponen bioaktif pada beras hitam memberikan manfaat yang banyak bagi kesehatan. Konsumsi beras hitam diketahui memiliki potensi dalam menurunkan risiko penyakit degeneratif, membantu

memperbaiki kerusakan sel hati, menjaga fungsi ginjal, meningkatkan daya tahan tubuh, serta menghambat proses penuaan karena memiliki peran dalam menekan aktivitas radikal bebas (Nurhidayah & Firmansyah, 2021). Kandungan serat pangan yang tinggi juga berfungsi untuk memperlambat laju peningkatan glukosa darah dan menekan kebutuhan insulin, sehingga beras hitam dianggap sesuai untuk penderita diabetes melitus (A. R. Dewi & Wihandani, 2025). Selain dikonsumsi sebagai nasi, pemanfaatan beras hitam semakin berkembang, misalnya dalam bentuk tepung, yang digunakan untuk pembuatan kue, bihun, maupun produk pangan lainnya. Hal ini dapat mendukung keberlangsungan diversifikasi pangan di Indonesia (Arifa *et al.*, 2021).

2.2 Gabah

Gabah merupakan hasil panen padi berupa butiran biji yang masih terbungkus oleh kulit atau sekam dan menjadi bahan baku utama dalam proses pengolahan beras. Mutu gabah yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, teknik budidaya, penanganan pascapanen, serta faktor genetik tanaman. Salah satu parameter penting dalam penanganan gabah adalah kadar air, karena kadar air menentukan stabilitas, kualitas, dan daya simpan gabah.

Gabah kering panen umumnya memiliki kadar air yang cukup tinggi, berkisar antara 22-30% dan tingginya kadar air tersebut dapat meningkatkan aktivitas enzim serta mempercepat terjadinya kerusakan kimia, biokimia, maupun mikrobiologis (Mita & Rahmatiyah, 2025). Oleh karena itu, gabah harus segera dikeringkan setelah panen hingga mencapai kadar air 13-14%, hal ini dianggap sebagai kadar air yang paling stabil dan aman untuk penyimpanan karena laju penyerapan air kembali sangat lambat serta panas yang dihasilkan oleh respirasi gabah dan mikroorganisme tidak cukup untuk menaikkan suhu gabah secara signifikan (David & Davtaniel, 2023).



Gambar 2. Gabah

(Balai Besar Penerapan Modernisasi Pertanian, 2024)

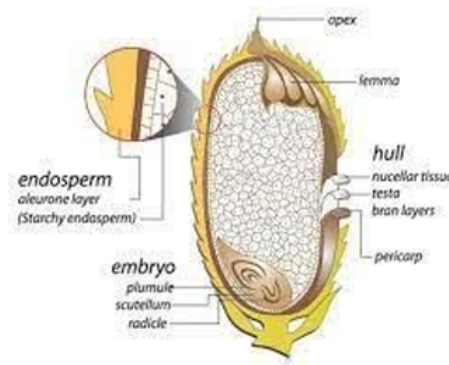
Dalam proses pengeringan, baik menggunakan metode penjemuran tradisional maupun pengeringan mekanis, namun pengeringan buatan memberikan kontrol yang lebih akurat terhadap kadar air. Penjemuran yang tidak optimal, baik karena suhu yang tidak stabil maupun ketebalan lapisan gabah yang berlebihan, dapat meningkatkan proporsi beras patah akibat kerusakan jaringan biji. Durasi penjemuran juga sangat mempengaruhi mutu gabah, seperti penjemuran yang terlalu singkat dapat mempertahankan kadar air tinggi sehingga memicu serangan jamur dan hama, sementara penjemuran terlalu lama akan menyebabkan gabah terlalu kering dan menghasilkan beras patah saat digiling (Nur & Banjari, 2019; Mita & Rahmatiyah, 2025). Setelah pengeringan, gabah diproses melalui tahap penggilingan untuk memisahkan sekam dan menghasilkan beras serta akan menghasilkan beberapa produk samping seperti sekam 15-20%, dedak 8-12%, dan menir sekitar 5%. Mutu beras giling sangat ditentukan oleh mutu gabah awal karena kadar air yang tidak sesuai dapat menyebabkan biji retak dan meningkatkan jumlah beras patah (David & Davtaniel, 2023).

2.2.1 Struktur Anatomi Gabah

Secara anatomi, gabah terdiri atas dua bagian utama, yaitu kariopsis padi dan bagian pelindung berupa sekam. Kariopsis, yang umum dikenal sebagai beras pecah kulit, merupakan benih tunggal yang menyatu dengan dinding buah (perikarp). Kariopsis tersusun atas embrio (janin) dan endosperma yang dilapisi oleh aleuron, kemudian tegmen, serta lapisan terluar berupa perikarp. Sementara itu, sekam tersusun dari dua daun termodifikasi, yaitu lemma (sekam kelopak) dan palea

(sekam mahkota), dengan proporsi bobot sekitar 20% dari total bobot gabah (Makarim & Suhartatik, 2009).

Pada gabah beras hitam, pigmen antosianin yang memberikan warna hitam hingga ungu terakumulasi terutama pada lapisan perikarp dan lapisan kulit biji (seed coat), serta dapat ditemukan pada lapisan aleuron. Pigmen ini tidak terdapat pada endosperm, sehingga distribusinya terbatas pada bagian luar biji. Kondisi ini menyebabkan proses penyosohan yang menghilangkan lapisan perikarp dan aleuron akan menurunkan kandungan antosianin secara signifikan (Yoshimura *et al.*, 2012; Kristamtini & Wiranti, 2017).



Gambar 3. Struktur Anatomi Gabah

(IRI BOOK, 1996)

2.2.2 Klasifikasi Mutu Gabah

Kualitas gabah di Indonesia diklasifikasikan menjadi Gabah Kering Giling (GKG), Gabah Kering Panen (GKP), dan gabah kualitas rendah. Berdasarkan pedoman Inpres No. 5 Tahun 2015, penentuan kualitas gabah dilakukan melalui parameter kadar air dan kadar hampa atau kotoran, dengan urutan kualitas dari yang tertinggi yaitu GKG, kemudian GKP, dan gabah kualitas rendah (D. Setiawati, 2020).

Ketentuan kadar air maksimum gabah yang dinyatakan aman untuk disimpan dan memenuhi persyaratan mutu mengacu pada SNI 224:2023 tentang gabah, yang menetapkan kadar air maksimum sebesar 14%. Panen yang dilakukan pada umur optimum, yaitu ketika gabah menguning 90-95% atau memiliki kadar air sekitar

21-27% tergantung musim, juga sangat berpengaruh terhadap mutu gabah dan dapat menekan kehilangan hasil. Selain itu, persyaratan mutu gabah juga mencakup aspek kualitatif seperti bebas dari hama, penyakit, bau asam atau bau tidak normal, serta tidak terkontaminasi residu bahan kimia dan pupuk, yang semuanya akan menjadi penentu kelayakan gabah untuk penyimpanan dan pengolahan lebih lanjut (Iswari, 2012).

2.3 Ozon

Teknologi ozon telah menjadi salah satu pendekatan yang semakin banyak digunakan dalam penanganan dan pengolahan bahan pangan karena sifatnya yang efektif, aman, dan ramah lingkungan. Ozon dapat diaplikasikan dalam bentuk gas maupun melalui air yang dialiri ozon, sehingga memungkinkan penggunaannya untuk berbagai jenis komoditas pangan. Keunggulan utama teknologi ini adalah sifatnya yang tidak meninggalkan residu berbahaya, karena ozon secara alami terurai kembali menjadi oksigen dalam waktu singkat setelah bereaksi (I. M. Sari *et al.*, 2023). Hal tersebut menjadikan ozon sebagai alternatif yang lebih aman dibandingkan bahan kimia desinfektan lainnya, khususnya dalam upaya menjaga kualitas dan keamanan produk pangan.



Gambar 4. Ozon Generator

(Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026)

Generator ozon pada penelitian ini bekerja dengan metode lucutan plasma, yaitu dengan mengalirkan udara kering atau oksigen melalui celah elektroda bertegangan tinggi sehingga terjadi tumbukan elektron dengan molekul oksigen yang menghasilkan ozon (Tjahjanto *et al.*, 2012). Sistem yang digunakan adalah *plasma chamber* tidak langsung (*indirect plasma discharge*), di mana ozon dibentuk dalam ruang tertutup tanpa kontak langsung antara elektroda dan sampel, kemudian dialirkan dan terdistribusi merata ke permukaan gabah sehingga efektif untuk bahan pangan padat. Konsentrasi ozon dipengaruhi oleh tegangan listrik, laju alir oksigen, suhu, tekanan parsial oksigen, dan kadar air pada bahan. Ozon bersifat tidak stabil dengan umur paruh sekitar 20 menit di dalam air dan 10–16 jam di udara. (Syafarudin & Novia, 2013; Tjahjanto *et al.*, 2012).

2.3.1 Sifat dan Karakteristik Ozon

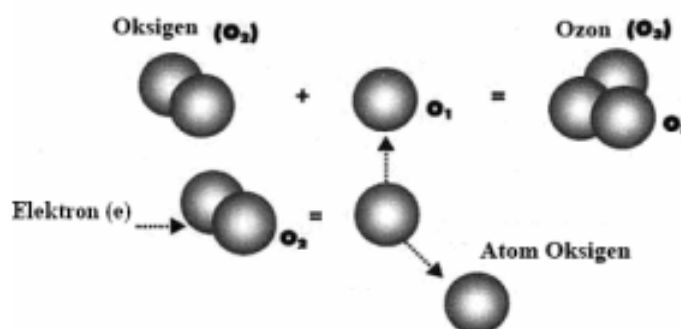
Ozon adalah bentuk oksigen triatomik (O_3) yang terbentuk ketika molekul oksigen bereaksi dengan radikal bebas, struktur molekulnya memiliki sudut sekitar $116^\circ 8'5$ dan dikenal sebagai gas kebiruan yang berbau tajam. Secara atmosferik, ozon dihasilkan terutama melalui fotokimia (sinar UV) di stratosfer, sementara sebagian kecil terdapat di troposfer dan permukaan bumi. Sifat kimia ozon ditandai oleh potensi oksidasi yang tinggi (sekitar 2,07 V), menjadikannya agen oksidator yang lebih kuat dibandingkan HOCl (Asam Hipoklorit) dan Cl_2 (klorin). Oleh karena itu ozon banyak digunakan untuk desinfeksi dan pengolahan kimia. Secara fisik, ozon sebagian larut dalam air, kelarutannya dipengaruhi oleh temperatur, tekanan, ion terlarut, dan pH, dan memiliki titik lebur serta titik didih sangat rendah (sekitar $-192,7^\circ C$ dan $-111,9^\circ C$) (Kaur *et al.*, 2023).

2.3.2 Pembentukan Ozon

Ozon mudah menyerap sinar ultraviolet, sinar ultraviolet dari pancaran matahari mampu menguraikan molekul oksigen (O_2) di udara bebas. Molekul oksigen tersebut terurai menjadi dua atom oksigen (O^*), proses ini dikenal sebagai photolysis. Selanjutnya atom-atom oksigen secara alami bertumbukan dengan molekul oksigen di sekitarnya sehingga terbentuk ozon (O_3). Ozon dapat menyerap radiasi matahari pada panjang gelombang antara 240–340 nm dan terurai kembali

menjadi satu molekul oksigen (O_2) dan satu atom oksigen (O^*). Ozon dapat bereaksi dengan atom oksigen (O^*) untuk meregenerasi dua molekul oksigen (O_2) (Syafarudin & Novia, 2013).

Pembentukan ozon melalui proses tumbukan ini dapat direplikasi dengan melewati gas oksigen (O_2) melalui daerah yang dikenai tegangan tinggi. Molekul-molekul oksigen tersebut akan mengalami ionisasi yaitu proses terlepasnya atom atau elektron dari ikatan menjadi atom/ion oksigen (O^*). Molekul-molekul oksigen yang terionisasi ini biasa berada dalam kondisi plasma. Plasma merupakan partikel gas bermuatan yang terdiri dari pembawa muatan atau biasa yang disebut dengan ion yang terdiri dari ion positif, ion negatif, elektron dan radikal bebas. Plasma juga biasa disebut dengan materi fase keempat setelah padat, cair dan gas (Syafarudin & Novia, 2013). Adapun gambar dari pembentukan gas ozon melalui proses tumbukan.



Gambar 5. Pembentukan Gas Ozon melalui Proses Tumbukan

(Bimo, 2011, dalam Syafarudin & Novia, 2013)

2.3.3 Mekanisme Oksidasi Ozon

Proses oksidasi oleh ozon dapat terjadi melalui dua cara, yaitu reaksi langsung (*direct*) dan tidak langsung (*indirect*). Oksidasi ozon secara langsung terjadi ketika molekul ozon bereaksi langsung dengan senyawa target, bersifat selektif namun relatif lambat karena ozon cenderung menyerang ikatan rangkap atau bagian yang kaya elektron seperti gugus aromatik, olefin, dan amina. Dalam penelitian ini digunakan mekanisme oksidasi tidak langsung (*indirect*), yang terjadi akibat ketidakstabilan ozon, sehingga atom oksigen ketiganya berinteraksi dengan matriks

bahan pangan dan terurai membentuk berbagai radikal bebas. Radikal yang dihasilkan kemudian bereaksi dengan senyawa organik maupun anorganik dalam bahan. Selain itu, reaksi lanjutan antara radikal tersebut dengan ozon dapat menghasilkan radikal hidroksil tambahan (Prabha *et al.*, 2015).

Konsentrasi ozon yang terlalu tinggi atau durasi ozonisasi yang terlalu lama dapat menyebabkan kerusakan pada struktur permukaan bahan organik, sehingga penentuan konsentrasi dan waktu perlakuan yang tepat menjadi faktor penting dalam setiap aplikasi ozonisasi (Prabha *et al.*, 2015). Oleh karena itu, variasi konsentrasi ozon menjadi parameter utama yang perlu dikaji dalam penelitian terkait pengaruh ozonisasi terhadap karakteristik gabah beras hitam.

2.3.4 Keunggulan Ozon

Keunggulan teknologi ozonisasi juga terlihat dari efektivitasnya yang lebih luas jika dibandingkan dengan klorin ataupun desinfektan lain. Oleh karena itu, teknologi ozonisasi banyak diterapkan untuk menjaga kesegaran produk dan memperpanjang umur simpan hasil pertanian (Siahaan & Widayanti, 2020). Ozon juga dikenal aman jika kontak dengan pangan karena molekulnya mudah terdekomposisi menjadi oksigen melalui autolisis, sehingga tidak menyebabkan penumpukan senyawa pada bahan pangan selama proses penyimpanan dan pengolahan (Chuwa *et al.*, 2020).

2.3.5 Aplikasi Ozon dalam Pangan

Sebagai oksidator kuat, ozon memiliki kemampuan bereaksi dengan berbagai senyawa organik, anorganik, serta residu kimia berbahaya. Faktor-faktor seperti pH, suhu, kelembaban, waktu kontak, dan kondisi lingkungan memengaruhi efektivitas ozon dalam proses oksidasi. Dalam industri pangan, ozon telah banyak dimanfaatkan sebagai antimikroba pada berbagai bentuk produk, termasuk bahan pangan padat dan cair seperti buah, sayuran, dan produk lainnya. Selain berfungsi sebagai agen sterilisasi, ozon juga mampu menurunkan bau, menghilangkan warna, serta menguraikan senyawa organik yang tidak diinginkan. Penggunaan ozon sangat relevan dengan tingginya kerusakan pascapanen di negara berkembang yang

dapat mencapai 25-50% dari total produksi, dan ozon memberikan solusi yang efektif untuk menahan kerusakan tersebut (Setiasih *et al.*, 2020).

Sebagai gas triatomik (O_3) yang tidak stabil, ozon dengan cepat melepaskan atom oksigen melalui proses oksidasi sehingga dapat berubah kembali menjadi oksigen stabil (O_2). Sifat ini yang dapat menjadikan ozon sebagai "*green technology*" karena tidak meninggalkan sisa bahan kimia berbahaya. Teknologi ozon berpotensi besar digunakan sebagai metode sanitasi alternatif pada komoditas pertanian, baik dalam menekan pertumbuhan mikroba, menghilangkan bau, mengurangi senyawa organik, maupun mengoksidasi logam berat seperti Fe dan Mn pada pangan. Implementasi ozon dalam industri pangan telah mencakup berbagai tujuan, mulai dari desinfeksi, peningkatan masa simpan, hingga peningkatan keamanan pangan. Selain itu, ozon juga efektif dalam menghambat pertumbuhan mikroba sehingga kualitas sensorik produk seperti kesegaran dapat dipertahankan lebih lama (Hartoyo & Rachma, 2022).

2.3.6 Perbandingan dengan Metode Konvensional

Salah satu metode yang umum digunakan dalam penanganan gabah beras hitam adalah pengeringan, yang bertujuan untuk menurunkan kadar air hingga batas tertentu sehingga dapat memperlambat laju kerusakan akibat aktivitas biologis dan kimia sebelum gabah diolah atau disimpan. Namun demikian, proses pengeringan yang tidak tepat, seperti waktu pengeringan yang terlalu lama atau terlalu cepat, distribusi panas yang tidak merata, serta penggunaan suhu yang terlalu tinggi atau perubahan suhu yang mendadak, dapat menyebabkan kerusakan pada gabah yang berdampak pada penurunan mutu beras yang dihasilkan (Rahmayanti N *et al.*, 2015).

Menurut penelitian Pramitasari & Angelica (2020) menunjukkan bahwa proses pengeringan semprot pada suhu $200^{\circ}C$ menyebabkan penurunan kadar antosianin dari 0,85 mg/g menjadi 0,12 mg/g. Selain itu, aktivitas antioksidan juga mengalami penurunan yang cukup besar. Metode lain seperti pemanasan ekstrem juga dapat menyebabkan degradasi total antosianin hingga tidak terdeteksi. Sementara itu, penyimpanan dalam kondisi terbuka dengan paparan oksigen menyebabkan

penurunan aktivitas antioksidan akibat reaksi oksidasi yang berlangsung secara bertahap.

Dibandingkan dengan metode pengeringan, penggunaan ozon memiliki keunggulan sebagai agen oksidator yang mampu bekerja secara langsung dalam menurunkan kontaminasi kapang, bakteri, dan mikroorganisme lain pada permukaan biji. Pada beras, aplikasi ozon dalam konsentrasi rendah dilaporkan efektif menurunkan *Bacillus cereus*, meskipun penggunaannya perlu dikontrol karena pada konsentrasi atau waktu paparan yang terlalu tinggi dapat memengaruhi warna dan sifat fisikokimia bahan.

Selain itu, pada beras hitam, kandungan antosianin yang terlokalisasi pada lapisan perikarp dan aleuron menjadikan perlakuan ozon pada gabah lebih menguntungkan, karena paparan ozon dapat difokuskan pada permukaan biji sehingga degradasi senyawa bioaktif dapat diminimalkan. Oleh karena itu, penggunaan ozon dengan pengaturan konsentrasi dan lama paparan yang tepat berpotensi lebih efektif dalam menjaga mutu dan stabilitas kandungan antioksidan pada gabah beras hitam.

2.3.7 Keamanan dan Efektifitas Ozon

Dalam penggunaannya sebagai agen dekontaminasi, gas ozon terbukti memiliki potensi oksidasi yang lebih kuat dibandingkan klorin, sehingga efektif melawan berbagai mikroorganisme seperti bakteri, virus, dan spora. Ozon biasanya diproduksi langsung melalui generator dan diaplikasikan baik dalam bentuk gas maupun melalui media air. FDA juga mengakui penggunaan ozon sebagai agen antimikroba yang aman pada berbagai produk pangan.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa perlakuan ozon dapat menurunkan populasi mikroba patogen secara signifikan tanpa merusak atribut sensori produk, terutama ketika digunakan dalam konsentrasi dan durasi yang tepat. Namun, pada konsentrasi yang lebih tinggi atau waktu kontak yang terlalu lama, beberapa perubahan seperti perubahan warna dapat terjadi. Selain itu, resistensi beberapa mikroorganisme terhadap ozon juga ditemukan, khususnya pada bakteri sporulatof seperti *Bacillus cereus*, sehingga pengaturan parameter seperti konsentrasi, lama

paparan, dan jenis mikroba yang ditargetkan menjadi faktor penting dalam efektivitas perlakuan ozon (Siska *et al.*, 2024).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menguraikan mengenai : 3.1 Bahan dan Alat Penelitian, 3.2 Metode Penelitian, 3.3 Prosedur Penelitian.

3.1 Bahan dan Alat Penelitian

3.1.1 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam proses penelitian ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu bahan utama dan bahan analisis. Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah Gabah Beras Hitam varietas Jeliteng yang berasal dari BBPadi Sukamandi.

Bahan analisis yang digunakan yaitu etanol 95%, NaOH 1 N, I₂, kalium bromida, metanol. HCl 1%, kalium klorida, natrium asetat dan standar silikon (Si).

3.1.2 Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan yaitu cawan porselen, oven, eksikator, neraca analitik, tang krus, labu ukur 250 mL, gelas ukur (50 mL, 100 mL), spektrofotometer UV-VIS, pipet 5 mL, FTIR Nicolet iS5, *rotary evaporator* vakum, botol amber, pH meter, mikroskop SEM, Instrumen *X-Ray Diffractometer* dengan software, *Scanning Electron Microscopy* (SEM), dan aw meter.

3.2 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini disusun untuk mengetahui pengaruh perlakuan ozon terhadap gabah beras hitam. Secara umum, penelitian ini meliputi penelitian utama dengan perlakuan berbagai konsentrasi ozon pada gabah beras hitam, kemudian dilanjutkan dengan pengamatan terhadap respon fisik dan respon kimia.

3.2.1 Penelitian Utama

Pada penelitian utama ini yaitu gabah beras hitam dengan menggunakan konsentrasi ozon sebanyak 5 taraf (0,2,4,6,8) ppm. Respon yang digunakan antara lain respon fisik (XRD, SEM, dan RVA), dan respon kimia (kadar air, kadar pati, kadar antosianin, aktivitas ais (aw), dan FTIR).

3.2.1.1 Rancangan Perlakuan

Rancangan perlakuan pada penelitian ini terdiri dari satu faktor, yaitu konsentrasi ozon (A) yang terdiri dari 5 taraf berikut:

Tabel 1. Konsentrasi Ozon

Perlakuan	Ozon (ppm)
a ₁	0
a ₂	2
a ₃	4
a ₄	6
a ₅	8

3.2.1.2 Rancangan Percobaan

Rancangan percobaan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu Rancangan Acak Kelompok (RAK) dengan satu faktor (konsentrasi ozon) dan 5 taraf sebanyak 3 kali ulangan, sehingga didapatkan 15 perlakuan.

Model percobaan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Keterangan :

Y_{ij} = Respon percobaan dari perlakuan ke-i pada kelompok ke-j

μ = Nilai tengah umum

τ_i = Pengaruh perlakuan konsentrasi ozon

β_j = Pengaruh kelompok ke-j

ε_{ij} = Pengaruh galat dari perlakuan ke-i pada kelompok ke-j

Tabel 2. Matriks Rancangan Percobaan

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan		
	1	2	3
a ₁ : 0 ppm	a1	a1	a1
a ₂ : 2 ppm	a2	a2	a2
a ₃ : 4 ppm	a3	a3	a3
a ₄ : 6 ppm	a4	a4	a4
a ₅ : 8 ppm	a5	a5	a5

Berdasarkan rancangan pada tabel 2 dapat dibuat denah (*lay out*) percobaan *factorial one way* yang dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Denah (*Lay Out*) Kelompok Ulangan

Kelompok Ulangan 1				
a3	a1	a4	a2	a5
Kelompok Ulangan 2				
a2	a4	a1	a3	a5
Kelompok Ulangan 3				
a3	a2	a1	a4	a5

3.2.1.3 Rancangan Analisis

Rancangan analisis dilakukan untuk mengidentifikasi pengaruh perlakuan terhadap respon yang diamati. Hasil rancangan percobaan tersebut kemudian diolah dan disajikan dalam Tabel Analisis Variansi (ANOVA) sebagai dasar penarikan kesimpulan mengenai pengaruh perlakuan.

Tabel 4. Analisis Variansi Rancangan Acak Kelompok (RAK)

Sumber Variansi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F Tabel 5%
Kelompok	r-1	JKK/(r-1)	KTK/(r-1)	-	-
Perlakuan	a-1	JKP/(a-1)	KTP/(a-1)	KTP/KTG	-
Galat	(a-1)(r-1)	JKG	KTG/(a-1)(r-1)	-	-
Total	ar-1	JKT	-	-	-

(Sumber: Gaspersz, 1995)

Berdasarkan Tabel 13 Analisis Variansi (ANAVA), selanjutnya dapat ditentukan daerah penolakan hipotesis, yaitu:

1. Hipotesis (H1) ditolak maka (H0) diterima, jika $F \text{ hitung} \leq F \text{ tabel}$ pada taraf 5% maka konsentrasi ozon tidak berpengaruh terhadap karakteristik gabah beras hitam masing-masing pada perlakuan pada taraf 5%
2. Hipotesis (H1) diterima maka (H0) ditolak, jika $F \text{ hitung} > F \text{ tabel}$ pada taraf nyata 5% maka konsentrasi ozon berpengaruh nyata terhadap karakteristik gabah beras hitam, dan selanjutnya akan dilakukan uji Duncan untuk mengetahui perbedaan yang signifikan antar masing-masing perlakuan pada taraf 5% untuk menguji perbedaan diantara semua perlakuan.

3.2.1.4 Rancangan Respon

Rancangan respon yang dilakukan pada penelitian utama gabah beras hitam terdiri dari respon fisik dan kimia.

a. Respon Fisik

Respon fisik yang akan dianalisis pada gabah beras hitam yaitu XRD, SEM, dan RVA.

b. Respon Kimia

Respon kimia yang akan dianalisis pada gabah beras hitam yaitu kadar air, kadar pati, kadar antosianin, aktivitas air (aw), dan FTIR.

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Prosedur Perlakuan Ozonisasi pada Gabah Beras Hitam

a. Sortasi

Tujuan sortasi yaitu untuk memisahkan gabah beras hitam yang layak digunakan dari gabah yang rusak, patah, dan hampa. Gabah beras hitam disortir secara manual untuk memisahkan gabah yang rusak dan tidak layak digunakan sehingga diperoleh gabah beras hitam yang sesuai untuk proses selanjutnya.

b. Pembersihan Kering

Tujuan pembersihan kering adalah untuk menghilangkan kotoran yang masih melekat pada permukaan gabah, seperti debu, tanah, dan kotoran halus lainnya. Gabah beras hitam hasil sortasi kemudian dibersihkan secara kering untuk menghilangkan debu, tanah, dan kotoran halus yang masih menempel pada permukaan gabah, sehingga diperoleh gabah yang bersih.

c. Pengondisian Kadar Air 14%

Tujuan pengondisian kadar air yaitu untuk mempertahankan kadar air gabah beras hitam sesuai standar yang telah ditetapkan, sehingga sampel berada pada kondisi yang baik. Gabah beras hitam yang telah dibersihkan kemudian dikondisikan hingga mencapai kadar air 14%. Tahap ini dilakukan untuk memastikan sampel memiliki kadar air yang sesuai sebelum diberikan perlakuan ozon.

d. Ozonisasi

Tujuan ozonisasi adalah untuk mengetahui pengaruh perlakuan ozon dengan berbagai konsentrasi terhadap mutu gabah beras hitam. Gabah beras hitam yang telah dibersihkan dan dikondisikan kadar airnya kemudian diberi perlakuan ozonisasi menggunakan gas ozon dengan konsentrasi yang berbeda yaitu 0,2,4,6, dan 8 ppm selama 30 menit. Proses ozonisasi dilakukan di dalam ruang dengan mengalirkan gas ozon ke dalam ruang yang berisi gabah pada konsentrasi dan waktu perlakuan yang telah ditetapkan. Setelah proses selesai, gabah dikeluarkan dan dikondisikan sebagai gabah beras hitam hasil ozonisasi.

e. Pengupasan Gabah (Hulling)

Tujuan pengupasan gabah adalah untuk memisahkan sekam dari gabah sehingga diperoleh beras hitam pecah kulit. Gabah beras hitam hasil ozonisasi kemudian dikupas menggunakan alat pengupas untuk melepaskan kulit luarnya. Hasil proses ini berupa beras hitam pecah kulit, sedangkan bagian yang terpisah adalah sekam.

f. Pengemasan Vakum

Tujuan pengemasan vakum adalah untuk menjaga kestabilan mutu beras hitam pecah kulit (BPK) hasil ozonisasi karena sampel tidak langsung dianalisis. BPK dikemas dalam kondisi vakum untuk meminimalkan kontak dengan oksigen dan uap air, sehingga dapat mencegah oksidasi, pertumbuhan mikroba, serta degradasi senyawa bioaktif seperti antosianin selama penyimpanan sementara sebelum analisis dilakukan.

g. Penghancuran

Tujuan penghancuran adalah untuk memperkecil ukuran partikel gabah beras hitam. Sampel gabah beras hitam hasil ozonisasi selanjutnya akan dilakukan penghancuran hingga diperoleh partikel yang berukuran lebih kecil.

h. Pengayakan

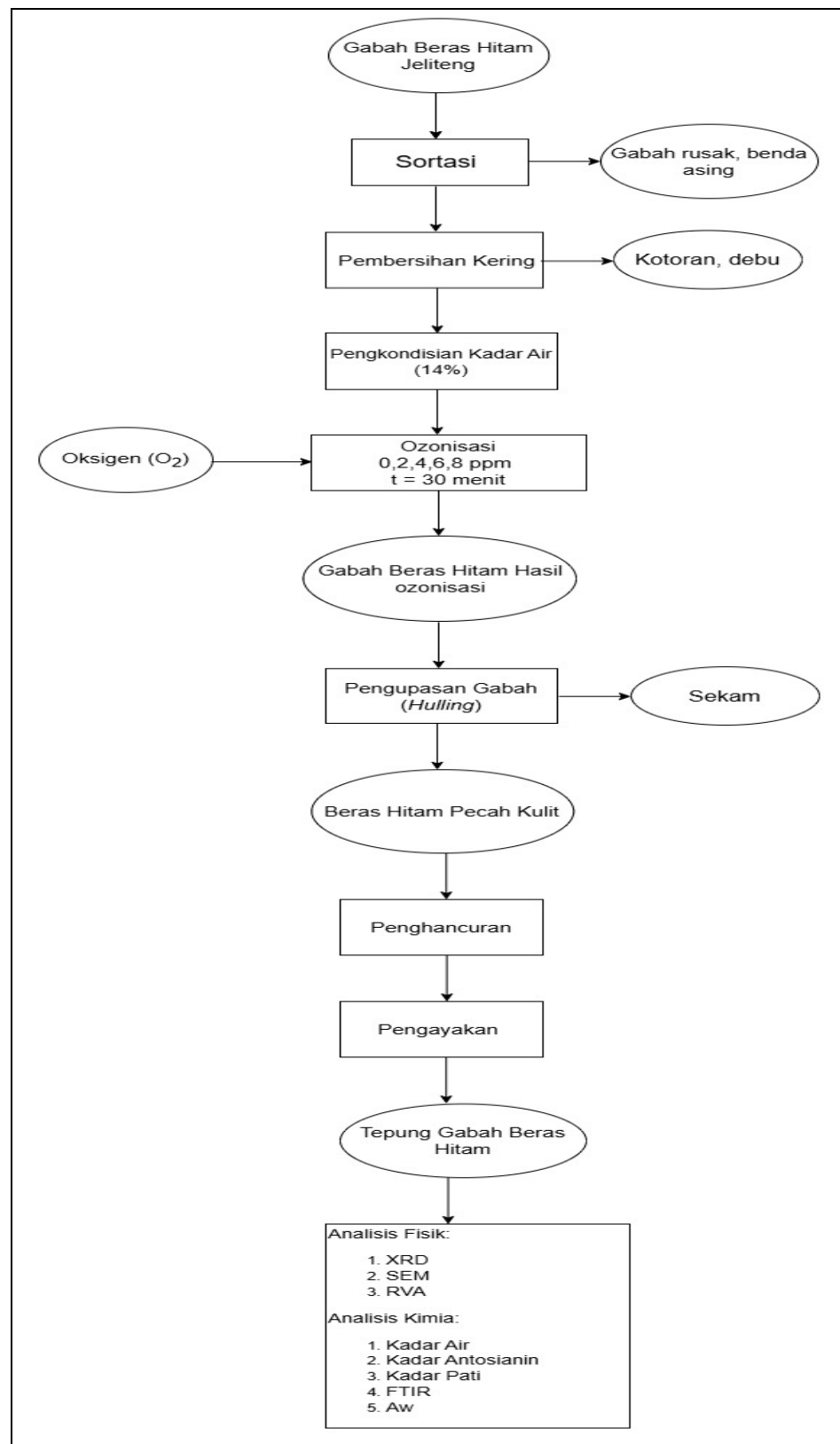
Tujuan pengayakan adalah untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam sehingga menghasilkan tepung dengan kualitas yang lebih homogen. Hasil penghancuran kemudian diayak menggunakan ayakan dengan ukuran mesh 80 untuk memperoleh tepung dengan ukuran partikel yang seragam. Hasil yang melewati ayakan akan dikumpulkan untuk menjadi tepung gabah beras hitam, sedangkan yang tertahan akan dihancurkan kembali hingga memenuhi ukuran yang sesuai.

i. Analisis Fisik

Analisis fisik dilakukan pada sampel dalam bentuk tepung yang meliputi karakterisasi struktur kristalin menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), pengamatan morfologi dan karakteristik permukaan partikel menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan analisis profil viskositas dan gelatinisasi pati menggunakan *Rapid Visco Analyzer* (RVA).

j. Analisis Kimia

Analisis kimia pada sampel tepung meliputi pengukuran kadar air, penentuan kadar antosianin sebagai parameter kandungan senyawa bioaktif, pengukuran aktivitas air (aw) menggunakan aw meter untuk mengetahui jumlah air bebas yang tersedia bagi pertumbuhan mikroorganisme dan reaksi kimia dalam bahan, dan identifikasi gugus fungsi menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR).



Gambar 6. Diagram Alir Penelitian Utama

3.4 Jadwal Pelaksanaan Penelitian

Tabel 5. Rencana Jadwal Penelitian

Kegiatan	Februari	Maret	April	Mei	Juni	Juli
Penyusunan Proposal dan Bimbingan						
Seminar Usulan Penelitian						
Pelaksanaan Penelitian						
Pengolahan Data dan Penyusunan Tugas Akhir						
Sidang Tugas Akhir						
Revisi Laporan						

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menguraikan mengenai : 4.1 Hasil Penelitian Utama.

4.1 Hasil Penelitian Utama

4.1.1 Respon Fisik

Analisis fisik yang dilakukan pada penelitian utama yaitu *X-Ray Diffractometer* (XRD) untuk mengetahui struktur kristal, *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk analisis mikroskopik mengetahui morfologi granula pati dan *Rapid Visco Analyzer* (RVA) untuk profil viskositas dan gelatinisasi pati.

4.1.1.1 Analisis Kristalinitas dan Amorf (*X-Ray Diffractometer*)

Metode *X-Ray Diffraction* (XRD) merupakan metode teknik karakterisasi yang digunakan untuk mengidentifikasi struktur kristalin suatu bahan berdasarkan pola difraksi yang dihasilkan ketika berkas sinar-X mengenai bidang kisi kristalnya. Pada pati, analisis XRD memberikan informasi mengenai tipe polimorfisme kristal yang mencerminkan susunan heliks ganda amilopektin, serta derajat kristalinitas yang menggambarkan proporsi daerah teratur (kristalin) terhadap daerah tidak teratur (amorf) dalam granula pati. Interaksi ikatan hidrogen antara rantai amilosa dan amilopektin membentuk daerah kristalin dan amorf yang secara bersama-sama menyusun struktur supramakromolekul granula pati (Syahbanu *et al.*, 2023).

Daerah kristalin dalam granula pati menghasilkan puncak difraksi yang tajam pada difraktogram, sementara daerah amorf menghasilkan hambur latar yang lebar tanpa puncak spesifik (Buléon *et al.*, 1998). Derajat kristalinitas ditentukan berdasarkan perbandingan antara luas area puncak kristalin (*reduced area*) terhadap total area difraktogram (*global area*) (Faridah, 2011).

Pati serealium umumnya menunjukkan pola kristalin tipe-A, yang terbentuk dari susunan heliks ganda rantai pendek amilopektin yang berkemas rapat dengan sedikit kandungan air di dalam kisi kristalnya (Syahbanu *et al.*, 2023). Hasil analisis XRD pada gabah beras hitam varietas Jeliteng yang telah diozonasi menunjukkan adanya puncak difraksi pada sudut 2θ sekitar $15\text{--}18^\circ$ dan $22\text{--}23^\circ$ pada seluruh perlakuan.

Pola ini merupakan karakteristik pati tipe-A yang khas pada serealialia termasuk beras (Moura *et al.*, 2020).

Secara spesifik, pada 0 ppm terdeteksi empat puncak pada 2θ yaitu $15,111^\circ$, $17,119^\circ$, $18,026^\circ$, dan $22,996^\circ$, sedangkan pada perlakuan ozonasi jumlah puncak yang terdeteksi bervariasi antara tiga hingga empat puncak dalam rentang 2θ yang sama. Variasi ini berkaitan dengan perubahan struktural akibat reaksi oksidasi ozon, mengingat tingkat kristalinitas dan intensitas puncak difraksi pati dipengaruhi oleh jumlah daerah kristalin, ukuran kristal, tingkat interaksi antar heliks ganda, serta orientasi heliks ganda dalam daerah kristalin (Cahyono *et al.*, 2021). Menurut Du *et al.*, (2024) ozonasi yang mengoksidasi daerah amorf di sekitar lamela kristalin dapat mengganggu keempat faktor tersebut secara berbeda-beda pada setiap konsentrasi, sehingga menghasilkan intensitas relatif puncak yang bervariasi antar perlakuan.

Meskipun demikian, rentang posisi puncak pada seluruh perlakuan tetap konsisten pada rentang 2θ sekitar $15\text{--}18^\circ$ dan $22\text{--}23^\circ$, yang mengonfirmasi bahwa ozonasi tidak mengubah tipe polimorfisme kristal pati dalam gabah beras hitam Jeliteng. Hal ini sejalan dengan Fang *et al* (2025) yang melaporkan bahwa pati beras ketan yang diozonasi tetap mempertahankan kristalin tipe A meskipun fraksi amorfnya mengalami modifikasi struktural.

Tabel 6. Hasil Data XRD Gabah Beras Hitam

Konsentrasi	% Kristalinitas	% Amorf
0 ppm	24,2%	75,8%
2 ppm	28,6%	71,4%
4 ppm	27,9%	72,1%
6 ppm	28,5%	71,5%
8 ppm	26,7%	73,3%

Berdasarkan tabel 6, diketahui bahwa kristalinitas dari gabah beras hitam sebagai kontrol yaitu 0 ppm sebesar 24,2% dengan proporsi amorf sebesar 75,8%. Nilai ini konsisten dengan karakteristik pati serealialia murni yang memiliki kisaran derajat kristalinitas antara 20% hingga 45% (Buléon *et al.*, 1998), serta selaras dengan

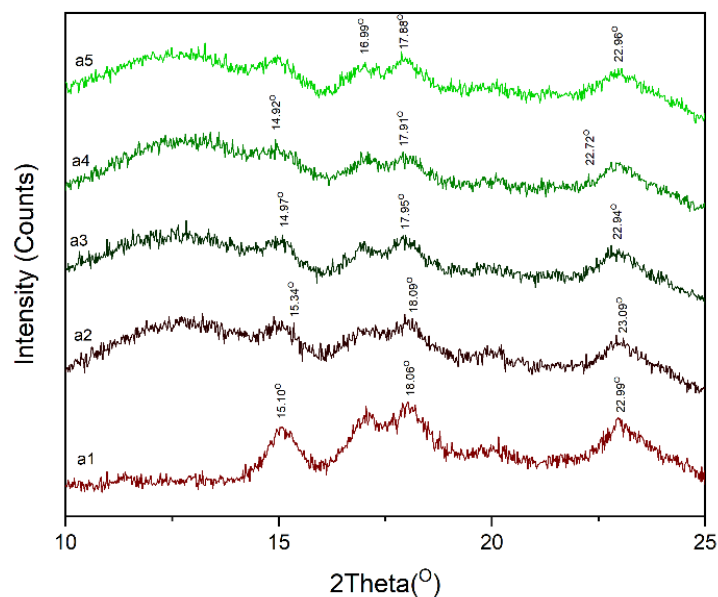
karakteristik tipe-A yang dilaporkan pada pati beras hitam tanpa perlakuan (Moura *et al.*, 2020), sehingga kondisi awal sampel sebelum ozonasi dapat dianggap representatif sebagai acuan perbandingan. Tingginya proporsi amorf pada gabah beras hitam dibandingkan pati murni berkaitan dengan adanya komponen selain pati seperti protein dan serat yang bersifat tidak teratur secara struktural dan ikut teranalisis dalam matriks tepung hasil pengolahan, sehingga berkontribusi pada peningkatan bagian tidak teratur secara keseluruhan (Cahyana *et al.*, 2018).

Perlakuan ozonisasi pada gabah menghasilkan perubahan kristalinitas dan amorf pada seluruh konsentrasi yang dilakukan. Pada konsentrasi 2 ppm, derajat kristalinitas meningkat menjadi 28,6% dengan proporsi amorf 71,4%, merupakan nilai kristalinitas tertinggi di antara seluruh perlakuan. Adanya peningkatan ini mengindikasikan bahwa ozonasi pada gabah utuh tetap memberikan pengaruh terhadap struktur pati di dalam biji. Hal ini diduga terjadi karena ozon sebagai oksidan kuat mampu masuk ke dalam jaringan biji dan bereaksi dengan gugus hidroksil pada granula pati. Ozon yang mencapai granula pati kemudian secara selektif mengoksidasi daerah amorf yang lebih terbuka dan mudah diakses dibandingkan daerah kristalin yang tersusun rapat, sehingga daerah amorf terdegradasi dan proporsi daerah kristalin secara relatif meningkat (Castanha *et al.*, 2017).

Pada konsentrasi 4 ppm, kristalinitas sedikit menurun menjadi 27,9% dengan proporsi amorf 72,1%. Hal ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi ini, gangguan ozon terhadap daerah kristalin granula pati mulai lebih dominan dibandingkan penguraian daerah amorf, sehingga keteraturan susunan kristal ikut terganggu dan kristalinitas relatif menurun (Fang *et al.*, 2025). Pada konsentrasi 6 ppm, kristalinitas tercatat sebesar 28,5% dengan proporsi amorf 71,5%. Nilai ini tidak berbeda jauh dari nilai pada 2 ppm (28,6%) maupun 4 ppm (27,9%), sehingga pada rentang konsentrasi 2 hingga 6 ppm kristalinitas cenderung berada dalam kisaran yang relatif stabil antara 27,9% hingga 28,6%. Kondisi ini diduga terjadi karena pada rentang konsentrasi tersebut, ozon mengurai daerah amorf dan pada saat yang sama juga mulai mengganggu daerah kristalin, sehingga efek keduanya yang berlawanan arah

menyebabkan nilai kristalinitas akhir tidak berubah secara signifikan (Fang *et al.*, 2025).

Pada konsentrasi tertinggi 8 ppm, kristalinitas menurun menjadi 26,7% dengan proporsi amorf 73,3%. Penurunan ini mengindikasikan bahwa pada konsentrasi tinggi, gangguan ozon terhadap daerah kristalin semakin besar sehingga keteraturan susunan kristal granula pati ikut terganggu dan proporsi kristalin relatif menurun (Fang *et al.*, 2025). Meskipun demikian, nilai kristalinitas pada 8 ppm masih lebih tinggi dibandingkan kontrol tanpa ozonasi (24,2%), yang menunjukkan bahwa pengaruh penguraian daerah amorf oleh ozon masih lebih besar secara keseluruhan dibandingkan gangguan pada daerah kristalinnya (Castanha *et al.*, 2017).



Gambar 7. Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf (XRD) Gabah Beras Hitam

Pola fluktuatif pada data kristalinitas ini terjadi karena dua proses yang ditimbulkan ozon berlangsung secara bersamaan dengan efek yang berlawanan. Proses pertama adalah penguraian daerah amorf oleh ozon yang menyebabkan proporsi daerah kristalin secara relatif meningkat, sedangkan proses kedua adalah rusaknya sebagian daerah kristalin oleh ozon yang menyebabkan proporsi kristalin

menurun. Hasil akhir yang terukur bergantung pada seberapa besar masing-masing proses terjadi pada setiap konsentrasi (Fang *et al.*, 2025; Castanha *et al.*, 2017).

Pola tidak linier yang serupa juga dilaporkan pada ozonasi tepung sereal lain, di mana perubahan kristalinitas tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan konsentrasi ozon yang diberikan (Rachmaselly *et al.*, 2020). Perubahan proporsi daerah kristalin dan amorf ini diduga berimplikasi pada sifat fisikokimia gabah beras hitam yang dihasilkan, di mana berkurangnya daerah amorf berpotensi memengaruhi ketahanan pati terhadap gelatinisasi dan hidrolisis, meskipun konfirmasi terhadap hal ini memerlukan pengujian lebih lanjut. Secara keseluruhan, data XRD ini mengonfirmasi bahwa ozonasi pada gabah beras hitam Jeliteng memberikan pengaruh nyata terhadap proporsi daerah kristalin dan amorf pati di dalam biji, meskipun tidak mengubah tipe susunan kristalnya.

4.1.1.2 Analisis Morfologi Granula Pati (*Scanning Electron Microscope*)

SEM berbeda dari mikroskop optik pada umumnya karena alat ini memanfaatkan kumpulan elektron yang bergerak searah secara bersamaan, bukan cahaya tampak, untuk mengamati permukaan suatu bahan. Kumpulan elektron inilah yang selanjutnya disebut berkas elektron. Pada prinsipnya, SEM bekerja dengan mengarahkan aliran elektron berenergi tinggi ke permukaan sampel secara teratur hingga seluruh permukaan sampel terpindai. Semakin terfokus aliran elektron tersebut pada satu titik, semakin tajam dan detail hasil permukaan yang dihasilkan (Sujatno *et al.*, 2015).

Resolusi yang lebih tinggi dibanding mikroskop optik ini disebabkan oleh berkas elektron yang digunakan sebagai sumber yang memiliki panjang gelombang puluhan ribu kali lebih pendek dari panjang gelombang cahaya tampak, sehingga gambar yang dihasilkan memiliki resolusi dan detail gambar yang lebih baik (Sahdiah dan Kurniawan, 2023), termasuk dalam mengamati tekstur permukaan granula pati pada skala mikrometer.

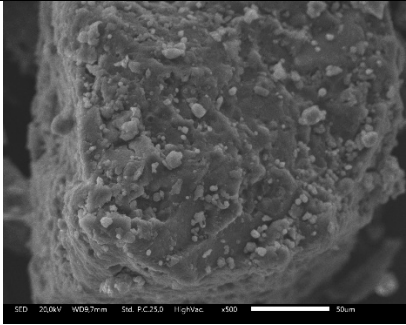
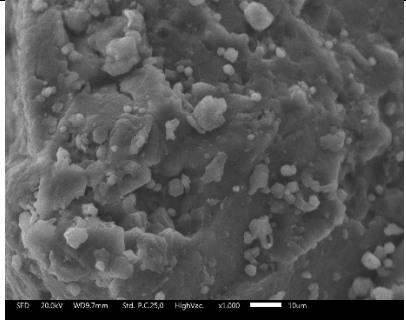
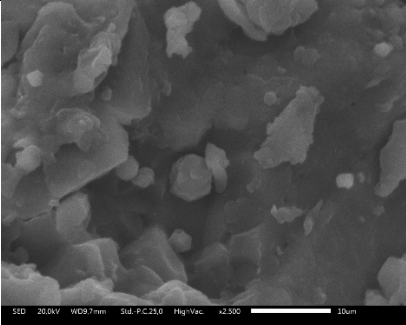
Menurut Goldstein, (2017) prinsip kerja SEM menggunakan elektron yang dipantulkan dari permukaan sampel dan difokuskan oleh lensa elektromagnetik.

Saat elektron mengenai permukaan sampel, interaksi yang terjadi antara elektron dan sampel akan menghasilkan sinyal yang selanjutnya diubah menjadi gambar. Oleh karena itu, SEM merupakan alat yang dapat menghasilkan gambar permukaan suatu benda dengan memanfaatkan berkas elektron yang diarahkan pada sampel.

Preparasi sampel dilakukan dengan cara menempelkan serbuk sampel pada double carbon tape yang berada pada holder. Setelah sampel menempel, udara dihembuskan menggunakan blower ke arah serbuk sampel untuk memastikan bahwa serbuk telah melekat kuat pada permukaan carbon tape. Jika masih terdapat serbuk yang tidak menempel dengan baik, dikhawatirkan serbuk tersebut akan tertarik saat proses vakum berlangsung pada alat SEM (Van Hoten, 2020).

Pengujian SEM pada penelitian ini dilakukan untuk mengamati perubahan morfologi permukaan tepung gabah beras hitam akibat paparan ozon dengan 5 taraf konsentrasi yaitu 0, 2, 4, 6, dan 8 ppm pada perbesaran 500x, 1000x, 2500x untuk masing-masing perlakuan. Hasil dari pengujian SEM adalah gambar dengan warna hitam putih (tanpa warna) karena panjang gelombang yang diperoleh dari elektron pemindai tidak berada pada spektrum cahaya tampak (Masta, N. 2020). Berikut merupakan hasil analisa *Scanning Electron Microscope* (SEM) dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 7. Hasil Analisis *Scanning Electron Microscope* pada 0 ppm

Konsentrasi Ozon	Perbesaran	Gambar Gabah Beras Hitam
0 ppm	500x	
	1000x	
	2500x	

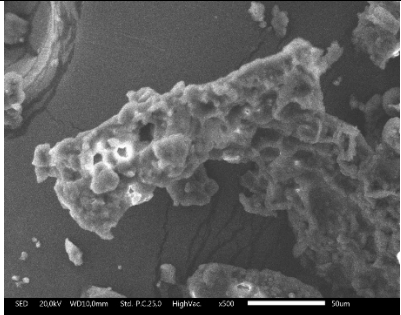
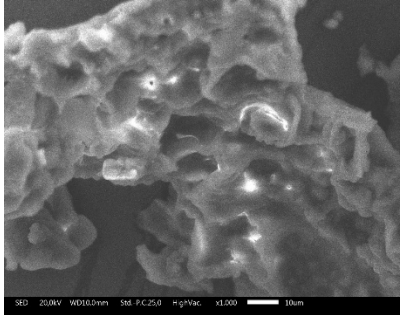
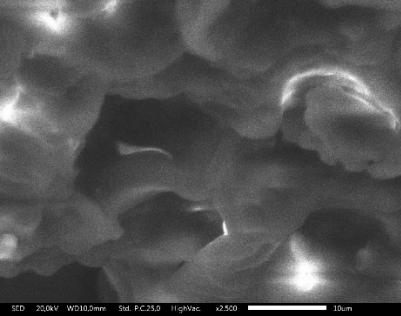
Berdasarkan tabel 7, yang merupakan hasil pengamatan morfologi permukaan gabah beras hitam menggunakan SEM pada konsentrasi 0 ppm, sampel ini digunakan sebagai kontrol yaitu tanpa perlakuan ozon dan dapat diamati sebagai acuan morfologi dasar sebelum terjadi modifikasi. Pada perbesaran 500x, permukaannya memperlihatkan partikel-partikel yang saling berdekatan dan menempel rapat satu sama lain tanpa celah ataupun rongga yang terlihat jelas. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur sampel tanpa perlakuan ozon masih dalam keadaan utuh dan belum mengalami perubahan fisik akibat oksidasi. Granula pati beras secara umum memiliki ukuran berkisar antara 3 hingga 8 μm (Bul  n *et al.*,

1998), dan pada 0 ppm sampel tampak seragam tanpa adanya tanda-tanda fragmentasi maupun kerusakan pada permukaan.

Pada perbesaran 1000x, granula pati beras hitam tanpa perlakuan ozon tampak berbentuk polihedral tidak beraturan dengan tepi yang jelas, kondisi ini sesuai dengan karakteristik morfologi granula pati beras alami yang umumnya menunjukkan bentuk polihedral tidak beraturan dengan tepi yang jelas pada berbagai varietas beras (Lin *et al.*, 2023). Kondisi ini menunjukkan bahwa seluruh granula masih dalam keadaan utuh sebelum terjadinya modifikasi akibat oksidasi.

Pada perbesaran 2500x, granula individual dapat diamati dengan lebih jelas dan memperlihatkan variasi bentuk dengan permukaan yang masih relatif mulus. Tidak ditemukan adanya retakan maupun perubahan tekstur permukaan yang mengindikasikan terjadinya oksidasi. Kondisi morfologi yang masih utuh pada seluruh tingkat perbesaran ini menjadi dasar pembandingan yang penting untuk mengetahui perubahan yang terjadi pada perlakuan berbagai konsentrasi ozon.

Tabel 8. Hasil Analisis *Scanning Electron Microscope* pada 2 ppm

Konsentrasi Ozon	Perbesaran	Gambar Gabah Beras Hitam
2 ppm	500x	
	1000x	
	2500x	

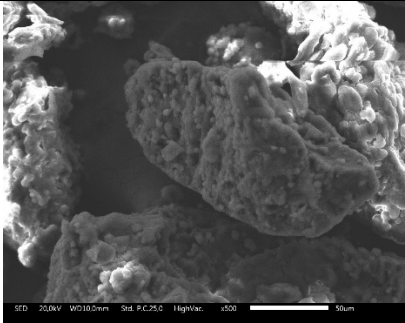
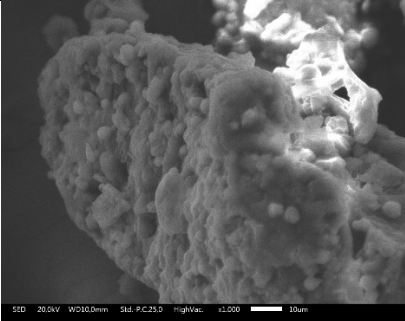
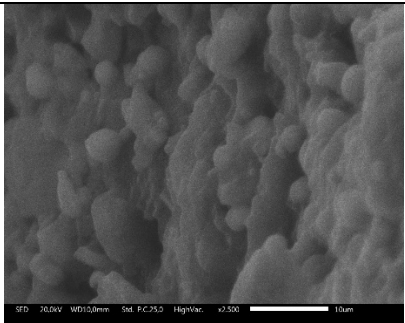
Berdasarkan tabel 8, yang merupakan hasil pengamatan morfologi permukaan gabah beras hitam menggunakan SEM pada konsentrasi 2 ppm, terlihat perubahan morfologi yang mulai nyata dibandingkan sampel kontrol. Pada perbesaran 500x, struktur partikel sampel terlihat lebih terbuka dengan munculnya celah dan rongga yang tidak ditemukan pada sampel kontrol. Permukaan yang sebelumnya rapat kini tampak lebih longgar dengan beberapa bagian yang terpisah membentuk serpihan. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa ozon mulai berinteraksi dengan komponen penyusun bahan. Menurut Tiwari *et al* (2010), ozon merupakan oksidator kuat dengan potensial oksidasi sebesar 2,07 V sehingga mampu mengoksidasi berbagai senyawa organik termasuk polisakarida dan protein. Reaksi oksidasi tersebut

menyebabkan sebagian ikatan antarmolekul melemah sehingga agregat partikel menjadi lebih longgar dan kurang kompak dibandingkan sampel kontrol (0 ppm).

Pada perbesaran 1000x, rongga-rongga terbuka terlihat semakin jelas dan permukaan granula menunjukkan lekukan-lekukan yang mulai terbentuk. Beberapa granula tampak menyatu membentuk agregat dengan permukaan yang tidak rata. Castanha *et al* (2017) menjelaskan bahwa oksidasi awal oleh ozon pada pati cenderung menyerang daerah amorf yang menjadi pengikat antar lamela granula, sehingga menyebabkan pelemahan dan pembukaan struktur yang terlihat sebagai rongga dan ketidakrataan permukaan.

Pada perbesaran 2500x, granula terlihat lebih besar dengan permukaan yang bergelombang dan berlekuk. Perubahan ini merupakan kelanjutan dari proses oksidasi yang sudah mulai terjadi di daerah amorf permukaan granula, sebagaimana dijelaskan oleh Castanha *et al* (2017), sehingga perubahan morfologi sudah dapat terdeteksi secara visual meskipun konsentrasi ozon yang digunakan masih tergolong rendah.

Tabel 9. Hasil Analisis *Scanning Electron Microscope* pada 4 ppm

Konsentrasi Ozon	Perbesaran	Gambar Gabah Beras Hitam
4 ppm	500x	
	1000x	
	2500x	

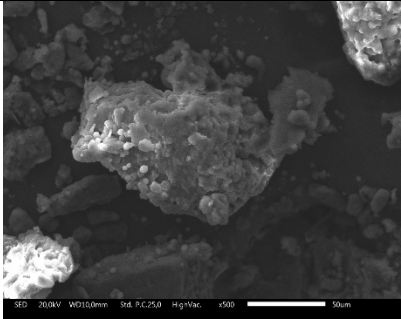
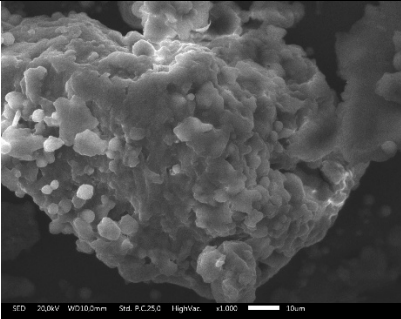
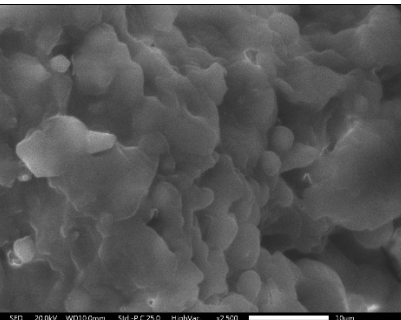
Berdasarkan tabel 9, yang merupakan hasil pengamatan morfologi permukaan gabah beras hitam menggunakan SEM pada konsentrasi 4 ppm, perubahan morfologi yang terjadi lebih jelas dan lebih luas dibandingkan konsentrasi 2 ppm, ditandai dengan munculnya agregat berukuran lebih besar dan kekasaran permukaan yang semakin meningkat. Pada perbesaran 500x, tampak partikel-partikel berukuran besar dengan permukaan bergelombang dan tidak beraturan, dikelilingi granula-granula kecil yang menempel di sekitarnya membentuk struktur agregat yang kompleks. Castanha *et al* (2017) menjelaskan bahwa peningkatan konsentrasi ozon mendorong reaksi oksidasi yang semakin intensif pada daerah amorf granula pati, sehingga menghasilkan perubahan struktural yang lebih

kompleks dibandingkan konsentrasi rendah. Hal ini sejalan dengan yang dilaporkan oleh El-desouky (2025) bahwa ozonasi menyebabkan granula pati menunjukkan permukaan yang kasar serta struktur yang lebih berpori dibandingkan pati tanpa perlakuan, meskipun pada penelitian tersebut menggunakan pati jagung sebagai bahan utamanya.

Pada perbesaran 1000x, permukaan tepung menunjukkan kekasaran yang sangat tinggi dengan tonjolan-tonjolan kecil yang tersebar merata dan padat di seluruh permukaan partikel, jauh lebih tinggi dibandingkan konsentrasi 2 ppm. Castanha *et al* (2017) menjelaskan bahwa kekasaran permukaan granula pati meningkat akibat ozonisasi, karena ozon memutus ikatan-ikatan kimia pada daerah amorf di permukaan granula, sehingga rantai-rantai pati yang sebelumnya terikat menjadi tidak teratur dan tampak sebagai tonjolan serta ketidakrataan permukaan yang semakin nyata seiring meningkatnya konsentrasi ozon.

Pada perbesaran 2500x, granula-granula kecil berbentuk bulat tampak tersusun sangat rapat dan lebih seragam ukurannya dibandingkan perlakuan sebelumnya. Kondisi ini kemungkinan terjadi karena serangan ozon yang semakin intensif pada daerah amorf granula menyebabkan ikatan antar granula melemah, sehingga granula-granula yang sebelumnya saling menempel erat kini tampak lebih terpisah dan lebih seragam ketika diamati pada SEM. Castanha *et al* (2017) menyatakan bahwa daerah amorf granula pati merupakan target utama serangan ozon karena memiliki kerapatan struktural lebih rendah dibandingkan daerah kristalin, sehingga lebih mudah diakses dan didegradasi pada konsentrasi ozon yang lebih tinggi.

Tabel 10. Hasil Analisis *Scanning Electron Microscope* pada 6 ppm

Konsentrasi Ozon	Perbesaran	Gambar Gabah Beras Hitam
6 ppm	500x	
	1000x	
	2500x	

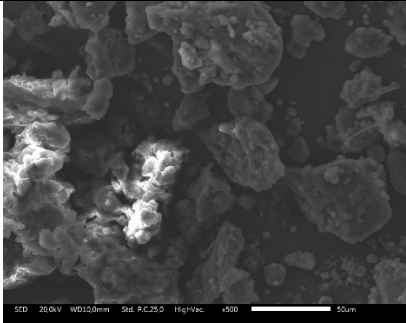
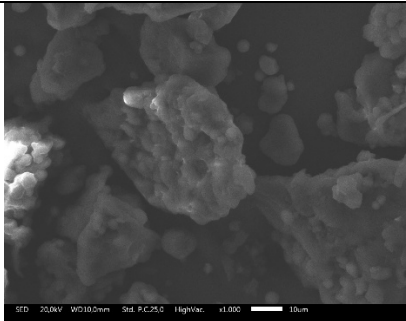
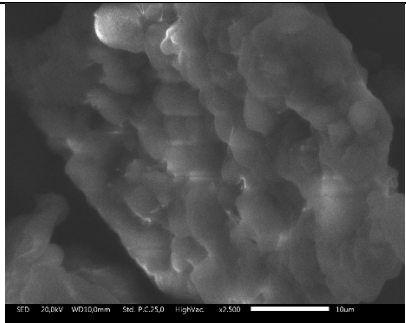
Berdasarkan tabel 10, yang merupakan hasil pengamatan morfologi permukaan gabah beras hitam menggunakan SEM pada konsentrasi 6 ppm, perubahan morfologi yang terjadi menunjukkan karakteristik yang berbeda dibandingkan konsentrasi 4 ppm. Pada perbesaran 500x, tampak partikel berukuran besar dengan permukaan kasar disertai fragmen-fragmen kecil yang tersebar di sekitar partikel utama. Kehadiran fragmen-fragmen ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi 6 ppm mulai terjadi pemecahan partikel yang lebih nyata dibandingkan konsentrasi sebelumnya. Castanha *et al* (2017) menjelaskan bahwa semakin tinggi intensitas oksidasi ozon, pemutusan ikatan pada daerah amorf granula semakin intensif

sehingga partikel yang sebelumnya masih utuh mulai mengalami pemecahan menjadi fragmen yang lebih kecil.

Pada perbesaran 1000x, permukaan partikel tepung menunjukkan tekstur kasar yang penuh tonjolan kecil padat, serupa dengan yang diamati pada konsentrasi 4 ppm. Sumardiono *et al* (2021) melaporkan bahwa kerusakan pada granula pati yang diozonisasi terutama terjadi pada struktur bagian luar granula karena permukaan granula lebih mudah diakses oleh ozon dibandingkan bagian dalamnya yang lebih kristalin, sehingga kekasaran permukaan yang teramati mencerminkan degradasi yang berlangsung dari luar ke dalam granula secara bertahap.

Pada perbesaran 2500x, granula tampak berukuran lebih besar dibandingkan granula seragam-kecil yang teramati pada konsentrasi 4 ppm, dengan sebagian permukaan mulai terlihat lebih halus dibandingkan bagian lainnya yang masih kasar. Perubahan ini dapat dikaitkan dengan proses oksidasi yang terus berlanjut pada daerah amorf granula, yaitu bagian granula yang strukturnya lebih longgar dan lebih mudah diserang ozon dibandingkan bagian kristalin yang lebih rapat. Castanha *et al* (2017) menjelaskan bahwa oksidasi oleh ozon terutama terjadi di daerah amorf granula pati karena daerah tersebut lebih mudah diakses dibandingkan daerah kristalinnya, sehingga pada konsentrasi yang lebih tinggi degradasi di daerah amorf ini dapat menyebabkan perubahan tampilan permukaan granula yang tidak merata di seluruh bagian.

Tabel 11. Hasil Analisis *Scanning Electron Microscope* pada 8 ppm

Konsentrasi Ozon	Perbesaran	Gambar Gabah Beras Hitam
8 ppm	500x	
	1000x	
	2500x	

Berdasarkan tabel 11, yang merupakan hasil pengamatan morfologi permukaan gabah beras hitam menggunakan SEM pada konsentrasi 8 ppm, morfologi yang teramati menunjukkan karakteristik tersendiri dibandingkan konsentrasi 6 ppm. Pada perbesaran 500x, populasi partikel tepung terlihat lebih beragam ukurannya dengan fragmen-fragmen kecil yang tersebar di antara partikel utama. Keberagaman ukuran ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi 8 ppm, proses pemecahan partikel oleh ozon sudah berlangsung lebih luas dibandingkan konsentrasi sebelumnya. Castanha *et al* (2017) menjelaskan bahwa semakin tinggi konsentrasi ozon yang diberikan, semakin banyak bagian granula yang mengalami

pemutusan ikatan, sehingga distribusi ukuran partikel menjadi lebih bervariasi akibat fragmentasi yang tidak merata.

Pada perbesaran 1000x, salah satu temuan menarik adalah munculnya partikel dengan bentuk menyerupai cincin, yaitu adanya rongga di bagian tengah partikel sementara bagian tepinya masih terlihat utuh. Sumardiono *et al* (2021) melaporkan bahwa beberapa granula pati yang diozonisasi mengalami erosi pada bagian tertentu disertai munculnya retakan dan pori pada permukaan, sementara bagian tepi granula yang tersisa membentuk struktur tidak beraturan. Kerusakan tersebut umumnya hanya terjadi pada struktur bagian luar granula karena permukaan granula lebih mudah dijangkau ozon dibandingkan bagian dalamnya. Struktur menyerupai cincin yang teramati pada konsentrasi 8 ppm ini menunjukkan bahwa pada tingkat konsentrasi tertinggi, degradasi granula sudah cukup intensif sehingga sebagian rongga bagian dalam ikut terlihat, sementara di sisi lain bagian tepi granula masih relatif bertahan.

Pada perbesaran 2500x, granula tepung tampak berbentuk oval hingga bulat dengan permukaan bergelombang namun relatif mulus, berbeda dari granula kecil-kecil seragam yang teramati pada konsentrasi 4 ppm. Perbedaan ini dapat dijelaskan sebagai akibat dari proses oksidasi yang sudah berlangsung lama sehingga bagian permukaan yang kasar pada tahap sebelumnya kembali tererosi dan menghasilkan permukaan yang tampak lebih rata meskipun bentuk granula sudah berubah dari kondisi awalnya.

Secara keseluruhan, pengamatan SEM pada seluruh konsentrasi menunjukkan bahwa ozonisasi memberikan pengaruh terhadap morfologi permukaan gabah beras hitam, dengan pola perubahan yang tidak meningkat secara seragam mengikuti kenaikan konsentrasi. Pada konsentrasi 2 ppm, perubahan yang terjadi berupa munculnya pori dan perubahan permukaan granula. Pada konsentrasi 4 ppm, kekasaran permukaan tampak paling tinggi dengan granula-granula kecil yang tersusun rapat dan seragam. Pada konsentrasi 6 dan 8 ppm, granula yang teramati cenderung lebih besar dengan sebagian permukaan yang mulai tampak lebih halus, namun populasi partikel menjadi lebih beragam ukurannya.

Pola ini dapat dikaitkan dengan mekanisme dasar interaksi ozon dengan granula pati. Castanha *et al* (2017) menjelaskan bahwa ozon terutama menyerang daerah amorf granula pati karena daerah tersebut memiliki kerapatan struktural lebih rendah dan lebih mudah diakses dibandingkan daerah kristalin. Kemudian Sumardiono *et al* (2021) menjelaskan bahwa kerusakan akibat ozonisasi pada granula pati umumnya terjadi di struktur bagian luar granula, ditandai dengan munculnya retakan dan pori pada permukaan, karena bagian luar granula lebih mudah dijangkau ozon dibandingkan bagian dalamnya.

Dapat diketahui bahwa ozonisasi pada penelitian ini dilakukan dalam keadaan gabah, sehingga ozon harus menembus lapisan sekam dan perikarp terlebih dahulu sebelum mencapai endosperma tempat granula pati berada. Kondisi ini dapat menjadi salah satu faktor yang membuat distribusi efek oksidatif antar butir gabah tidak seragam, sehingga morfologi yang teramati pada konsentrasi yang lebih tinggi tidak selalu menunjukkan pola kerusakan yang lebih intens dibandingkan konsentrasi menengah.

Hasil serupa juga dilaporkan pada penelitian pati singkong yang diozonisasi, di mana granula pati hasil oksidasi menunjukkan struktur granular yang lebih buruk dibandingkan pati alami. Kondisi ini dikaitkan dengan muatan elektronegatif dari gugus karbonil dan karboksil yang terbentuk selama oksidasi, serta pemutusan sebagian ikatan glikosidik akibat reaksi dengan ozon (Satmalawati *et al.*, 2020).

Secara keseluruhan, hasil analisis SEM pada penelitian ini menunjukkan bahwa paparan ozon memberikan pengaruh nyata terhadap morfologi permukaan gabah beras hitam pada setiap konsentrasi yang dilakukan. Perubahan morfologi yang teramati secara visual pada analisis SEM berkaitan dengan parameter kadar pati, FTIR, dan XRD, sehingga analisis SEM dapat berfungsi sebagai data pendukung visual yang melengkapi pemahaman terhadap perubahan struktural dan kimiawi akibat paparan ozon.

4.1.1.3 Analisis Profil Gelatinisasi (*Rapid Visco Analyzer*)

Rapid Visco Analyzer merupakan instrumen yang mengukur perubahan viskositas suspensi tepung selama siklus pemanasan, penahanan suhu, dan pendinginan yang terprogram, sehingga menghasilkan kurva pasting yang mencerminkan perilaku gelatinisasi dan retrogradasi pati (Du *et al.*, 2024). Pada penelitian ini, tujuh parameter RVA dianalisis pada gabah beras hitam varietas Jeliteng dalam bentuk beras pecah kulit yang sudah dijadikan tepung dan memiliki lima taraf konsentrasi ozon, tujuh parameter RVA yaitu *peak viscosity*, *trough* atau *hot paste viscosity*, *breakdown*, *final viscosity*, *setback*, *peak time*, dan *pasting temperature*.

Tabel 12. Hasil Data Analisis *Rapid Visco Analyzer* (RVA)

Parameter	P0 (0 ppm)	P1 (2 ppm)	P2 (4 ppm)	P3 (6 ppm)	P4 (8 ppm)
<i>Peak Viscosity</i> (cP)	1218 ± 7,00 ^c	528 ± 5,00 ^a	582 ± 5,00 ^b	837 ± 6,00 ^c	904 ± 8,00 ^d
<i>Trough</i> (cP)	889 ± 6,00 ^c	341 ± 5,00 ^a	374 ± 4,00 ^b	573 ± 6,00 ^d	512 ± 8,00 ^c
<i>Breakdown</i> (cP)	329 ± 7,00 ^d	187 ± 4,00 ^a	208 ± 5,00 ^b	264 ± 5,00 ^c	392 ± 8,00 ^e
<i>Final Viscosity</i> (cP)	1451 ± 11,00 ^d	665 ± 6,00 ^a	725 ± 7,00 ^b	1090 ± 8,00 ^c	2053 ± 11,00 ^e
<i>Setback</i> (cP)	562 ± 8,00 ^d	324 ± 5,00 ^a	351 ± 5,00 ^b	517 ± 5,00 ^c	1541 ± 10,00 ^e
<i>Peak Time</i> (menit)	5,4 ± 0,3 ^c	5,0 ± 0,3 ^a	5,0 ± 0,2 ^a	5,2 ± 0,3 ^b	7,0 ± 0,4 ^d
<i>Pasting Temperature</i> (°C)	71,3 ± 0,80 ^a	83,2 ± 0,50 ^c	82,35 ± 0,40 ^b	84,0 ± 0,60 ^d	90,7 ± 0,70 ^e

Keterangan: ± merupakan standar deviasi dari tiga kali ulangan. Nilai yang ditandai dengan huruf yang berbeda menunjukkan berbeda nyata pada taraf 5% menurut Uji Lanjut Duncan.

Nilai rata-rata pada Tabel 12 diperoleh dari tiga kali ulangan pengukuran pada setiap taraf konsentrasi ozon, sebagaimana disajikan secara lengkap pada Lampiran 16. Data ulangan tersebut kemudian dianalisis menggunakan ANAVA dan uji lanjut Duncan. Hasil ANAVA menunjukkan bahwa seluruh tujuh parameter berpengaruh nyata terhadap perlakuan konsentrasi ozon, dengan nilai F hitung lebih besar dari F tabel pada taraf 5%. Uji lanjut Duncan pada keenam parameter *yaitu pasting temperature, peak viscosity, trough, breakdown, final viscosity, dan setback* menunjukkan bahwa kelima taraf konsentrasi ozon seluruhnya berbeda nyata antara satu sama lain. Pengecualian hanya terjadi pada parameter *peak time*, yaitu taraf 2 ppm dan 4 ppm yang tidak berbeda nyata karena keduanya menghasilkan rata-rata yang identik sebesar 5,0 menit. Hasil uji statistik ini memperkuat bahwa pola perubahan viskositas yang dibahas pada tiap fase gelatinisasi berikut dipengaruhi oleh perlakuan konsentrasi ozon.

Fase Awal Gelatinisasi: *Pasting Temperature* dan *Peak Time*

Pasting temperature adalah suhu saat viskositas suspensi mulai naik secara signifikan, menandai titik ketika granula pati mulai menyerap air dalam jumlah besar dan kehilangan struktur kristalinnya, sedangkan *peak time* adalah waktu yang dibutuhkan untuk mencapai viskositas puncak (Du et al., 2024). Kedua parameter ini menunjukkan kecenderungan meningkat seiring naiknya konsentrasi ozon. *Pasting temperature* naik tajam dari 71,3°C pada P0 menjadi 83,2°C pada P1, kemudian relatif stabil pada kisaran 82 hingga 84°C untuk P1 sampai P3, sebelum kembali melonjak menjadi 90,7°C pada P4. Pola serupa terlihat pada *peak time* yang relatif stabil di kisaran 5,0 hingga 5,4 menit untuk P0 sampai P3, namun memanjang menjadi 7,0 menit pada P4, yaitu hampir bersamaan dengan berakhirnya tahap penahanan suhu tinggi dan dimulainya tahap pendinginan pada program RVA yang digunakan.

Peningkatan suhu gelatinisasi pada awalnya tampak berlawanan dengan pemahaman umum mengenai pati teroksidasi, sebab oksidasi biasanya melemahkan struktur granula sehingga air lebih mudah masuk dan suhu gelatinisasi akan menurun. Namun perlu diketahui bahwa ozonisasi pada penelitian ini diterapkan

pada gabah utuh dengan sekam yang masih melekat, bukan pada pati murni yang terisolasi. Ozon bersifat sangat reaktif dan cenderung bereaksi terlebih dahulu dengan lapisan luar biji seperti sekam, perikarp, dan lapisan aleuron sebelum mampu menembus ke bagian endosperm yang menyimpan sebagian besar pati (Wang *et al.*, 2016). Pada gandum utuh yang diozonisasi, menurut Gozé *et al* (2016) melaporkan bahwa pati di bagian dalam biji relatif tidak banyak berubah pada dosis rendah hingga sedang, dan perubahan sifat reologi yang teramati pada tepung *whole grain* lebih banyak disebabkan oleh oksidasi protein serta komponen non pati lainnya dibandingkan oksidasi pati itu sendiri.

Kenaikan *pasting temperature* yang teramati pada penelitian ini kemungkinan besar bukan berasal dari perubahan pada pati itu sendiri. Dugaan ini muncul karena polanya tidak sejalan dengan pola kristalinitas hasil XRD, yang menurun setelah P1. Perubahan *pasting temperature* ini mungkin disebabkan oleh oksidasi pada protein di permukaan granula atau komponen non pati lain akibat ozon. Menurut Wang *et al.* (2016) melaporkan bahwa ozonisasi pada gandum utuh dapat memicu pembentukan ikatan silang antar molekul protein melalui gugus disulfida. Protein yang saling terikat seperti ini membentuk jaringan yang lebih rapat, sehingga air butuh suhu lebih tinggi untuk bisa menembusnya dan mencapai pati di baliknya.

Pola ini sejalan dengan temuan Ramos *et al* (2024) pada pati quinoa yang menunjukkan peningkatan suhu onset gelatinisasi setelah ozonisasi, serta konsisten dengan konsep keseimbangan antara ikatan silang akibat oksidasi dan depolimerisasi yang dikemukakan Du *et al* (2024), di mana pada durasi atau dosis tertentu efek ikatan silang dapat lebih dominan dibandingkan efek pemutusan rantai. Lonjakan tajam yang baru terlihat pada P4 mengindikasikan bahwa efek ikatan silang permukaan ini terus terakumulasi seiring meningkatnya konsentrasi ozon, hingga mencapai titik di mana penghambatan penyerapan air menjadi sangat nyata.

Fase Pengembangan Granula: *Peak Viscosity*, *Trough*, dan *Breakdown*

Peak viscosity menggambarkan viskositas tertinggi yang dicapai saat granula pati mengembang maksimal akibat penyerapan air, dan mencerminkan kapasitas mengikat air dari pati (Du *et al.*, 2024). *Trough*, yang juga dikenal sebagai *hot paste viscosity* atau *holding strength*, adalah viskositas minimum yang terukur selama fase penahanan suhu tinggi, ketika granula yang telah pecah mengalami gesekan mekanis berkelanjutan dari dayung yang berputar. *Breakdown* merupakan selisih antara *peak viscosity* dan *trough*, dan mencerminkan tingkat kerentanan granula terhadap kerusakan akibat kombinasi panas dan gaya geser (Du *et al.*, 2024).

Ketiga parameter ini menunjukkan pola yang serupa pada tahap awal, yaitu penurunan tajam dari P0 ke P1, dengan *peak viscosity* turun dari 1218 cP menjadi 528 cP dan *trough* turun dari 889 cP menjadi 341 cP. Penurunan drastis pada dosis ozon terendah ini konsisten dengan mekanisme oksidasi awal, di mana ozon mulai mensubstitusi gugus hidroksil pada karbon C2, C3, dan C6 unit glukosa menjadi gugus karbonil dan karboksil (Maqbool *et al.*, 2024). Proses ini turut memicu pemutusan sebagian ikatan glikosidik pada daerah amorf granula, sehingga sebagian struktur pati mengalami depolimerisasi pada saat dosis rendah dan menurunkan kapasitas granula untuk mengembang secara utuh.

Setelah penurunan, *peak viscosity* dan *trough* meningkat kembali secara bertahap dari P1 menuju P4, meskipun tidak kembali menyamai nilai kontrol P0. Pola meningkat kembali ini dapat dijelaskan melalui akumulasi gugus karboksil yang bersifat progresif terhadap dosis ozon. Semakin tinggi konsentrasi ozon yang diberikan, semakin banyak gugus karboksil bermuatan negatif yang terbentuk pada rantai pati, dan muatan negatif ini saling tolak menolak sehingga meningkatkan kemampuan granula untuk mengembang saat pemanasan berlangsung (Wang *et al.*, 2016). Dengan demikian, pada rentang P1 sampai P4 terjadi pergeseran keseimbangan antara efek pelemahan akibat depolimerisasi dan efek penguatan pengembangan akibat tolakan elektrostatis gugus karboksil, dan efek kedua ini menjadi semakin dominan seiring bertambahnya dosis.

Pola *breakdown* pada P4 berbeda arah dibandingkan tiga taraf sebelumnya. Nilai *breakdown* P4 mencapai 392 cP, lebih tinggi dibandingkan kontrol P0 sebesar 329 cP, sementara *breakdown* pada P1 sampai P3 selalu berada di bawah nilai kontrol. Temuan ini selaras dengan laporan Wang *et al* (2016) pada pati gandum, yang mencatat peningkatan *swelling power* sekaligus peningkatan *breakdown* RVA pada pati hasil ozonisasi. Granula pada P4 diduga mengembang lebih besar akibat tolakan elektrostatis yang sudah dijelaskan sebelumnya. Namun, integritas struktural granula tersebut sudah banyak melemah akibat akumulasi kerusakan oksidatif pada daerah amorf. Akibatnya, granula yang membengkak ini menjadi lebih mudah pecah saat terus menerus terkena gaya geser selama fase penahanan suhu tinggi, dibandingkan granula kontrol yang belum teroksidasi.

Fase Pendinginan: *Final Viscosity* dan *Setback*

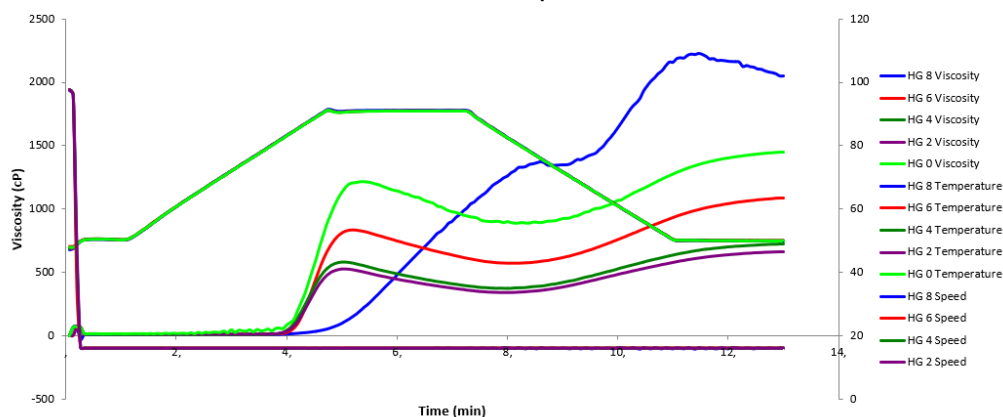
Final viscosity adalah viskositas yang terukur pada akhir siklus pendinginan, sedangkan *setback* merupakan selisih antara *final viscosity* dan *trough*. Kedua parameter ini mencerminkan kecenderungan retrogradasi, yaitu proses reasosiasi molekul amilosa dan fragmen amilopektin rantai pendek yang telah keluar dari granula menjadi struktur yang lebih teratur kembali melalui pembentukan ikatan hidrogen antar rantai selama pendinginan (Du *et al.*, 2024).

Perubahan pada fase ini menunjukkan persentase kenaikan terbesar di antara seluruh parameter RVA pada penelitian ini. Setelah penurunan tajam dari P0 ke P1, baik *final viscosity* maupun *setback* menunjukkan kecenderungan naik dari P1 menuju P4. Pada P4, kedua nilai ini bahkan melampaui kontrol. *Final viscosity* P4 mencapai 2053 cP, lebih tinggi 41,5% dibandingkan kontrol. *Setback* P4 mencapai 1541 cP, meningkat 174,2% dibandingkan kontrol dan hampir tiga kali lipat dibandingkan P3.

Pada pati terisolasi, gugus karboksil hasil oksidasi umumnya menghambat reasosiasi rantai pati melalui halangan sterik dan tolakan muatan. Akibatnya, nilai *setback* cenderung menurun setelah ozonisasi, seperti yang dilaporkan Subroto *et al* (2022) pada pati garut yang dimodifikasi dengan ozon. Pola berlawanan yang

terlihat pada P4 penelitian ini diduga berkaitan dengan karakteristik ozonisasi pada gabah utuh yang sudah dibahas sebelumnya (Gozé *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2016). Selama P0 hingga P3, lapisan sekam dan bekatul diduga masih memberikan perlindungan terhadap fraksi pati di bagian endosperm, sehingga perubahan yang teramati pada RVA lebih banyak berasal dari modifikasi komponen permukaan.

Pada konsentrasi tertinggi 8 ppm, paparan oksidatif diduga sudah cukup kuat untuk menembus lebih jauh dan memengaruhi fraksi pati secara langsung. Pola ini konsisten dengan Liu *et al* (2026), yang melaporkan bahwa depolimerisasi menjadi mekanisme dominan pada dosis ozon yang lebih tinggi. Rantai rantai pendek hasil depolimerisasi memiliki mobilitas molekuler yang lebih tinggi, sehingga lebih mudah keluar dari granula saat pemanasan dan lebih cepat membentuk kembali ikatan hidrogen antar rantai saat suhu diturunkan (Du *et al.*, 2024), menghasilkan lonjakan *setback* dan *final viscosity* yang tajam.



Gambar 8. Grafik RVA Profil Gelatinisasi (RVA) Gabah Beras Hitam

Pola peningkatan *final viscosity* dan *setback* akibat ozon pada sistem biji utuh sudah pernah dilaporkan pada penelitian lain, meskipun bukan pada perlakuan pascapanen seperti penelitian ini. Hu *et al* (2025) melaporkan bahwa paparan ozon pada gabah beras selama fase pengisian biji menghasilkan peningkatan pada viskositas maksimum, viskositas minimum, *final viscosity*, *setback*, dan *peak time* pada profil RVA beras pecah kulit, sebuah pola yang searah dengan temuan penelitian ini, meskipun paparannya berupa ozon atmosferik selama pertumbuhan tanaman, bukan ozonisasi pascapanen pada gabah yang sudah dipanen. Sawada *et*

al (2016) turut melaporkan peningkatan *breakdown* dan sedikit peningkatan *pasting temperature* pada kultivar beras tertentu akibat paparan ozon serupa.

Kedua penelitian ini menggunakan spesies padi yang sama namun tahap dan cara paparan ozon yang berbeda dari penelitian ini. Kesamaan arah perubahan ini memperkuat dugaan bahwa pola yang teramati pada penelitian ini berkaitan dengan karakteristik biji padi yang masih memiliki sekam dan lapisan luar utuh.

Hasil penelitian RVA dapat dibandingkan dengan hasil XRD yang telah diperoleh sebelumnya, di mana kristalinitas justru naik tajam dari P0 sebesar 24,2% menjadi P1 sebesar 28,6%, kemudian menurun bertahap hingga P4 sebesar 26,7%, namun nilai P4 tetap berada di atas kontrol. Pola XRD berbeda arah dengan pola RVA yang menunjukkan pembalikan paling besar justru pada P4. Perbedaan ini dapat diterima secara ilmiah karena kedua metode mengukur aspek struktural yang berbeda. XRD mencerminkan derajat keteraturan pada daerah kristalin yang didominasi oleh *double helix* rantai amilopektin, sedangkan pasting pada RVA lebih banyak ditentukan oleh penetrasi air, mobilitas rantai yang telah keluar dari granula, dan interaksi pada daerah amorf. Karena ozon diketahui bereaksi lebih banyak pada daerah amorf granula pati dibandingkan daerah kristalin (Du *et al.*, 2024), kristalinitas total yang terukur melalui XRD dapat relatif terjaga meskipun terjadi depolimerisasi signifikan pada daerah amorf yang kemudian tampak sebagai lonjakan *setback* pada RVA.

Hasil RVA ini juga secara konseptual berkaitan dengan kadar pati total yang telah dibahas pada sub bab sebelumnya, mengingat viskositas pasting pada dasarnya merupakan fungsi langsung dari jumlah dan integritas fraksi pati dalam gabah beras hitam yang telah disesuaikan menjadi tepung dalam bentuk beras pecah kulit. Demikian pula, apabila spektrum FTIR menunjukkan intensitas serapan gugus karbonil atau karboksil yang meningkat secara jelas pada P4 dibandingkan perlakuan lain, hal tersebut akan menjadi bukti pendukung pada sub bab ini. Begitu pula jika gambar SEM pada perbesaran 1000 kali memperlihatkan permukaan granula P4 yang lebih poros, retak, atau hancur dibandingkan perlakuan lain,

temuan tersebut akan memperkuat argumen bahwa integritas granula pada dosis tertinggi memang lebih melemah.

4.1.2 Respon Kimia

Analisis kimia yang dilakukan pada penelitian utama yaitu analisis kadar air dengan menggunakan metode gravimetri, analisis kadar pati dengan menggunakan metode *Luff Schrool*, analisis kadar antosianin dengan menggunakan metode *pH-Differensial*, analisis aktivitas air dengan menggunakan alat aw meter, analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) menggunakan FTIR Nicolet iS5.

4.1.2.1 Analisis Kadar Air

Kadar air merupakan salah satu parameter kimia yang penting dalam menentukan mutu dan daya simpan gabah maupun beras. Kadar air yang tinggi dapat mempercepat pertumbuhan mikroorganisme, dan meningkatkan risiko kerusakan selama penyimpanan. Sebaliknya, jika kadar air terlalu rendah dapat menyebabkan beras menjadi lebih rapuh dan meningkatkan presentase butir patah selama proses penggilingan. Oleh karena itu pengendalian kadar air merupakan faktor penting dalam mempertahankan kualitas gabah dan beras selama penyimpanan maupun pengolahan (Kamsiati *et al.*, 2018).

Berdasarkan hasil analisis kadar air pada gabah beras hitam yang diberi perlakuan ozon dengan konsentrasi 0, 2, 4, 6, dan 8 ppm menunjukkan nilai rata-rata berkisar antara 11,540% hingga 11,727%. Nilai tertinggi diperoleh pada perlakuan konsentrasi ozon 6 ppm sebesar 11,727%, sedangkan nilai terendah terdapat pada perlakuan 8 ppm sebesar 11,540%.

Menurut Hasil Tabel ANAVA pada lampiran 12, menunjukkan bahwa perlakuan ozon tidak berpengaruh nyata terhadap kadar air gabah beras hitam, baik pada faktor perlakuan ($F_{hitung} 0,057 < F_{tabel} 3,84$) maupun pada faktor kelompok ($F_{hitung} 0,263 < F_{tabel} 4,46$). Hal ini menunjukkan bahwa variasi konsentrasi ozon dari 0 hingga 8 ppm selama 30 menit tidak menyebabkan perubahan yang signifikan pada kadar air gabah beras hitam.

Tabel 13. Hasil Analisis Kadar Air

Konsentrasi Ozon	Rata-Rata Respon
0 ppm	11,669 $\pm$ 0,430
2 ppm	11,681 $\pm$ 0,561
4 ppm	11,647 $\pm$ 0,374
6 ppm	11,727 $\pm$ 0,578
8 ppm	11,540 $\pm$ 0,345

Keterangan: $\pm$ merupakan standar deviasi dari tiga kali ulangan.

Berdasarkan SNI 6128:2020 menyatakan bahwa nilai kadar air yang diperoleh dari semua perlakuan berada dibawah batas maksimum yang ditetapkan oleh Standar Nasional Indonesia untuk beras sebesar 14% untuk kelas mutu premium, medium 1, dan medium 2, yang juga berlaku untuk beras berpigmen termasuk beras hitam. Sementara itu, standar mutu gabah yang tertuang dalam SNI 224:2023 menetapkan kadar air Gabah Kering Giling (GKG) maksimum sebesar 14%. Dengan nilai kadar air yang berkisar pada 11,5% hingga 11,7%, gabah beras hitam varietas Jeliteng dalam penelitian ini telah memenuhi persyaratan standar mutu simpan yang berlaku, serta berada pada kisaran kadar air aman yang direkomendasikan untuk penyimpanan biji-bijian yaitu 11 hingga 14% (Ramli *et al.*, 2021).

Tidak berbeda nyata kadar air antar perlakuan konsentrasi ozon sejalan dengan sifat ozon sebagai gas pengoksidasi. Ozon (O₃) merupakan gas dengan reaktivitas tinggi dan umur paruh yang singkat. Ozon lebih berperan dalam proses oksidasi dibandingkan dengan pengurangan kadar air. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Shah *et al* (2015) yang melaporkan bahwa perlakuan ozon pada beras dengan konsentrasi 0,1 hingga 0,4 ppm tidak menyebabkan perubahan kadar air yang signifikan ($P > 0,05$) dibandingkan dengan sampel kontrol. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa perlakuan ozon dapat memengaruhi beberapa karakteristik fisikokimia beras, namun kadar air tidak mengalami perubahan nyata setelah perlakuan ozon, sehingga hal ini dapat mempertegas bahwa kadar air merupakan parameter yang relatif stabil terhadap perlakuan ozon. Adapun menurut Tiwari *et al*

(2010) menjelaskan bahwa ozon efektif sebagai fumigan dan agen antimikroba, namun memiliki pengaruh minimal hingga tidak ada sama sekali terhadap kualitas fisik biji-bijian kering.

Ozon (O_3) bekerja sebagai agen pengoksidasi yang masuk ke dalam biji melalui difusi permukaan atau celah pada kulit biji, bukan melalui mekanisme hidrasi yang melibatkan transfer molekul air ke dalam jaringannya. Mekanisme oksidasi inilah yang mendasari efektivitas ozon dalam menjaga keamanan mikrobiologis, namun tidak melibatkan penambahan maupun pengurangan kandungan air secara langsung (Sivaranjani *et al.*, 2021). Sehingga secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan ozon hingga konsentrasi 8 ppm tidak memberikan pengaruh nyata terhadap kadar air gabah beras hitam. Seluruh perlakuan menghasilkan kadar air yang masih memenuhi persyaratan mutu berdasarkan SNI 6128:2020. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan ozon pada konsentrasi yang diterapkan dalam penelitian dapat digunakan tanpa menyebabkan perubahan kadar air yang signifikan pada gabah beras hitam, sehingga mutu bahan dari aspek kadar air tetap dapat dipertahankan.

4.1.2.2 Analisis Kadar Pati

Pati merupakan komponen karbohidrat dominan pada gabah beras hitam yang berperan dalam menentukan nilai gizi, sifat pemasakan, dan karakteristik tekstur produk akhir. Pati tersusun atas dua fraksi utama yaitu amilosa dengan struktur rantai lurus dan amilopektin dengan struktur bercabang, di mana proporsi keduanya menentukan sifat fisikokimia beras seperti tingkat kelengketan dan kemampuan membentuk gel (Syahbanu *et al.*, 2023). Pada beras hitam varietas Jeliteng, kandungan amilosa sebesar 19,6% menjadikan varietas ini tergolong memiliki kadar amilosa sedang sehingga tekstur nasinya cenderung pulen (Balai Besar Penelitian Tanaman Padi, 2019).

Berdasarkan hasil analisis kadar pati pada gabah beras hitam yang diberi perlakuan ozon dengan konsentrasi 0, 2, 4, 6, dan 8 ppm menunjukkan bahwa kadar pati tertinggi diperoleh pada perlakuan kontrol atau 0 ppm sebesar 65,26%, sedangkan kadar pati terendah diperoleh pada perlakuan konsentrasi ozon 8 ppm

sebesar 60,12%. Data tersebut menunjukkan bahwa kadar pati gabah beras hitam mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya konsentrasi ozon yang diberikan.

Menurut Hasil Tabel ANAVA pada lampiran 13, menunjukkan bahwa perlakuan ozon berpengaruh nyata terhadap kadar pati gabah beras hitam, dengan nilai F hitung $28,979 > F$ tabel $3,84$. Hasil ini mengindikasikan bahwa perbedaan konsentrasi ozon yang dilakukan dapat menyebabkan perbedaan kadar pati pada gabah beras hitam. Uji lanjut Duncan yang dilakukan pada taraf 5% membuktikan bahwa pada perlakuan 0 ppm dan 2 ppm berada pada notasi huruf yang sama, sementara penurunan yang signifikan terjadi pada konsentrasi 4 ppm dan seterusnya. Sehingga dapat diketahui bahwa ambang konsentrasi ozon yang mulai berdampak signifikan terhadap kadar pati berada di atas 2 ppm, maka dari itu konsentrasi ini aman digunakan jika tujuan utamanya hanya untuk mengendalikan hama atau memperpanjang masa simpan tanpa banyak mengurangi nilai gizi pati.

Tabel 14. Hasil Analisis Kadar Pati

Konsentrasi Ozon	Rata-Rata Respon	Taraf Nyata 5%
0 ppm	$65,26 \pm 1,18$	c
2 ppm	$64,56 \pm 0,62$	c
4 ppm	$62,32 \pm 0,70$	b
6 ppm	$61,27 \pm 0,59$	ab
8 ppm	$60,12 \pm 0,73$	a

Keterangan: $\pm$ merupakan standar deviasi dari tiga kali ulangan. Nilai rata-rata yang ditandai dengan notasi huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata dan notasi huruf yang berbeda menunjukkan berbeda nyata menurut uji lanjut Duncan pada taraf 5%.

Penetapan nilai pembandingan untuk kadar pati gabah beras hitam perlu dipertimbangkan, bahwa SNI 6128:2020 tentang mutu beras maupun SNI 3549:2009 tentang tepung beras tidak mencantumkan kadar pati sebagai parameter mutu yang dipersyaratkan secara kuantitatif. SNI 3549:2009 hanya mensyaratkan pengujian jenis pati secara kualitatif berdasarkan bentuk granula, tanpa menetapkan angka minimum kadar pati (Badan Standardisasi Nasional, 2009). Nilai

pembandingan yang lebih tepat digunakan karena itu berasal dari data ilmiah pada literatur. Secara umum, karbohidrat pada beras (*Oryza sativa* L.) didominasi oleh pati dengan proporsi berkisar 85 hingga 90% (Syahbanu *et al.*, 2023). Nilai ini menjadi acuan kisaran normal kadar pati beras secara luas, sementara acuan yang lebih spesifik untuk beras hitam ditunjukkan oleh Arifa *et al.*, (2021) sebesar 69,8% hingga 72,8% pada beberapa varietas asal Jawa Barat.

Kadar pati yang diperoleh pada penelitian ini, yaitu 65,26% pada kontrol hingga 60,12% pada konsentrasi 8 ppm, berada di bawah kedua acuan tersebut. Perbedaan ini diketahui bahwa sampel pada penelitian ini berbentuk tepung beras pecah kulit (BPK), bukan beras giling atau beras sosoh yang umumnya menjadi acuan pada literatur pembandingan kadar pati. Pada BPK, lapisan bekatul, aleuron, dan sisa perikarp masih melekat pada endosperma, sehingga komponen non pati seperti serat kasar, protein, dan lipid dari lapisan tersebut ikut terhitung dalam analisis dan menurunkan proporsi pati per satuan berat sampel. Pemilihan bentuk BPK pada penelitian ini dilakukan untuk mempertahankan lapisan aleuron dan perikarp tempat antosianin terakumulasi, sehingga kadar pati yang relatif rendah lebih tepat dipahami sebagai konsekuensi dari bentuk sampel yang dipilih, bukan indikasi mutu pati yang buruk.

Pada konsentrasi 0 ppm, diketahui kadar pati sebesar 65,26%. Nilai ini berada dibawah kisaran nilai yang diperoleh oleh Arifa *et al.*, (2021) untuk beberapa varietas beras hitam asal Jawa Barat yaitu berkisar antara 69,8% hingga 72,8%. Perbedaan ini dapat dikaitkan dengan beberapa faktor antara lain perbedaan varietas, kondisi budidaya, dan metode analisis yang digunakan.

Pada konsentrasi 2 ppm, kadar pati menurun menjadi 64,56%, namun berdasarkan hasil uji Duncan nilai ini tidak berbeda nyata dengan kontrol (0 ppm). Kondisi ini mengindikasikan bahwa pada konsentrasi rendah, ozon yang berpenetrasi melalui lapisan luar gabah belum memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap degradasi rantai pati di endosperma. Hal ini konsisten dengan data XRD yang menunjukkan bahwa pada 2 ppm, derajat kristalinitas justru meningkat menjadi 28,6% dibandingkan kontrol sebesar 24,2%. Peningkatan kristalinitas ini

mengindikasikan bahwa reaksi oksidasi ozon pada konsentrasi rendah lebih banyak mendegradasi daerah amorf granula pati tanpa memutus rantai pati secara signifikan (Castanha *et al.*, 2017).

Penurunan kadar pati yang signifikan mulai terdeteksi pada konsentrasi 4 ppm dengan nilai 62,32%, yang berbeda nyata dari kontrol dan perlakuan 2 ppm berdasarkan uji Duncan. Pada konsentrasi ini, ozon yang mencapai granula pati mulai memutus ikatan glikosidik pada rantai amilosa dan amilopektin secara lebih intensif, sehingga molekul pati terdegradasi menjadi fragmen yang lebih pendek dan kadar pati yang terukur menurun (Castanha *et al.*, 2017). Hal ini juga tercermin dari data XRD yang menunjukkan penurunan derajat kristalinitas pada 4 ppm menjadi 27,9% dibandingkan 2 ppm sebesar 28,6%, yang mengindikasikan mulai terganggunya keteraturan susunan granula pati akibat reaksi oksidasi ozon yang semakin intensif (Fang *et al.*, 2025). Penurunan kadar pati pada konsentrasi ini juga dipengaruhi oleh perbedaan ketahanan dua fraksi penyusun pati terhadap serangan ozon. Amilosa yang memiliki struktur rantai lurus tanpa percabangan lebih mudah diakses dan dioksidasi oleh ozon dibandingkan amilopektin yang rantainya terlindungi oleh percabangan, sehingga degradasi rantai pati berlangsung lebih cepat pada fraksi amilosa dan berkontribusi lebih besar terhadap penurunan kadar pati yang terukur (Farizha *et al.*, 2022).

Pada konsentrasi 6 ppm, kadar pati menurun menjadi 61,27% dan berbeda nyata dengan perlakuan sebelumnya berdasarkan uji Duncan. Peningkatan konsentrasi ozon menyebabkan reaksi oksidasi terhadap rantai pati berlangsung semakin intensif, sehingga semakin banyak ikatan glikosidik yang terputus dan molekul pati terpecah menjadi fragmen lebih pendek, akibatnya kadar pati yang terukur semakin menurun (Castanha *et al.*, 2017). Degradasi rantai pati oleh ozon bersifat bertahap dan terus bertambah seiring meningkatnya konsentrasi ozon yang diberikan, sehingga meskipun data XRD menunjukkan derajat kristalinitas yang tidak banyak berubah dibandingkan perlakuan sebelumnya, penurunan kadar pati tetap berlangsung karena pemutusan ikatan glikosidik pada rantai pati terus terjadi pada setiap peningkatan konsentrasi (Rachmaselly *et al.*, 2020).

Pada konsentrasi tertinggi 8 ppm, kadar pati mencapai nilai terendah sebesar 60,12% dan tidak berbeda nyata dengan 6 ppm berdasarkan uji Duncan. Kondisi ini diduga terjadi karena daerah amorf granula pati yang lebih mudah diakses ozon sudah mengalami degradasi intensif pada konsentrasi sebelumnya, sehingga peningkatan konsentrasi lebih lanjut tidak menghasilkan perbedaan yang nyata secara statistik. Data XRD mendukung hal ini, di mana penurunan derajat kristalinitas pada 8 ppm menjadi 26,7% mengindikasikan bahwa ozon pada konsentrasi tinggi mulai mengganggu daerah kristalin granula pati, namun pengaruhnya terhadap kadar pati yang terukur tidak lagi berbeda nyata dibandingkan perlakuan 6 ppm (Castanha *et al.*, 2017).

Penurunan kadar pati yang terjadi pada penelitian ini sejalan dengan mekanisme oksidasi ozon yang telah dilaporkan pada berbagai penelitian terdahulu. Ozon sebagai oksidan kuat mengoksidasi gugus hidroksil pada rantai pati menjadi gugus karbonil dan karboksil, yang kemudian diikuti oleh pemutusan ikatan glikosidik sehingga molekul pati terpecah menjadi fragmen yang lebih pendek (Castanha *et al.*, 2017). Depolimerisasi rantai pati yang menyebabkan penurunan kadar pati juga didukung oleh Farizha *et al* (2022) yang menyatakan bahwa ozon memutus ikatan glikosidik pada rantai amilosa dan amilopektin sehingga molekul pati terpecah menjadi fragmen lebih pendek. Hubungan antara penurunan kadar pati dan perubahan struktur kristalin pada penelitian ini memberikan gambaran yang lebih lengkap tentang mekanisme kerja ozon pada gabah beras hitam, yaitu bahwa ozon tidak hanya memodifikasi permukaan granula pati tetapi juga memengaruhi integritas rantai pati di dalamnya (Castanha *et al.*, 2017; Rachmaselly *et al.*, 2020).

Mekanisme penurunan kadar pati akibat ozonisasi berbeda prinsip dengan penurunan kadar air akibat penguapan. Pada kadar air, molekul air akan meninggalkan bahan dalam bentuk uap sehingga air tersebut sudah tidak berada di dalam sampel. Pati mengalami mekanisme yang berbeda karena sebagian besar massa karbohidratnya tetap berada di dalam gabah, hanya secara kimiawi berubah bentuk sehingga tidak lagi terbaca sebagai pati oleh metode analisis yang digunakan.

Perubahan bentuk ini terjadi melalui dua jalur yang saling berkaitan. Pertama, gugus hidroksil pada C2, C3, dan C6 unit glukosa teroksidasi menjadi gugus karbonil dan kemudian karboksil, menghasilkan pati teroksidasi yang strukturnya masih berupa polisakarida namun sebagian gugus hidroksilnya sudah tergantikan (Maqbool *et al.*, 2024). Kedua, ikatan glikosidik pada daerah amorf dan rantai amilosa terhidrolisis sehingga molekul pati yang panjang terpecah menjadi dekstrin dan oligosakarida yang lebih pendek. Castanha *et al.*, (2017) menunjukkan hal ini secara langsung pada pati kentang, yaitu semakin lama waktu ozonisasi, kadar gugus karbonil, karboksil, dan gula pereduksi akan meningkat, sementara ukuran molekul dan kadar amilosa terukur menurun, sebab fragmen pendek hasil pemutusan rantai memiliki lebih banyak ujung gula pereduksi bebas dibandingkan rantai pati utuh.

Perhitungan kadar pati pada metode Luff Schoorl dikalibrasi berdasarkan reaksi glukosa hasil hidrolisis asam sebagai gula pereduksi terhadap ion Cu^{2+} . Unit glukosa yang telah teroksidasi pada posisi C2, C3, dan C6 memiliki struktur yang berbeda dari glukosa alami karena sebagian gugus hidroksilnya telah tergantikan oleh gugus karbonil atau karboksil. Sebagian gugus karboksil hasil oksidasi juga dapat mengalami dekarboksilasi, yaitu lepasnya CO_2 dari struktur pati, sebagaimana dilaporkan Satmalawati *et al.*, (2020) pada pati singkong yang dioksidasi ozon. Dengan demikian, pati yang semula berupa rantai glukosa utuh berubah menjadi campuran pati teroksidasi, dekstrin, dan oligosakarida hasil depolimerisasi, yang sebagian besar tetap berada di dalam gabah namun tidak lagi terhitung sebagai pati oleh metode analisis yang digunakan.

Mekanisme oksidasi di atas pada dasarnya berasal dari penelitian yang menggunakan pati murni, bukan gabah utuh seperti pada penelitian ini. Perbedaanannya yaitu terdapat pada gabah utuh, dimana ozon tidak langsung mengenai pati, melainkan harus menembus lapisan sekam dan kulit ari terlebih dahulu, sehingga kemungkinan efek oksidasinya tidak terpapar langsung jika pati diberi ozon secara langsung. Selain itu, penelitian ini hanya mengukur kadar pati secara keseluruhan dan belum menguji gugus karbonil atau karboksil secara

langsung pada sampel. Meskipun demikian, adanya perbedaan kadar pati yang nyata secara statistik pada penelitian ini menunjukkan bahwa ozon tetap mampu memengaruhi komponen pati di dalam biji meskipun perlakuan dilakukan pada gabah dalam keadaan utuh, mengingat ozon diketahui memiliki kemampuan memasuki struktur internal granula pati sereal melalui daerah amorf yang lebih terbuka (Rachmaselly *et al.*, 2020).

Selain melalui mekanisme umum oksidasi pati yang telah dijelaskan, penurunan kadar pati pada penelitian ini juga dapat ditelusuri lebih spesifik melalui fraksi penyusun pati, yaitu amilosa dan amilopektin. Amilosa memiliki struktur rantai lurus tanpa percabangan, sedangkan amilopektin berstruktur bercabang, sehingga gugus hidroksil pada rantai amilosa secara struktural lebih mudah dijangkau oleh zat pengoksidasi seperti ozon dibanding gugus hidroksil pada amilopektin yang lebih terlindung oleh percabangannya (Farizha *et al.*, 2022). Ketika gugus hidroksil pada amilosa teroksidasi, kemampuan rantai amilosa untuk saling berikatan melalui ikatan hidrogen menjadi berkurang sehingga struktur molekul pati melemah dan rantai pati lebih mudah terputus menjadi fragmen yang lebih pendek, yang pada akhirnya berkontribusi pada penurunan kadar pati yang terukur (Koswara, 2009).

Varietas Jeliteng yang digunakan pada penelitian ini merupakan hasil persilangan Ketan Hitam dengan Pandan Wangi Cianjur yang dilepas pada tahun 2019, dengan kandungan amilosa sebesar 19,6% dan tekstur nasi yang pulen (Balai Besar Penelitian Tanaman Padi, 2019). Kadar amilosa ini tergolong rendah hingga sedang jika dibandingkan dengan beberapa varietas beras hitam lain asal Jawa Barat yang berkisar antara 22,4% hingga 26,1% (Arifa *et al.*, 2021), yang menunjukkan bahwa kadar amilosa antar varietas beras hitam cukup bervariasi tergantung sumber genetiknya. Meskipun demikian, fraksi amilosa pada varietas Jeliteng tetap berpotensi mengalami oksidasi akibat paparan ozon mengingat struktur rantai lurusnya yang lebih mudah diakses dibandingkan amilopektin, sehingga turut berkontribusi terhadap penurunan kadar pati total yang terukur pada penelitian ini (Farizha *et al.*, 2022).

Berdasarkan Standar Nasional Indonesia mengenai mutu beras, yaitu SNI 6128:2020 yang diterbitkan oleh Badan Standardisasi Nasional, menetapkan persyaratan mutu dan metode untuk menentukan klasifikasi, kelas mutu, pengemasan, dan penandaan beras yang diperdagangkan untuk dikonsumsi oleh manusia (Badan Standardisasi Nasional, 2020). Persyaratan mutu yang ditetapkan dalam standar tersebut meliputi parameter seperti derajat sosoh, kadar air, butir kepala, butir patah, butir menir, dan beberapa parameter fisik lainnya, namun tidak mencantumkan kadar pati sebagai salah satu parameter wajib dalam syarat mutu umum maupun mutu khusus.

Dengan demikian, kadar pati pada penelitian ini lebih berperan sebagai indikator karakteristik fisikokimia dalam konteks ilmiah, bukan sebagai parameter wajib yang harus dipenuhi sesuai standar SNI 6128:2020. Beras hitam memiliki nilai tambah sebagai pangan fungsional karena kandungan antosianinnya yang tinggi dan relatif terjangkau dibandingkan sumber antosianin lain seperti blueberi dan anggur (Pusat Perpustakaan dan Literasi Pertanian, 2014), sehingga karakterisasi kadar pati pada penelitian ini dapat melengkapi informasi fisikokimia gabah beras hitam varietas Jeliteng dalam konteks pengembangan sebagai komoditas pangan bernilai tambah.

4.1.2.3 Analisis Antosianin

Antosianin merupakan pigmen flavonoid yang termasuk dalam kelompok senyawa polifenol dan secara langsung bertanggung jawab atas warna hitam keunguan yang menjadi ciri khas beras hitam, salahsatunya yaitu varietas Jeliteng. Senyawa ini terakumulasi secara dominan di lapisan aleuron dan perikarp biji, sehingga bagian tersebut menjadi lapisan pertama yang akan terpapar gas ozon selama proses ozonisasi berlangsung. Komponen antosianin utama pada beras hitam adalah sianidin-3-O-glukosida yang dilaporkan menyumbang sekitar 88% dari total kandungan antosianin, diikuti oleh peonidin-3-O-glukosida sebagai komponen kedua yang turut berkontribusi pada profil pigmen keseluruhan (Nurhidajah *et al.*, 2022).

Sebagai senyawa bioaktif, antosianin berperan sebagai antioksidan melalui dua mekanisme utama yaitu donasi atom hidrogen dan transfer elektron tunggal. Kedua mekanisme ini dimungkinkan oleh keberadaan gugus hidroksil pada cincin B serta ikatan rangkap terkonjugasi pada struktur flavilium, yang secara bersama-sama memungkinkan antosianin memutus rantai reaksi oksidasi radikal bebas sebelum merusak sel (Sadowska-Bartosz dan Bartosz, 2024). Kandungan antosianin yang tinggi menjadi salah satu alasan utama beras hitam dikategorikan sebagai pangan fungsional, karena dikaitkan dengan manfaat kesehatan seperti penurunan risiko diabetes, penyakit kardiovaskular, dan inflamasi kronis (Oliveira *et al.*, 2026). Menurut Nurhidajah *et al* (2022) kadar antosianin optimum beras hitam varietas Jeliteng sebesar 109,64 mg/100g, yang menunjukkan bahwa varietas ini tergolong tinggi kandungan antosianinnya dibandingkan varietas beras berpigmen lainnya.

Analisis kadar antosianin pada penelitian ini menggunakan metode pH *differensial* yang telah divalidasi sebagai metode yang sederhana, cepat, dan akurat untuk mengukur total antosianin monomerik dalam suatu sampel (Giusti dan Wrolstad, 2001). Metode ini dipilih karena kemampuannya mengukur antosianin secara spesifik tanpa terganggu oleh senyawa fenolik lain yang turut menyerap cahaya pada panjang gelombang yang sama, dan telah digunakan secara luas oleh komunitas ilmiah maupun industri pangan (Lee *et al.*, 2005). Prinsip kerja metode ini memanfaatkan sifat unik antosianin yang mengalami perubahan struktur secara *reversibel* sesuai dengan pH larutan. Pada pH 1,0 antosianin berada dalam bentuk kation flavilium yang berwarna dan memiliki absorbansi maksimum, sedangkan pada pH 4,5 antosianin berubah menjadi bentuk karbinol yang tidak berwarna dengan absorbansi mendekati nol. Selisih absorbansi antara kedua kondisi pH ini berbanding lurus dengan konsentrasi antosianin dalam sampel, sehingga pengukuran dapat dilakukan secara akurat bahkan ketika terdapat pigmen terdegradasi dan senyawa pengganggu lain dalam matriks sampel (Giusti dan Wrolstad, 2001).

Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan ozon memberikan pengaruh yang berbeda nyata terhadap kadar antosianin gabah beras hitam varietas

Jeliteng. Hasil uji lanjut Duncan pada taraf 5% menunjukkan bahwa seluruh perlakuan berbeda nyata satu sama lain, yang menandakan bahwa setiap perubahan konsentrasi ozon menghasilkan respons kadar antosianin yang berbeda.

Tabel 15. Hasil Analisis Kadar Antosianin

Konsentrasi Ozon	Rata-Rata Respon	Taraf Nyata 5%
0 ppm	111,549 ± 3,938	e
2 ppm	45,632 ± 1,354	a
4 ppm	86,355 ± 0,594	d
6 ppm	67,241 ± 2,369	c
8 ppm	59,637 ± 0,745	b

Keterangan: ± merupakan standar deviasi dari tiga kali ulangan. Nilai rata-rata yang ditandai dengan notasi huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata dan notasi huruf yang berbeda menunjukkan berbeda nyata menurut uji lanjut Duncan pada taraf 5%.

Berdasarkan tabel 15, menunjukkan hasil pola respon antosianin yang berfluktuasi seiring peningkatan konsentrasi ozon. Kadar antosianin mengalami penurunan sangat tajam dari perlakuan 0 ppm ke perlakuan 2 ppm, kemudian meningkat kembali secara signifikan pada perlakuan 4 ppm, lalu menurun secara bertahap pada perlakuan 6 ppm dan 8 ppm. Pola ini terbentuk karena ozon bekerja melalui dua mekanisme yang berlawanan arah secara bersamaan. Pada konsentrasi yang lebih rendah dan terkontrol, ozon dapat berperan sebagai pemicu respons pertahanan yang mendorong peningkatan senyawa bioaktif, sedangkan pada konsentrasi yang lebih tinggi efek oksidatif destruktif menjadi lebih dominan sehingga senyawa bioaktif justru terdegradasi (Sachadyn-Król dan Agriopoulou, 2020). Mekanisme yang lebih berpengaruh akhirnya ditentukan oleh besarnya konsentrasi ozon yang diberikan.

Pada konsentrasi 0 ppm didapatkan bahwa kadar antosianin tertinggi yaitu 111,549 mg/100g. Nilai ini berada pada kisaran yang dilaporkan oleh Nurhidajah *et al* (2022) untuk beras hitam varietas Jeliteng tanpa perlakuan, sehingga dapat dinyatakan bahwa kondisi alami varietas ini memang memiliki kandungan antosianin yang tinggi. Pada perlakuan ini tidak ada paparan agen oksidatif dari luar

sehingga integritas struktur antosianin di lapisan aleuron sepenuhnya terjaga dan terekstrak secara optimal selama proses.

Pada konsentrasi 2 ppm didapatkan bahwa kadar antosianin memiliki nilai terendah dalam seluruh perlakuan konsentrasi ozon yaitu 45,632 mg/100g. Penurunan ini dapat dijelaskan melalui mekanisme oksidasi langsung ozon terhadap struktur kimia antosianin. Ozon memiliki potensi oksidasi yang sangat tinggi yaitu sebesar 2,07 V, jauh melampaui klorin yang hanya 1,36 V, dan bereaksi dengan senyawa organik melalui dua jalur utama yaitu reaksi langsung dengan molekul ozon itu sendiri dan reaksi tidak langsung melalui pembentukan radikal bebas hidroksil hasil dekomposisi ozon (Sitoe *et al.*, 2025).

Antosianin yang terakumulasi di lapisan aleuron gabah, meskipun terlindungi secara fisik oleh lapisan sekam, tetap dapat terpapar ozon yang berdifusi melalui pori-pori sekam dan bereaksi dengan gugus hidroksil serta ikatan rangkap terkonjugasi pada struktur flavilium. Reaksi oksidatif ini mengakibatkan pemecahan kromofor antosianin sehingga pigmen kehilangan struktur aktifnya. Modesti *et al* (2021) menyatakan bahwa dosis ozon yang tinggi secara umum menginduksi oksidasi berlebih yang berujung pada penurunan senyawa fenolik. Hasil ini menunjukkan bahwa pada perlakuan 2 ppm dengan paparan 30 menit, mekanisme oksidasi destruktif ozon lebih dominan sehingga degradasi antosianin terjadi secara signifikan, meskipun pola ini tidak bersifat linear karena pada konsentrasi lebih tinggi faktor lain turut berperan sebagaimana akan terlihat pada perlakuan berikutnya.

Pada konsentrasi 4 ppm didapatkan bahwa kadar antosianin 86,355 mg/100g. Kenaikan yang terjadi dapat dijelaskan melalui dua mekanisme yang bekerja secara bersamaan. Pertama, berdasarkan mekanisme yang dilaporkan pada komoditas sereal, ozon pada konsentrasi ini bereaksi dengan komponen struktural sekam seperti lignin dan selulosa sehingga matriks dinding sel menjadi lebih longgar dan berpori, yang meningkatkan efisiensi penetrasi pelarut selama ekstraksi antosianin (Sitoe *et al.*, 2025). Kedua, ozon berpotensi memutus ikatan antara antosianin terikat dan komponen dinding sel sehingga antosianin bebas yang lebih mudah

terekstrak menjadi lebih banyak tersedia. Kondisi ini didukung oleh temuan Sachadyn-Król dan Agriopoulou (2020) yang menyatakan bahwa ozonisasi dapat menyebabkan perubahan struktur dinding sel yang membebaskan senyawa fenolik terkonjugasi sehingga efisiensi ekstraksinya meningkat, serta menurut Modesti *et al* (2021) bahwa paparan ozon terkontrol dapat meningkatkan kandungan antosianin melalui induksi respons stres oksidatif pada produk berbasis tanaman.

Pada konsentrasi 6 ppm didapatkan bahwa kadar antosianin 67,241 mg/100g, hal ini menunjukkan terjadinya penurunan dari konsentrasi 4 ppm. Pada konsentrasi ini, tekanan oksidatif yang dihasilkan ozon sudah cukup besar sehingga molekul antosianin yang telah terlepas dari matriks sel ikut mengalami serangan oksidatif, baik oleh molekul ozon secara langsung maupun oleh radikal bebas hidroksil yang dihasilkan dari dekomposisi ozon. Pada konsentrasi yang lebih tinggi, radikal bebas hasil dekomposisi ozon bersifat lebih reaktif dan tidak membedakan jenis senyawa yang diserang, sehingga lebih banyak komponen bioaktif yang ikut terdegradasi secara bersamaan (Sitoe *et al.*, 2025). Paparan ozon yang melebihi batas terkontrol juga terbukti secara konsisten menurunkan kandungan senyawa fenolik termasuk antosianin (Modesti *et al.*, 2021), yang konsisten dengan hasil yang diperoleh pada perlakuan 6 ppm.

Pada konsentrasi 8 ppm didapatkan bahwa kadar antosianin 59,637 mg/100g, hal ini menunjukkan terjadinya penurunan kembali dari konsentrasi 6 ppm. Penurunan yang berlanjut pada konsentrasi tertinggi ini mengonfirmasi bahwa efek destruktif ozon terhadap struktur antosianin semakin dominan seiring meningkatnya konsentrasi di atas 4 ppm. Secara kumulatif, perlakuan 8 ppm menghasilkan penurunan kadar antosianin sebesar 46,5% dibandingkan kontrol. Pola penurunan bertahap dari 4 ppm hingga 8 ppm ini menunjukkan bahwa ambang batas konsentrasi ozon yang masih memungkinkan kadar antosianin relatif tinggi pada kondisi penelitian ini berada di sekitar 4 ppm, sementara konsentrasi di atasnya secara konsisten bersifat degradatif terhadap antosianin beras hitam Jeliteng.

Pola respons antosianin terhadap peningkatan konsentrasi ozon yang ditemukan dalam penelitian ini konsisten dengan tinjauan Modesti *et al* (2021) yang merangkum bahwa paparan ozon dengan dosis terkontrol dapat mempertahankan atau meningkatkan kandungan senyawa fenolik, sementara dosis yang terlalu tinggi secara konsisten menyebabkan penurunan. Perbandingan dengan penelitian pada Saskatoon berry oleh Gorzelany *et al* (2022) memperkuat kesimpulan ini, di mana turunan sianidin sebagai kelompok antosianin utama pada buah tersebut terbukti rentan terhadap degradasi oksidatif akibat paparan ozon, dengan penurunan rata-rata 34,44% setelah ozonisasi 10 ppm selama 15 menit dan 57,18% setelah 30 menit.

Adapun perbandingan dengan beras merah sebagai komoditas yang lebih serupa secara struktur fisik perlu mempertimbangkan perbedaan komposisi pigmennya, karena warna beras merah lebih didominasi oleh proantosianin dan senyawa fenolik terikat dibandingkan antosianin bebas seperti yang terdapat pada beras hitam, sehingga respons keduanya terhadap paparan ozon tidak dapat dibandingkan secara langsung (Oliveira *et al.*, 2026). Perbedaan laju degradasi antara penelitian ini dan penelitian pada buah beri dapat dijelaskan melalui perbedaan matriks fisik sampel, di mana sifat fisik biji-bijian termasuk lapisan sekamnya secara langsung mempengaruhi kapasitas penetrasi dan reaktivitas ozon terhadap komponen bioaktif di dalamnya (Sitoe *et al.*, 2025).

4.1.2.4 Analisis Aktivitas Air (aw)

Aktivitas air atau *water activity* (aw) merupakan parameter yang menggambarkan jumlah air bebas dalam suatu bahan pangan yang tersedia untuk mendukung reaksi kimia dan pertumbuhan mikroorganisme. Secara termodinamika, Aw didefinisikan sebagai perbandingan antara tekanan uap air pada bahan dengan tekanan uap air murni pada suhu yang sama. Parameter ini berbeda secara konseptual dari kadar air. Kadar air mengukur seluruh air yang terkandung dalam bahan, baik yang terikat kuat pada komponen bahan pangan maupun yang bebas, sedangkan Aw hanya mencerminkan fraksi air bebas. Dua bahan dengan kadar air yang sama dapat memiliki Aw berbeda tergantung pada seberapa kuat air

tersebut terikat pada struktur bahan, seperti yang ditemukan pada buah kering dan produk panggang yang memiliki kadar air mirip namun Aw berbeda (Madhumathy, 2021).

Pada gabah beras hitam varietas Jeliteng yang telah diproses menjadi tepung BPK (beras pecah kulit), aw menjadi indikator yang penting karena bentuk tepung memiliki luas permukaan yang jauh lebih besar dibandingkan bentuk butiran utuh. Semakin besar luas permukaan kontak suatu bahan dengan udara sekitarnya, semakin cepat pula laju perpindahan uap air antara bahan dengan lingkungan, sehingga aw tepung lebih cepat berubah mengikuti fluktuasi kelembapan selama penyimpanan dibandingkan bentuk butiran utuh. Kondisi ini penting diperhatikan karena semakin tinggi aw suatu tepung mendekati atau melewati ambang tertentu, semakin besar pula risiko pertumbuhan mikroorganisme. Sebagian besar bakteri baru dapat tumbuh pada aw di atas 0,90, sementara kapang dan khamir sudah dapat tumbuh pada aw yang jauh lebih rendah (Madhumathy, 2021).

Nilai aw pada penelitian ini masih berada jauh di bawah ambang pertumbuhan bakteri, sehingga risiko mikrobiologis yang lebih relevan diperhatikan pada rentang aw tersebut adalah pertumbuhan kapang, bukan bakteri. Selain risiko mikrobiologis, reaksi pencoklatan non enzimatis dan oksidasi lipid penyebab ketengikan juga paling aktif terjadi pada aw menengah yaitu sekitar 0,5 sampai 0,8, bukan pada Aw tinggi (Madhumathy, 2021).

Menurut Standar Nasional Indonesia untuk gabah, yaitu SNI 224:2023 menetapkan kadar air maksimum sebagai parameter mutu utama, bukan Aw secara langsung. Untuk gabah kering giling, yaitu gabah yang telah melalui proses pengeringan dan siap digiling, standar ini menetapkan kadar air maksimum 14,0% untuk mutu premium dan medium I, serta 15,0% untuk mutu medium II (Badan Standardisasi Nasional, 2023). Aw tetap penting dibahas sebagai pelengkap kadar air karena secara spesifik mengukur fraksi air yang tersedia bagi pertumbuhan mikroorganisme, sehingga lebih relevan digunakan sebagai indikator stabilitas mikrobiologis dibandingkan kadar air saja. Nilai Aw yang diperoleh pada penelitian ini, berkisar antara 0,74 sampai 0,76, berada tepat pada rentang menengah yang

secara teoritis paling rawan terhadap pertumbuhan kapang serta reaksi pencoklatan dan oksidasi lipid sebagaimana dijelaskan sebelumnya.

Tabel 16. Hasil Analisis Aktivitas Air (Aw)

Konsentrasi Ozon	Rata-Rata Respon
0 ppm	$0,76 \pm 0,02$
2 ppm	$0,76 \pm 0,02$
4 ppm	$0,75 \pm 0,03$
6 ppm	$0,76 \pm 0,02$
8 ppm	$0,74 \pm 0,02$

Keterangan : $\pm$ merupakan standar deviasi dari tiga kali ulangan.

Berdasarkan tabel 16, rata-rata Aw pada seluruh taraf konsentrasi ozon berkisar antara 0,74 sampai 0,76, dengan pola yang berfluktuasi naik turun, bukan menurun atau meningkat secara konsisten. Hasil analisis menunjukkan bahwa konsentrasi ozon tidak berbeda nyata terhadap Aw pada taraf 5 persen sesuai dengan lampiran 15.

Pada konsentrasi 0 ppm ke 2 ppm, nilai Aw tidak menunjukkan adanya perubahan. Kondisi ini relevan apabila dikaitkan dengan sifat ozon sebagai oksidator kuat yang sangat reaktif namun sangat cepat terdekomposisi saat bereaksi dengan lapisan sekam dan permukaan luar butir gabah (Tiwari *et al.*, 2010). Sebagai perbandingan, yaitu pada penelitian Beber-Rodrigues *et al* (2015) pada gabah kering yang berhasil menurunkan jumlah total kapang secara signifikan menggunakan konsentrasi 40 mg/L, setara sekitar 20.000 ppm, dengan durasi pemaparan yang sama yaitu 30 menit. Konsentrasi 2 ppm pada penelitian ini berada jauh di bawah dosis tersebut, sehingga efek antimikroba maupun efek oksidatif terhadap komponen struktural bahan belum dapat diharapkan terjadi pada taraf konsentrasi ini. Konsentrasi 2 ppm masih berada dalam rentang 0,05 sampai 5 ppm yang menurut kajian pustaka belum cukup untuk memicu oksidasi lipid pada biji-bijian pangan, bahkan penetrasi ozon ke bagian dalam kernel pada rentang konsentrasi tersebut cenderung tidak terjadi (Tiwari *et al.*, 2010).

Pada konsentrasi 2 ppm ke 4 ppm, Aw menjadi 0,75, dan konsentrasi ini masih berada dalam rentang 0,05 sampai 5 ppm, sesuai dengan pernyataan Tiwari *et al.*, (2010) yaitu belum cukup untuk memicu oksidasi lipid pada biji-bijian pangan. Reaktivitas ozon terhadap Reaktivitas ozon terhadap komponen bahan memang sangat dipengaruhi oleh konsentrasi gas dan kadar air bahan (Sitoe *et al.*, 2025), sehingga pada konsentrasi ini reaksi yang terjadi kurang efektif dan berlangsung singkat akibat durasi pemaparan yang hanya 30 menit, dan pengaruhnya terhadap struktur internal bahan masih sangat terbatas.

Pada konsentrasi 4 ppm ke 6 ppm, Aw naik kembali menjadi 0,76, hal ini menunjukkan bahwa kembali ke nilai yang sama seperti pada perlakuan 0 dan 2 ppm. Pola kenaikan ini berlawanan dengan asumsi hubungan dosis respon, yaitu reaksi oksidatif ozon terhadap komponen bahan akan meningkat secara seiring penambahan konsentrasi. Reaksi ozon dengan komponen organik pada permukaan gabah memang berlangsung sangat cepat dan cenderung terbatas pada lapisan luar butir (Tiwari *et al.*, 2010), sehingga karakteristik ini turut menjelaskan mengapa tidak terbentuk pola dosis respon yang konsisten pada rentang konsentrasi rendah. Ketidakteraturan pola sejalan dengan hasil analisis, yang menunjukkan bahwa konsentrasi ozon tidak berbeda nyata terhadap Aw gabah beras hitam.

Pada konsentrasi 6 ppm ke 8 ppm, Aw kembali turun menjadi 0,74. Pada konsentrasi 8 ppm ini sudah melewati ambang 5 ppm yang menurut Tiwari *et al* (2010) dapat memicu oksidasi lipid pada biji-bijian, berbeda dengan 2 dan 4 ppm yang masih di bawah ambang tersebut, sehingga secara teori peluang oksidasi di titik ini relatif lebih besar. Meskipun demikian, satu taraf konsentrasi saja tidak cukup membuktikan hubungan dosis respon, dan pola naik turun dari 6 ke 8 ppm dapat disebut sebagai variasi antarulangan yang sudah tercakup dalam nilai galat, sejalan dengan hasil analisis yang menunjukkan konsentrasi ozon tidak berpengaruh nyata terhadap Aw.

Berdasarkan mekanisme, pengaruh ozon terhadap Aw dapat dijelaskan melalui sifat dasar ozon. Ozon memiliki potensial oksidasi sebesar 2,07 volt, lebih tinggi dibandingkan klorin sekitar 1,36 volt, sehingga tergolong oksidator kuat (Sitoe *et*

al., 2025). Sifat oksidator kuat ini membuat ozon sangat tidak stabil dan cepat terurai kembali menjadi oksigen begitu bereaksi dengan komponen organik di permukaan bahan (Tiwari *et al.*, 2010). Reaktivitas dan waktu paruh ozon dalam biji-bijian sangat dipengaruhi oleh kadar air bahan, luas permukaan kontak, dan konsentrasi gas yang diberikan (Sitoe *et al.*, 2025).

Menurut Tiwari *et al* (2010) melaporkan bahwa profil asam amino dan asam lemak gandum, kedelai, dan jagung yang diozonasi pada konsentrasi 50 ppm selama 30 hari, jauh lebih tinggi dari dosis dan durasi pada penelitian ini, tidak menunjukkan perubahan yang berarti. Temuan ini mengindikasikan bahwa ozon tidak menembus sampai ke bagian dalam kernel. Karena Aw yang diukur mencerminkan rata-rata kondisi dari keseluruhan massa sampel, bukan hanya bagian yang bersentuhan langsung dengan gas ozon, keterbatasan penetrasi tersebut menjadi dasar ilmiah mengapa nilai Aw pada seluruh taraf konsentrasi ozon berada dalam rentang yang sangat sempit, yaitu 0,74 sampai 0,76.

Apabila dibandingkan dengan penelitian terdahulu, hasil ini sejalan dengan temuan Shah *et al* (2015) yang mengaplikasikan ozon pada konsentrasi 0,1 sampai 0,4 ppm terhadap beras putih dan melaporkan bahwa kadar air beras, baik dalam bentuk mentah maupun masak, tidak mengalami perubahan signifikan ($P>0,05$) akibat perlakuan ozon, meskipun parameter warna dan kualitas pemasakan berubah secara nyata. Kesamaan pola ini memperkuat dugaan bahwa parameter yang berkaitan dengan status air, baik kadar air maupun Aw, cenderung lebih stabil terhadap paparan ozon dibandingkan parameter permukaan seperti warna.

Di sisi lain, penelitian Beber-Rodrigues *et al* (2015) pada gabah kering yang disimpan turut mengukur kadar air dan Aw sebagai bagian dari kajian faktor pemicu pertumbuhan kapang, tetapi konsentrasi ozon yang digunakan yaitu 10 sampai 40 mg/L jauh lebih tinggi, dibandingkan konsentrasi tertinggi pada penelitian ini yaitu 8 ppm. Perbedaan besaran dosis inilah yang diduga menjadi salah satu penyebab mengapa penelitian tersebut berpotensi menunjukkan keterkaitan ozon dengan parameter kelembapan secara lebih jelas, sedangkan penelitian ini dengan dosis jauh lebih rendah belum menunjukkan pengaruh yang signifikan.

Ozon memang dikenal sebagai agen fumigasi yang efektif untuk mengendalikan serangga, mendekomposisi mikotoksin, dan menginaktivasi mikroba pada biji-bijian, namun kajian pustaka menegaskan bahwa dalam rentang dosis yang sesuai, ozon cenderung memberi pengaruh minimal atau bahkan tidak berpengaruh terhadap mutu dasar bahan (Tiwari *et al.*, 2010). Efektivitas ozon terhadap komponen fisikokimia suatu bahan sangat bergantung pada konsentrasi, waktu kontak, dan kadar air bahan itu sendiri (Sivaranjani *et al.*, 2021). Konsentrasi 2 sampai 8 ppm yang digunakan pada penelitian ini tergolong rendah, dan waktu pemaparan 30 menit juga relatif singkat dibandingkan studi fumigasi biji-bijian pada umumnya yang menggunakan waktu paparan cukup lama untuk menghasilkan perubahan komponen kimia yang signifikan. Kombinasi dosis rendah dan waktu kontak singkat inilah yang menjadi faktor utama mengapa perlakuan konsentrasi ozon belum cukup kuat memberi pengaruh nyata terhadap Aw pada penelitian ini.

4.1.2.5 Analisis Gugus Fungsi *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) merupakan metode analisis struktural yang mengukur serapan radiasi inframerah akibat getaran ikatan kimia suatu bahan, baik dalam bentuk regangan (*stretching*) maupun tekukan (*bending*), untuk mengidentifikasi gugus fungsi penyusunnya. Setiap jenis ikatan memiliki frekuensi getar khas sehingga menghasilkan puncak serapan pada bilangan gelombang tertentu, dan pola keseluruhan puncak tersebut dapat digunakan untuk menelusuri komposisi kimia serta perubahan struktural suatu bahan tanpa merusak sampel secara berlebihan (Nandiyanto *et al.*, 2019).

Pati tersusun dari unit D-glukosa yang terhubung membentuk amilosa yang sebagian besar linier melalui ikatan glikosidik α -1,4, serta amilopektin yang memiliki rantai utama α -1,4 dengan percabangan α -1,6 pada interval tertentu (Tetlow & Bertoft, 2020). Struktur inilah yang menjadi dasar interpretasi puncak FTIR pada bahan berbasis pati seperti gabah beras hitam. Pada beras berpigmen seperti beras hitam, FTIR dapat menangkap perubahan ikatan hidrogen serta pergeseran pita amida yang terjadi akibat interaksi antara pati, protein, dan senyawa

antosianin, sebagaimana ditunjukkan pada interaksi pati dan protein beras dengan sianidin-3-O-glukosida (Aalim *et al.*, 2026).

Menurut Uivarasan *et al* (2024) menunjukkan bahwa tepung beras hitam memiliki proporsi struktur sekunder protein α heliks dan β sheet yang lebih tinggi dibandingkan tepung beras cokelat, mengindikasikan susunan protein yang lebih rapat. Peran utama FTIR dalam penelitian ini adalah untuk mengetahui jejak molekuler dari perubahan yang terjadi akibat perlakuan ozon, khususnya untuk membuktikan secara kimiawi apakah benar terjadi proses oksidasi pada pati gabah beras hitam.

Tabel 17. Hasil Data FTIR pada Gabah Beras Hitam

Konsentrasi Ozon	C-H (cm^{-1})	C=O (cm^{-1})	C-O-C (cm^{-1})
0 ppm	2987	1759	877
2 ppm	2997	1765	883
4 ppm	2987	1777	887
6 ppm	2993	1789	877
8 ppm	2981	1783	883

Gugus C=O

Gugus ini menunjukkan pola pergeseran paling konsisten di antara ketiga gugus fungsi yang diamati, sehingga menjadi dasar utama pembuktian oksidasi pati akibat perlakuan ozon pada penelitian ini. Bilangan gelombang bergeser naik dari 1759 cm^{-1} pada kontrol (0 ppm) menjadi 1789 cm^{-1} pada 6 ppm, suatu pergeseran total sebesar 30 cm^{-1} , sebelum turun kembali menjadi 1783 cm^{-1} pada 8 ppm.

Peningkatan bertahap dari 0 ke 2 ppm sebesar 6 cm^{-1} menunjukkan tahap awal oksidasi, ketika ozon baru mulai menyerang gugus hidroksil pada permukaan granula yang paling mudah diakses, sementara sekam yang masih membungkus gabah membatasi jumlah ozon yang menembus ke lapisan endosperm. Peningkatan menjadi lebih tajam pada 4 ppm sebesar 12 cm^{-1} dari nilai sebelumnya, dan berlanjut lagi sebesar 12 cm^{-1} pada 6 ppm, konsisten dengan bertambahnya proporsi

gugus hidroksil pada karbon C2 dan C3 unit glukopiranososa yang berhasil teroksidasi menjadi gugus karbonil seiring meningkatnya konsentrasi ozon (Maqbool *et al.*, 2024; Du *et al.*, 2024).

Peningkatan bilangan gelombang gugus karbonil seiring naiknya dosis ozon berkaitan dengan berkurangnya ikatan hidrogen di sekitar gugus karbonil yang terbentuk. Substitusi gugus hidroksil pati menjadi gugus karbonil mengurangi jaringan ikatan hidrogen antar rantai pati (Maqbool *et al.*, 2024), dan berkurangnya ikatan hidrogen ini membuat gugus karbonil yang terbentuk cenderung bergeser ke bilangan gelombang yang lebih tinggi, sesuai prinsip dasar spektroskopi inframerah bahwa ikatan hidrogen pada suatu gugus karbonil umumnya menurunkan frekuensi vibrasinya.

Penurunan pada 8 ppm menjadi 1783 cm^{-1} tidak berarti oksidasi menurun secara keseluruhan, karena nilai ini tetap jauh lebih tinggi dibandingkan kontrol dengan selisih 24 cm^{-1} . Pola ini konsisten dengan temuan Satmalawati *et al.* (2020) pada pati singkong yang dioksidasi ozon terlarut, yang melaporkan bahwa kadar karbonil dapat menurun pada konsentrasi ozon tertentu karena tiga reaksi yang berlangsung bersamaan, yaitu pembentukan gugus karbonil dan karboksil, oksidasi lanjut karbonil menjadi karboksil, serta dekarboksilasi. Proses dekarboksilasi pada tahap oksidasi lanjut inilah yang dapat mengurangi jumlah gugus karbonil yang terdeteksi, sehingga penurunan kecil pada 8 ppm lebih tepat dipahami sebagai bagian dari dinamika oksidasi lanjut, bukan sekadar variasi pembacaan instrumen.

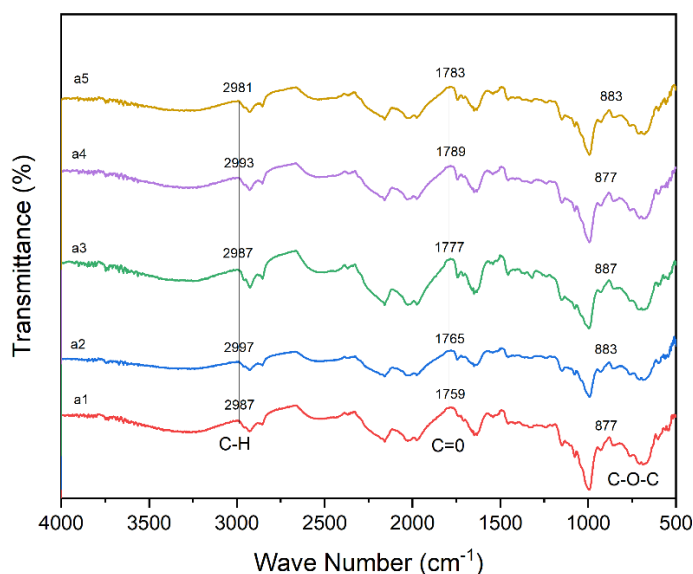
Gugus C-H

Pola gugus ini jauh lebih fluktuatif, bergerak dari 2987 cm^{-1} pada kontrol, naik ke 2997 cm^{-1} pada 2 ppm, kembali ke 2987 cm^{-1} pada 4 ppm, naik ke 2993 cm^{-1} pada 6 ppm, dan turun ke 2981 cm^{-1} pada 8 ppm, dengan selisih antara nilai tertinggi dan terendah 16 cm^{-1} . Hal ini sejalan dengan sifat reaksi ozon terhadap pati, yang secara selektif menyerang gugus hidroksil untuk membentuk gugus karbonil, melainkan bukan ikatan C-H (Maqbool *et al.*, 2024). Perubahan pada gugus ini belum efektif untuk menunjukkan pengaruh dosis ozon dibandingkan gugus karbonil, sehingga

fluktuasinya tidak sepenuhnya dapat diinterpretasikan seolah mengikuti satu arah perubahan yang tetap.

Gugus C-O-C

Wilayah 877 hingga 887 cm^{-1} pada penelitian ini merupakan daerah vibrasi ikatan glikosidik dengan konfigurasi alfa, yaitu jenis ikatan α -1,4 dan α -1,6 yang menyambungkan unit unit glukosa pada pati, berbeda dengan konfigurasi beta yang menjadi ciri khas serat seperti selulosa. Posisi puncak pada rentang tersebut merupakan hasil analisis langsung terhadap spektrum FTIR gabah beras hitam pada penelitian ini. Kesesuaian penetapan gugus fungsi ini didukung oleh temuan Bernardino-Nicanor *et al* (2017) pada pati kacang ayocote, yang melaporkan puncak serupa pada rentang sekitar 864 cm^{-1} sebagai penanda konfigurasi α khas pati. Data penelitian ini pada wilayah tersebut meningkat dari 877 cm^{-1} pada kontrol menjadi 883 cm^{-1} pada 2 ppm, naik lagi menjadi 887 cm^{-1} pada 4 ppm, kemudian turun kembali ke 877 cm^{-1} pada 6 ppm, dan naik lagi menjadi 883 cm^{-1} pada 8 ppm.



Gambar 9. Grafik Gugus Fungsi (FTIR) Gabah Beras Hitam

Pola naik turun yang tidak beraturan ini kemungkinan mencerminkan dua proses yang berjalan bersamaan dengan laju yang tidak selalu sebanding pada tiap

taraf dosis. Di satu sisi, ozon dapat menghidrolisis sebagian ikatan glikosidik terutama pada rantai amilosa yang lebih linier dan lebih mudah diakses dibandingkan amilopektin yang bercabang (Castanha *et al.*, 2017). Di sisi lain, proses oksidasi juga dapat memicu penataan ulang ikatan hidrogen baru antar rantai pati yang telah terputus sebagian. Karena difusi ozon melalui sekam yang masih melekat pada gabah bersifat terbatas dan kemungkinan tidak seragam antar taraf konsentrasi, keseimbangan kedua proses tersebut dapat berbeda dari satu taraf ke taraf lainnya sehingga menghasilkan pola yang tidak bergerak searah secara konsisten.

Ozon merupakan oksidator kuat yang dapat terurai menjadi oksigen tanpa meninggalkan residu (Maqbool *et al.*, 2024). Mekanisme oksidasi pati oleh ozon diawali dengan serangan terhadap gugus hidroksil pada karbon C2 dan C3 unit glukopiranososa, yang berada pada daerah amorf granula karena daerah ini lebih terbuka dan lebih mudah diakses dibandingkan daerah kristalin (Du *et al.*, 2024). Serangan awal ini menghasilkan gugus karbonil yang kemudian dapat teroksidasi lebih lanjut menjadi gugus karboksil (Subroto *et al.*, 2022; Gozé *et al.*, 2016). Selain oksidasi gugus hidroksil, ozon juga dapat menghidrolisis ikatan glikosidik, terutama pada rantai amilosa yang berstruktur lebih linier, yang dikenal sebagai proses depolimerisasi pati (Castanha *et al.*, 2017; Maqbool *et al.*, 2024).

Pada penelitian ini, ozon diaplikasikan pada gabah utuh dengan sekam masih melekat, bukan pada pati atau tepung yang terpapar langsung, keseluruhan rangkaian mekanisme tersebut berlangsung dengan intensitas yang lebih terbatas dibandingkan penelitian yang mengaplikasikan ozon langsung pada pati tanpa penghalang fisik. Adapun perbandingan penelitian lain yaitu menurut Du *et al.* (2024), yang menggunakan ozon dalam wujud gas namun diaplikasikan langsung pada bubuk pati beras ketan tanpa lapisan sekam, sehingga perbedaan hasil antara kedua penelitian ini lebih murni mencerminkan pengaruh keberadaan sekam sebagai penghalang.

Sementara itu, Castanha *et al.* (2017) menggunakan ozon dalam bentuk larutan pada pati kentang yang telah disuspensikan dalam air, sehingga perbedaan hasil

dengan penelitian ini tidak hanya dipengaruhi oleh ada tidaknya sekam, tetapi juga oleh perbedaan wujud ozon yang digunakan, mengingat ozon dalam larutan air berpotensi menghasilkan spesies oksidator tambahan seperti radikal hidroksil yang tidak terbentuk pada aplikasi ozon gas secara langsung. Sekam padi berfungsi sebagai lapisan pelindung mekanis alami bagi butir beras, sehingga sebagian besar ozon kemungkinan telah bereaksi dengan komponen permukaan sekam sebelum sempat menjangkau endosperma.

Arah pergeseran gugus karbonil pada penelitian ini konsisten dengan temuan Castanha *et al* (2017) pada pati kentang, yang melaporkan kenaikan kandungan gugus karbonil dan karboksil seiring bertambahnya waktu ozonisasi, serta Du *et al* (2024) pada pati beras waxy termodifikasi OSA, yang juga menunjukkan bahwa oksidasi cenderung terjadi lebih banyak pada gugus hidroksil C2 dan C3 dibandingkan posisi lainnya.

Perbedaan yang muncul terutama terletak pada besaran perubahan, sebagaimana telah dijelaskan pada bagian mekanisme sebelumnya. Perbandingan yang lebih relevan untuk penelitian ini yaitu ditunjukkan menurut Gozé *et al* (2016) pada gandum utuh, yang menemukan bahwa ozonasi pada butiran bersekam tidak memberikan pengaruh nyata terhadap sifat fisikokimia patinya, dengan hanya sedikit kenaikan kadar gugus karboksil. Temuan ini memperkuat argumentasi bahwa perlakuan ozonasi pada gabah utuh menghasilkan tingkat oksidasi yang lebih terbatas dibandingkan penelitian pada sistem pati tanpa pelindung.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini menguraikan mengenai : 5.1 Kesimpulan dan 5.2 Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan:

1. Konsentrasi ozon terbukti berpengaruh nyata terhadap kadar pati, kadar antosianin, dan RVA pada gabah beras hitam, dan konsentrasi ozon tidak berpengaruh nyata terhadap kadar air dan aktivitas air (aw).
2. Hasil XRD, SEM, dan FTIR menunjukkan perubahan yang konsisten dengan mekanisme oksidasi ozon pada seluruh konsentrasi, meskipun ketiga analisis ini bersifat deskriptif.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil evaluasi terhadap penelitian yang telah dilakukan, saran yang dapat diberikan yaitu:

1. Disarankan untuk memperluas rentang konsentrasi ozon, dari 5 taraf (0, 2, 4, 6, 8 ppm) menjadi 9 taraf lebih rapat (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 ppm) untuk memastikan pola fluktuatif pada antosianin memang nyata, bukan karena interval terlalu lebar.
2. Disarankan untuk menambah variasi durasi paparan ozon. Karena pada penelitian ini hanya menggunakan 1 durasi (30 menit), perlu diuji beberapa durasi untuk melihat apakah waktu kontak turut memengaruhi pola perubahan parameter fisik dan kimia.
3. Disarankan untuk menganalisis kandungan amilosa dan amilopektin secara terpisah, untuk membuktikan langsung dugaan bahwa fraksi amilosa lebih rentan teroksidasi dibanding amilopektin.
4. Disarankan untuk melakukan pengujian mikrobiologi pada gabah beras hitam yang diberi perlakuan ozon, mengingat penelitian ini hanya berfokus pada karakteristik fisik dan kimia sehingga efektivitas ozon sebagai agen dekontaminasi mikroba belum diuji secara langsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Aalim, H., Khalifa, I., Shishir, M. R. I., Sun, J., Zhou, C., & Zou, X. (2026). *Molecular mechanisms and functional implications of cyanidin-3-O-glucoside interactions with rice starch-protein binary matrix*. Food Chemistry: X, 33, 103527. <https://doi.org/10/1016/j.fochx.2026.103527>
- Ağagündüz, D., Ayakdaş, G., Katircioğlu, B., & Ozogul, F. (2025). *Advances in non-thermal food processing: a comprehensive approach to nutrient retention, food quality, and safety*. In Sustainable Food Technology (Vol. 3, Number 5, pp. 1284–1308). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d5fb00136f>
- Akbar, G., Ansharullah, & Rejeki, S. (2024). *Uji Fisik dan Antioksidan Berbagai Jenis Beras Merah (Oryza nivara) Asal Ereke Buto Utara* (Vol. 2, Number 1).
- Alrasyid, M. W. (2025). *Pengembangan Smart Packaging Biodegradable Berbasis Pati Singkong dengan Plasticizer Gliserol dan Indikator Antosianin Dari Bunga Telang*. Tugas Akhir Program Sarjana, Universitas Pasundan.
- Anggraeni, V. J., Ramdanawati, L., & Ayuantika, W. (2018). *Penetapan Kadar Antosianin Total Beras Merah (Oryza nivara)*. Jurnal Kartika Kimia, 1(1), 11. <https://doi.org/10.26874/jkk.v1i1.11>
- Anggraini, U. (2011). *studi sintesis ozon dengan Metode Lucutan Plasma*.
- An, H. J., & King, J. M. (2009). *Using ozonation and amino acids to change pasting properties of rice starch*. Journal of Food Science, 74(3), C278–C283. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01109.x>
- Arifa, A. H., Syamsir, E., & Budijanto, S. (2021). *Karakterisasi Fisikokimia Beras Hitam (Oryza sativa L.) dari Jawa Barat, Indonesia Physicochemical Properties of Black Rice (Oryza sativa L.) from West Jawa, Indonesia*. Jurnal Agritech, 41(1), 15–24. <https://doi.org/10.22146/agritech.53307>
- AOAC. (2005). *Official Methods of Analysis*, (18th). AOAC International, Gaithersburg, MD.
- Badan Standarisasi Nasional. (2023). *SNI-224-2023-Gabah*.
- Balai Besar Penelitian Tanaman Padi [BB Padi]. (2019). *Padi Hitam Jeliteng Kaya Manfaat*. <https://bbpadi.litbang.pertanian.go.id/index.php/info-berita/info-teknologi/padi-hitam-jeliteng-kaya-manfaat>.
- Balai Besar Penerapan Modernisasi Pertanian. (2024). *Penerapan SNI 224:2023 mutu gabah*. Diakses dari:

<https://babel.brmp.pertanian.go.id/berita/penerapan-sni-224-2023-mutu-gabah>

- Beber-Rodrigues, M., Savi, G. D., & Scussel, V. M. (2015). Ozone effect on fungi proliferation and genera susceptibility of treated stored dry paddy rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Food Safety*, 35(1), 59-65. <https://doi.org/10.1111/jfs.12144>.
- Bernardino-Nicanor, A., Acosta-García, G., Güemes-Vera, N., Montañez-Soto, J. L., de los Ángeles Vivar-Vera, M., & González-Cruz, L. (2017). *Fourier transform infrared and Raman spectroscopic study of the effect of the thermal treatment and extraction methods on the characteristics of ayocote bean starches*. *Journal of Food Science and Technology*, 54(4), 933-943. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2370-1>
- Botondi, R., Moschetti, R., Massantini, R., Monarca, D., & Cecchini, M. (2021). *Ozone in food processing: a review on current applications and future perspectives*. *Foods*, 10(2), 356. <https://doi.org/10.3390/foods10020356>
- Buléon, A., Colonna, P., Planchot, V., & Ball, S. (1998). *Starch granules: structure and biosynthesis*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 23(2), 85-112. DOI: 10.1016/S0141-8130(98)00040-3.
- Cahyana, Y., Titipanillah, R., Mardawati, E., Handarini, K., & Setiasih, I. S. (2018). *Non-starch contents affect the susceptibility of banana starch and flour to ozonation*. *Journal of Food Science and Technology*, 55(5), 1726-1733. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3085-2>.
- Castanha, N., da Matta Junior, M. D., & Augusto, P. E. D. (2017). *Potato starch modification using the ozone technology*. *Food Hydrocolloids*, 66, 343-356. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.12.001>.
- Cetinkaya N, Pazarlar S, & Paylan I C. (2022). *Ozone treatment inactivates common bacteria and fungi associated with selected crop seeds and ornamental bulbs*. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29.
- Chuwa, C., Vaidya, D., Kathuria, D., Gautam, S., Sharma, S., & Sharma, B. (2020). *Ozone O3 An Emerging Technology in the Food Industry*. *Food & Nutrition Journal*, 5. <https://doi.org/10.29011/2575-7091.100124>
- David, J., & Davtaniel, S. (2023). *Analisis Mutu Gabah dan Beras Dari Berbagai Agroekosistem Di Kalimantan Barat*. *Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian*, 21. <https://doi.org/10.33387/cannarium.v21i2.6836.g4439>
- Dewi, A. R., & Wihandani, D. M. (2025). *Kandungan dan aktivitas antioksidan senyawa antosianin pada beras hitam: Sebuah tinjauan literatur*. *Fakultas*

Kedokteran Universitas Udayana | Medicina, 56, 86–90.
<https://doi.org/10.15562/medicina.v56i2.1395>

- Dewi, T. K. (2023). *Penetapan Kadar Amilosa Pada Beberapa Beras Hitam (Oryza Sativa L.) Lokal Jawa Barat*. *Jurnal Teknologi Pangan Dan Ilmu Pertanian*, 1, 64–69.
- Dharmaputra, S. O., Halid, H., Sunjaya. (2014). *Serangan Tribolium casteneum pada Beras di Penyimpanan dan Pengaruhnya terhadap Serangan Cendawan dan Susut Bobot*. *Jurnal Fitopatologi Indonesia*, 10(4), 126.
<https://doi.org/10.14692/jfi.10.4.126>
- Du, M., Chen, L., Din, Z., Liu, X., Chen, X., Wang, Y., Zhuang, K., Zhu, L., & Ding, W. (2024). *Ozone induced structural variation in OSA waxy rice starch: Effects on the thermal behavior of starch and its stabilized Pickering emulsion*. *Food Chemistry*: X, 23, 101701. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101701>
- El-desouky, T. A. (2025). *Evaluation of ozonated and ultrasonically treated corn starch as an adsorbent for patulin in buffer solutions*. *Scientific Reports*, 15, 2264. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85108-w>.
- Fang, X., Chen, L., Zhao, W., Din, Z.-U., Wang, Y., Chen, X., Zhuang, K., & Ding, W. (2025). *Green synthesis of starch/chitosan complex via ozone-mediated Schiff reaction: Structure, thermal behaviors and surface properties*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 284(Pt 1), 138103.
- Faridah, D. N. (2011). *Perubahan Karakteristik Kristalin Pati Garut (Maranta arundinaceae L.) dalam Pengembangan Pati Resisten Tipe III*. Disertasi, Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Farizha, K. M., Legowo, A. M., & Pratama, Y. (2022). *Aplikasi Teknologi Ozon Pada Bahan Pangan*. *Jurnal Teknologi Pangan*, 5(1), 27-29.
<https://doi.org/10.14710/jtp.2021.23616>.
- Fitriyah, D., Ayu, D. P., Surya, D. P., Yohan, Y., & Ubaidillah, M. (2021). *Analisis Kandungan Senyawa Bioaktif, Nutrisi dan Aktivitas Antioksidan pada Minuman Ekstrak Beras Hitam* (Vol. 3, Number 1).
- Gaspersz, V. (1995). *Teknik Analisa Dalam Penelitian Percobaan* (Edisi Pert). Penerbit Tarsito.
- Giusti, M. M., & Wrolstad, R. E. (2001). *Characterization and Measurement of Anthocyanins by UV-Visible Spectroscopy*. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, 00, F1.2.1-F1.2.13.
<https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0102s00>

- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2017). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis (4th ed.)*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9>.
- Gorzelany, J., Kapusta, I., Zardzewiały, M., & Belcar, J. (2022). *Effects of Ozone Application on Microbiological Stability and Content of Sugars and Bioactive Compounds in the Fruit of the Saskatoon Berry (Amelanchier alnifolia Nutt.)*. *Molecules*, 27(19), 6446. <https://doi.org/10.3390/molecules27196446>.
- Gozé, P., Rhazi, L., Pauss, A., & Aussenac, T. (2016). *Starch characterization after ozone treatment of wheat grains*. *Journal of Cereal Science*, 70, 207–213. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.06.007>.
- Habibah L, Futri A, Khuzaeri A P, Shidqi F, Winata W A, & Desmawan D. (2024). *Analisis Kondisi Ketergantungan Impor Beras Di Indonesia*. *Jurnal Perspektif Ekonomi Darussalam*, 3(2), 212–222. <https://doi.org/10.24815/jped.v6i2.15000>
- Handayani, T., Sitindaon, S. H., Listiawati, Hasibuan, M., Hutapea, N., Zulhaidah, L., Saragih, J., & Aisyah, L. (2024). *Penerapan Good Agricultural practices & Good Handling practices Padi di Sumatera Utara*.
- Hartoyo, B., & Rachma, Y. A. (2022). *Pemanfaatan Teknologi Ozon Sebagai Green Technology pada Penanganan Hasil Pertanian Utilization Of Ozone Technology As Green Technology In Handling Agricultural Products*. In *Jurnal Agrifoodtech* (Vol. 1, Number 2). <https://jurnal2.untagsmg.ac.id/index.php/agrifoodtech>
- Hebishy, E., Buchanan, D., Rice, J., & Oyeyinka, S. A. (2024). *Variation in amylose content in three rice variants predominantly influences the properties of sushi rice*. *Journal of Food Measurement and Characterization*, (6), 4545–4557. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02513-x>
- He, Y., Ye, F., Tao, J., Zhang, Z., & Zhao, G. (2023). *Ozone exposure tunes the physicochemical properties of sweet potato starch by modifying its molecular structure*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 236, 124002. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124002>
- Hidayah, N., Winarti, C., & Ahmad, U. (2021). *Ozone to Overcome Aspergillus flavus and Aflatoxin in Grains: Opportunities and Challenges of Implementation*. *Jurnal Penelitian Dan Pengembangan Pertanian*, 40(2), 149. <https://doi.org/10.21082/jp3.v40n2.2021.p149-158>
- Hu, S., Mu, H., Wang, Y., Jing, L., Wang, Y., Huang, J., & Yang, L. (2025). *Ozone stress during rice growth impedes grain filling capacity of inferior spikelets but not that of superior spikelets*. *Agronomy*, 15(8), 1809.

- IRRI. (1996). *Strandard Evaluation System for Rice* (Edition 4). IRRI.
- Isnawati. (2022). *Analisis Kebutuhan dan Konsumsi Beras Masyarakat Indonesia Tahun 2021*. Journal of Economics and Social Sciences, 1, 42–48.
- Iswari, K. (2012). *Kesiapan Teknologi Panen dan Pascapanen Padi Dalam Menekan Kehilangan Hasil dan Meningkatkan Mutu Beras*. Jurnal Litbang Pertanian (Vol. 31, Number 2).
- Kamsiati, E., Dharmawati, E., & Haryadi, Y. (2018). *Karakteristik Fisik dan Kimia Beras Indigenous dari Lahan Pasang Surut di Kalimantan Tengah*. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pascapanen Pertanian.
- Kaur, K., Kaur, P., Kumar, S., Zalpouri, R., & Singh, M. (2023). *Ozonation as a Potential Approach for Pesticide and Microbial Detoxification of Food Grains with a Focus on Nutritional and Functional Quality*. In Food Reviews International (Vol. 39, Number 9, pp. 6129–6161). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2092129>
- Koswara, S. (2009). *Teknologi Modifikasi Pati*. Ebookpangan, 1-32. <https://tekpan.unimus.ac.id/wp-content/uploads/2013/07/TEKNOLOGI-MODIFIKASI-PATI.pdf>.
- Kristamtini, K., & Wiranti, E. W. (2017). *Clustering of 18 Local Black Rice Base on Total Anthocyanin*. Biology, Medicine, & Natural Product Chemistry, 6(2), 47. <https://doi.org/10.14421/biomedich.2017.62.47-51>
- Labida, L. (2014). *Analisis kondisi lingkungan mikro dan desain fungsional gudang beras (Studi kasus Bulog Gede Bage Bandung)*. Universitas Padjadjaran.
- Laboratorium X-Ray, D. (2020). *Standard Operating Procedure X-Ray Diffractometer (SOP) Rev 1.0*.
- Lee, J., Durst, R. W., & Wrolstad, R. E. (2005). *Determination of Total Monomeric Anthocyanin Pigment Content of Fruit Juices, Beverages, Natural Colorants, and Wines by the pH Differential Method: Collaborative Study*. Journal of AOAC International, 88(5), 1269-1278. <https://doi.org/10.1093/jaoac/88.5.1269>
- Lin, X., Zhang, X., Du, B., & Xu, B. (2023). *Morphological, structural, thermal, pasting, and digestive properties of starches isolated from different varieties of rice: A systematic comparative study*. Foods, 12(24), 4492. <https://doi.org/10.3390/foods12244492>
- Liu, Z., Guo, C., Chen, M., Xu, Y., Ma, J., Wang, R., & Wu, Z. (2026). *Mechanisms and effects of ozone-pullulanase treatment on multiscale structures and in vitro digestibility of rice starch*. Food Chemistry

- Madhumathy, S. (2021). *Water activity and its impacts on food stability*. International Journal of Food and Nutritional Sciences, 10(1), 832-851. <https://www.ijfans.org/issue-content/water-activity-and-its-impacts-on-food-stability-11094>
- Mahi, F., Mukhlisah, N., Herawaty, Harlina, Rosmiati. (2023). *Perubahan Kualitas Beras Selama Masa penyimpanan*. Journal Tabaro Agriculture Science. 7(1). <http://doi.org/10.35914/tabaro.v7i1.2298>
- Makarim, A. K. , & Suhartatik, E. (2009). *Morfologi dan Fisiologi Tanaman Padi. Sukamandi-Subang Balai Besar Penelitian Tanaman Padi, Balitbangtan, Kementerian Pertanian RI*.
- Martina, A. A., Dulbari, Kartahadimaja, J., & Subarjo. (2024). *Kualitas Beras dan Kandungan Gizi Tiga Genotipe Padi yang Dibudidayakan secara Organik dan Non Organik Rice Quality and Nutritional Content of Three Rice Genotypes Grown in Organic and Non-Organic Systems*. Jurnal Planta Simbiosis, 6(1), 38–52. <https://doi.org/10.25181/jplantasimbiosa.v6i1.3512>
- Maqbool, N., Dar, A. H., Dash, K. K., Srivastava, S., Pandey, V. K., Shams, R., Aga, M. B., Majeed, T., & Manzoor, S. (2024). *Ozonation effects on structural and functional characteristics of starch*. Future Foods. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2023.100334>.
- Mita, A. J. K., & Rahmatiyah. (2025). *Pengaruh Durasi Penjemuran Terhadap Kualitas Gabah Padi pada Proses Pengeringan*. Botani : Publikasi Ilmu Tanaman Dan Agribisnis, 2, 91–198. <https://doi.org/https://doi.org/10.62951/botani.v2i1.179>
- Modesti, M., Macaluso, M., Taglieri, I., Bellincontro, A., & Sanmartin, C. (2021). *Ozone and Bioactive Compounds in Grapes and Wine*. Foods, 10(12), 2934. <https://doi.org/10.3390/foods10122934>.
- Moura, H. V., Gusmão, R. P. de, Gusmão, T. A. S., Castro, D. S. de, Almeida, R. L. J., & Figueirêdo, R. M. F. de. (2020). *Extraction and Characterization of Native Starch From Black and Red Rice*. Journal of Agricultural Studies, 8(3), 1. <https://www.macrothink.org/journal/index.php/jas/article/view/1683>.
- Mudhor, M. A., Dewanti, P., Handoyo, T., & Ratnasari, T. (2022). *Pengaruh Cekaman Kekeringan Terhadap Pertumbuhan dan Produksi Tanaman Padi Hitam Varietas Jeliteng Effect of Drought Stress on Growth and Production of Black Rice Plants of Jeliteng Varieties*. Jurnal Agrikultura, 3(3), 247–256.
- Nandiyanto, A. B. D., Oktiani, R., & Ragadhita, R. (2019). *How to Read and Interpret FTIR Spectroscopy of Organic Material*. Indonesian Journal of Science and Technology, 4(1), 97-118. <https://doi.org/10.17509/ijost.v4i1.15806>

- Nur, R., & Banjari, M. A. A. (2019). *Pengaruh Jenis Media Pengering Gabah Padi (Oryza Sativa L.) Terhadap Tingkat Kandungan Air* (Vol. 07, Number 2).
- Nurhidayah, S., & Firmansyah, E. (2021). *Penerimaan Konsumsi Nasi Beras Hitam Untuk Mencegah Penyakit Diabetes Di Kelompok Wanita Tani Zahra Kota Tasikmalaya*. *Journal of Empowerment Community*, 3.
- Nurhidajah, Rosidi, A., Yonata, D., & Pranata, B. (2022). *Optimizing extraction of functional compounds from Indonesian black rice using response surface methodology*. *Food Research*, 6(4), 83-91. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.6\(4\).732](https://doi.org/10.26656/fr.2017.6(4).732).
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2023). *Ozone exposure limits*. U.S. Department of Labor
- Oliveira , A. P. de, Albuquerque, T. M. R. de, & Souza, E. L. de. (2026). *Deciphering Pigmented Rice Varieties as Sustainable and Unexplored Valuable Sources of Bioactive Components With Health-Related Properties and Technological Applications: A Systematic Review*. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70355>.
- Palupi, T., Rahmidiyani, R., Asnawati, A., & Aprizkiyandari, S. (2023). *Karakterisasi Padi Beras Hitam Beliah Asal Kabupaten Bengkayang Kalimantan Barat Pada Lahan Sawah Pasang Surut*. *Jurnal Agrotek Tropika*, 11, 243–248. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.23960/jat.v11i2.6280>
- Prabha, V., Singh, R., & Madan, A. (2015). *Ozone Technology in Food Processing: A Review*. *Trends in Biosciences*, 8(16), 4031–4047. <https://www.researchgate.net/publication/305399037>
- Pramitasari, R., & Angelica, N. (2020). *Ekstraksi, Pengeringan Semprot, dan Analisis Sifat Fisikokimia Antosianin Beras Hitam (Oryza sativa L.)*. *Jurnal Aplikasi Teknologi Pangan*, 9(2), 83–94. <https://doi.org/10.17728/jatp.5889>
- Pranata, C., Silalahi, J., Yuandani, & Cintya, H. (2022). *Pengaruh Pengolahan Berbagai Jenis Beras Terhadap Kadar Karbohidrat Effect Of Processing Various Types of Rice on Carbohydrate Levels* (Vol. 5). <http://ejournal.medistra.ac.id/index.php/JFM>
- Pusat Perpustakaan dan Literasi Pertanian. (2014). *Merangkum artikel di Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pertanian*, Vol. 33 No. 1 Tahun 2014. <https://pustaka.setjen.pertanian.go.id>.
- Putri, P. N., Yunaída, Hendrival, Wirda, Z., Munauwar, M. M. (2023). *Pengaruh Kadar Air Dan Periode Penyimpanan Beras Terhadap Populasi Sitophilus*

- zeamaish Dan Kerusakan Beras. *Jurnal Agrium*. 20(3). <https://doi.org/10.29103/agrium.v20i3.13183>
- Rachmaselly, A., Setiasih, I. S., Sukarminah, E., & Rialita, T. (2020). *Kajian Proses Ozonasi Tepung Hanjeli (Studi Literatur)*. *Jurnal Teknologi Pangan dan Hasil Pertanian*, 14(1), 10-15. <https://doi.org/10.26623/jtphp.v14i1.12888>.
- Rahmayanti N, Supratomo, & Hutabarat O S. (2015). *Model Pengeringan Lapisan Tipis Gabah Ketan (Oryza sativa glutinosa) Varietas Setail dan Varietas Ciasem*. *Jurnal AgriTechno*.
- Rahmayuni, E., Sukmadewi, R., Kurniati, & Herman, W. (2024). *Peningkatan Produksi Tanaman Padi Hitam (Oryza sativa L. indica) Varietas Jeliteng dengan Pemberian Pupuk Silika Cair*. *Jurnal Ilmu Pertanian*, 9.
- Ramli, N. A. M., Rahiman, M. H. F., Kamarudin, L. M., Mohamed, L., Zakaria, A., Ahmad, A., & Rahim, R. A. (2021). *A new method of rice moisture content determination using voxel weighting-based from radio tomography images*. *Sensors*, 21(11), 3686. <https://doi.org/10.3390/s21113686>.
- Ramos, G. V. C., Branco, I. G., da Matta Junior, M. D., Ferreira, J. A., Ditchfield, C., do Amaral Sobral, P. J., & Moraes, I. C. F. (2024). *Structural and functional properties of ozone-treated quinoa starch*. *Polymer*, 308, 127314. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127314>
- Rianda, C. N. (2018). *Daya Serap Pembelian Gabah Lokal Terhadap Daya Produksi Petani (Studi Perum Bulog Sub-Divre Meulaboh)*.
- Romadani, F. P., & Hendriwal. (2018). *Kajian Kerentanan dan Kerusakan Beras Lokal Provinsi Sumatera Selatan Terhadap Hama Pascapanen Sitophilus oryzae L. (Coleoptera: Curculionidae)*. In Edisi Agustus (Vol. 4, Number 2).
- Sachadyn-Król, M., & Agriopoulou, S. (2020). *Ozonation as a Method of Abiotic Elicitation Improving the Health-Promoting Properties of Plant Products—A Review*. *Molecules*, 25(10), 2416. <https://doi.org/10.3390/molecules25102416>.
- Sadowska-Bartosz, I., & Bartosz, G. (2024). *Antioxidant Activity of Anthocyanins and Anthocyanidins: A Critical Review*. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(22), 12001. <https://doi.org/10.3390/ijms252212001>.
- Sahdiah, H., & Kurniawan, R. (2023). *Optimasi Tegangan Akselerasi pada Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDX) untuk Pengamatan Morfologi Sampel Biologi*. *Jurnal Sains dan Edukasi Sains*, 6(2), 117-123. <https://doi.org/10.24246/juses.v6i2p11-123>.
- Sari, A. R., Martono, Y., & Rondonuwu, F. S. (2020). *Identifikasi Kualitas Beras Putih (Oryza sativa L.) Berdasarkan Kandungan Amilosa dan Amilopektin di*

- Pasar Tradisional dan “Selepan” Kota Salatiga*. Titian Ilmu: Jurnal Ilmiah Multi Sciences, 12(1), 24–30. <https://doi.org/10.30599/jti.v12i1.599>
- Sari, I. M., Latuserimala, G., & Ansiska, P. (2023). *GEOFORUM. Kajian Teknologi Ozon (O3) Sebagai Penanganan Pascapanen Produk Hortikultura. Study of Ozone (O3) Technology for Post-Harvest Handling of Horticultural Products*. Jurnal Geografi dan Pendidikan Geografi. 2, 122–128. <https://doi.org/10.30598/geoforumvol3iss1pp122-128>
- Satmalawati, E. M., Pranoto, Y., Marseno, D. W., & Marsono, Y. (2020). *Oxidation of cassava starch at different dissolved ozone concentration: Effect on functional and structural properties*. Food Research, 4(6), 1896–1904. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.4\(6\).209](https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(6).209)
- Sawada, H., Tsukahara, K., Kohno, Y., Suzuki, K., Nagasawa, N., & Tamaoki, M. (2016). *Elevated ozone deteriorates grain quality of japonica rice cv. Koshihikari, even if it does not cause yield reduction*. Rice, 9, 7
- Setiasih, I. S., Hanidah, I.-I., Mardawati, E., Cahyana, Y., Sukarminah, E., Djali, M., Rialita, T., & Andoyo, R. (2020). *Implementasi Proses Ozonasi Pada Cabe Merah Di Sub Terminal Agribisnis Kabupaten Ciamis* (Vol. 9, Number 3).
- Setiawati, D. (2020). *Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Kualitas Gabah Di Indonesia Factors That Effect Grain Quality In Indonesia*. Jurnal Ekonomi Pertanian Dan Agribisnis, 4, 783–793. <https://doi.org/10.21776/ub.jepa.2020.004.04.08>
- Setiawati, H., Marsono, Y., & Sutedja, A. M. (2013). *Kadar Antosianin Dan Aktivitas Antioksidan Flake Beras Merah dan Beras Ketan Hitam Dengan Variasi Suhu Perebusan* (Anthocyanin content and antioxidant activity of red rice and black glutinous rice flake with variation in boiling temperature).
- Shah, N. N. A. K., Rahman, R. A., & Hashim, D. M. (2015). *Changes in physicochemical characteristics of ozone-treated raw white rice*. Journal of Food Science and Technology, 52, 1525–1529. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1111-y>
- Siahaan, S. P., & Widayanti, S. M. (2020). *Seminar Nasional dalam Rangka Dies Natalis*. 4(1), 76.
- Sitoe, E. D. P. E., Pacheco, F. C., & Chilala, F. D. (2025). *Advances in ozone technology for preservation of grains and end products*. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 24(3), e70173. <https://doi.org/10.1111/1541-43337.70173>
- Siska, A. i, Rachmani, E. P. N., Widyawati, P. S., Darmakusuma, D., Kamarudin, A. P., Astuti, S. D., Budaraga, I. K., Arafah, E., Julianti, E., Lumbessy, A. S.,

- Febriati, N., Kunarto, B., & Mutis, A. (2024). *Teknologi Pengolahan Pangan Herbal*. CV HEI PUBLISHING INDONESIA
- Sivaranjani, S., Prasath, V. A., Pandiselvam, R., Kothakota, A., & Khaneghah, A. M. (2021). *Recent advances in applications of ozone in the cereal industry*. Food Science and Technology, 146, 111412. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111412>.
- Subekti, A., & Abdullah, U. (2023). *Keragaman Enam Varietas Unggul Baru Padi Khusus Pada Lahan Sub Optimal Di Kalimantan Barat Performances Of Six High-Yielding and Functional Rice Varieties On Sub Optimal Land Of West Kalimantan*. Jurnal Pertanian Agros, 25(1), 514–520.
- Subroto, E., Sitha, N., Filianty, F., Indiarto, R., & Sukri, N. (2022). *Freeze Moisture Treatment and Ozonation of Adlay Starch (Coix lacryma-jobi): Effect on Functional, Pasting, and Physicochemical Properties*. Polymers, 14(18), 3854. <https://doi.org/10.3390/polym14183854>.
- Suhartatik, N., Karyantina, M., Mustofa, A., Cahyanto, M. N., Raharjo, S., & Rahayu, E. S. (2013). *Stabilitas Ekstrak Antosianin Beras Ketan (Oryza sativa var. glutinosa) Hitam Selama Proses Pemanasan dan Penyimpanan Stability of Anthocyanins Extracted from Black Glutinous Rice (Oryza sativa var. glutinosa) during Heating and Storage Process*. In AGRITECH (Vol. 33, Number 4).
- Sujatno, A., Salam, R., Bandriyana, & Dimyati, A. (2015). Studi Scanning Electron Microscopy (SEM) untuk karakterisasi proses oksidasi paduan zirkonium. *Jurnal Forum Nuklir*, 9(1), 44–50. <https://doi.org/10.17146/jfn.2015.9.1.3563>
- Sumardiono, S., Jos, B., Pudjihastuti, I., Yafiz, A. M., Rachmasari, M., & Cahyono, H. (2021). *Physicochemical Properties of Sago Ozone Oxidation: The Effect of Reaction Time, Acidity, and Concentration of Starch*. Foods, 10(6), 1309. <https://doi.org/10.3390/foods10061309>.
- Syafarudin, A., & Novia. (2013). *Produksi Ozon Dengan Bahan Baku Oksigen Menggunakan Alat Ozon Generator*. Jurnal Teknik Kimia (Vol. 19, Number 2).
- Syahbanu et al., (2023). *Struktur Pati Beras (Oryza sativa L.) dan Mekanisme Perubahannya pada Fenomena Gelatinisasi dan Retrogradasi*. Agrotek, 17(4), 755-767. DOI: 10.21107/agrotek.v17i4.15315
- Tetlow, I. J., & Bertoft, E. (2020). *A review of starch biosynthesis in relation to the building block-backbone model*. International Journal of Molecular Sciences, 21(19), 7011. <https://doi.org/10.3390/ijms21197011>

- Tiwari, B. K., Brennan, C. S., Curran, T., Gallagher, E., Cullen, P. J., & O'Donnell, C. P. (2010). *Application of ozone in grain processing*. *Journal of Cereal Science*, 51(3), 248-255. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.01.007>.
- Tiwari, B. K., O'Donnell, C. P., Patras, A., Brunton, N. P., & Cullen, P. J. (2009). *Effect of ozone processing on anthocyanins and ascorbic acid degradation of strawberry juice*. *Food Chemistry*, 113(4), 1119–1126. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.08.085>
- Tiwari, B. K., O'Donnell, C. P., Muthukumarappan, K., & Cullen, P. J. (2009). *Anthocyanin and colour degradation in ozone treated blackberry juice*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 10(1), 70–75. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2008.08.002>
- Tjahjanto, R. T., Wardhani, S., & Anggraini, U. (2012). *Studi Sintesis Ozon Dengan Metode Lucutan Plasma*. 1(April), 1–2.
- Uivarasan, A., Lukinac, J., Jukić, M., Šelo, G., Peter, A., Nicula, C., Mihaly Cozmata, A., & Mihaly Cozmata, L. (2024). *Characterization of polyphenol composition and starch and protein structure in brown rice flour, black rice flour and their mixtures*. *Foods*, 13(11), 1592. <https://doi.org/10.3390/foods13111592>.
- Wang, L., Shao, H., Luo, X., Wang, R., Li, Y., Li, Y., Luo, Y., & Chen, Z. (2016). *Effect of ozone treatment on deoxynivalenol and wheat quality*. *PLoS ONE*, 11(1), e0147613. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147613>
- Wardhani, A. W. K., Muhandri, T., Faridah, D. N., & Andarwulan, N. (2024). *Physical, Chemical, Functional, and Sensory Characteristics of Instant Savory Rice Compared to Instant White Rice*. *Jurnal Teknologi Dan Industri Pangan*, 35(1), 92–105. <https://doi.org/10.6066/jtip.2024.35.1.92>
- Wicaksono, Nurdin, A. M., Irwan, A. W., Maxiselly, Y., & Nurmala, T. (2019). 20439-76575-1-PB. *Pertumbuhan dan hasil padi hitam yang diberi chlormequat chloride di lahan basah pada musim kemarau*. *Jurnal Kultivasi*, 18(3).
- Xue, W., Macleod, J., & Blaxland, J. (2023). *The Use of Ozone Technology to Control Microorganism Growth, Enhance Food Safety and Extend Shelf Life: A Promising Food Decontamination Technology*. *Foods*, 12(4), 814. <https://doi.org/10.3390/foods12040814>
- Yoshimura, Y., Zaima, N., Moriyama, T., & Kawamura, Y. (2012). *Different localization patterns of anthocyanin species in the pericarp of black rice revealed by imaging mass spectrometry*. *PLoS ONE*, 7(2), e31285. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0031285>

LAMPIRAN

Lampiran 1. Prosedur Analisis Kadar Air Metode Gravimetri (AOAC, 2005)

Prinsip dasar dari pengukuran kadar air dengan metode gravimetri adalah menguapkan air yang terkandung dalam bahan pangan dengan cara pemanasan. Bahan kemudian ditimbang hingga beratnya konstan yang berarti semua air telah menguap (AOAC, 2005).

Prosedur pengukuran kadar air dengan metode ini yaitu dengan memanaskan cawan porselen pada oven dengan suhu 105°C selama 30 menit, kemudian cawan diambil dan didinginkan dalam eksikator selama 30 menit. Cawan yang telah dingin selanjutnya ditimbang secara berulang hingga didapatkan berat konstan (W₀). Timbang sampel 1 gram (W_s) pada cawan yang telah di dapat berat konstan (W₁). Cawan yang berisi sampel kemudian dikeringkan menggunakan oven selama 3 jam dengan suhu 105°C, setelah itu cawan dimasukkan ke dalam eksikator selama 30 menit hingga dingin dan selanjutnya cawan dengan sampel (W₂) ditimbang kembali. Lakukan pengeringan ini sampai didapat berat konstan.

Rumus Perhitungan Kadar Air

$$\% \text{ Kadar Air} = \frac{W_1 - W_2}{W_1 - W_0} \times 100$$

Keterangan:

- W₀ : Berat cawan konstan
- W₁ : Berat cawan konstan + sampel
- W₂ : Berat cawan + sampel konstan

Lampiran 2. Prosedur Analisis Kadar Pati Metode Luff Schoorls (Wardhani et al., 2024)

Berdasarkan pati dalam sampel dihidrolisis menjadi glukosa. Glukosa sebagai gula pereduksi akan mereduksi ion Cu^{2+} dalam larutan Luff–Schoorl menjadi Cu^+ selama pemanasan. Sisa Cu^{2+} kemudian bereaksi dengan iodida (KI) dalam suasana asam menghasilkan iodium bebas, yang dititrasi dengan larutan natrium tiosulfat. Selisih volume titrasi antara blanko dan sampel digunakan untuk menghitung kadar glukosa berdasarkan tabel Luff–Schoorl, selanjutnya dikonversi menjadi kadar pati.

Sampel ditimbang 100 mg pada neraca analitik, ditambahkan aquadest 50 mL, HCl 25% sebanyak 5 mL, dan sampel direfluks selama 3 jam, kemudian didinginkan. Suspensi dinetralkan sampai pH 7 menggunakan NaOH 25%. Suspensi dipindahkan ke dalam labu takar 100 mL, diencerkan hingga mencapai tanda tera menggunakan aquadest, kemudian disaring menggunakan kertas saring. Sebanyak 25 mL filtrat dari persiapan sampel dicampur dengan 25 mL larutan Luff Schoorl. Blanko dibuat dengan mencampurkan 25 mL aquadest dan 25 mL larutan Luff Schoorl. Campuran larutan ini direfluks dan dipanaskan hingga mendidih (dipertahankan selama 10 menit). Larutan didinginkan dan ditambahkan 15 mL KI 20% serta 25 mL H_2SO_4 25%. Larutan tersebut kemudian ditutup dan dibiarkan dalam keadaan gelap selama 30 menit. Iodium yang dilepaskan selama proses ini kemudian dititrasi menggunakan larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,1 N dengan menambahkan 2 mL indikator pati untuk membantu mendeteksi perubahan warna yang terjadi selama proses titrasi hingga selesai. Glukosa (mg) dihitung berdasarkan tabel Luff Schoorl.

Rumus Perhitungan Kadar Pati

$$\Delta V_{\text{tio}} = V_{\text{blanko}} - V_{\text{sampel}}$$

$$\text{mg Glukosa} = \left[\left(\frac{mg_2 - mg_1}{V_2 - V_1} \right) \times (\Delta V_{\text{tio}} - V_1) \right] + mg_1$$

$$\% \text{ Pati} = \frac{\text{mg Glukosa} \times FP \times 0,9}{\text{mg Sampel}} \times 100\%$$

Keterangan:

V_{blanko}	: Volume Tio yang digunakan untuk menitrasi larutan tanpa sampel
V_{sampel}	: Volume Tio yang digunakan untuk menitrasi larutan dengan sampel
mg 1	: Massa glukosa dalam tabel pada baris atas (nilai lebih kecil)
mg 2	: Massa glukosa dalam tabel pada baris bawah (nilai lebih besar)
V1	: Volume Tio dalam tabel pada baris atas (nilai lebih kecil)
V2	: Volume Tio dalam tabel pada baris bawah (nilai lebih besar)
FP	: Faktor pengenceran
0,9	: Faktor konversi

Lampiran 3. Prosedur Analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) (Alrasyid, 2025)

Analisis FT-IR direkam pada spektrofotometer Shimadzu 4300 FT-IR, menggunakan teknik disk kalium bromide, dalam kisaran 4200-400 cm^{-1} . Disk disiapkan dari sampel yang digiling (1 mg) dan KBr (100 mg) menggunakan 400 kg/cm^2 tekanan selama 10 menit.

Lampiran 4. Prosedur Analisis Antosianin Metode *pH-Diferensial* (Anggraeni et al., 2018)

a) Preparasi dan ekstraksi antosianin

Sampel yang akan dianalisis dikeringkan dan dihaluskan, kemudian sebagian sampel sebesar 1,00 g ditimbang dan diekstraksi dengan pelarut asam (metanol + HCl 1%, v/v) sebanyak 20 mL menggunakan rasio sampel:pelarut 1:20 (w/v). Ekstraksi dilakukan secara maserasi pada suhu kamar ($\pm 25^\circ\text{C}$) dalam kondisi gelap selama 24 jam dengan agitasi ringan. Setelah maserasi, campuran disaring dan filtrat dikumpulkan, residu diekstraksi ulang satu kali untuk meningkatkan rendemen lalu filtrat digabungkan. Filtrat gabungan dipekatkan menggunakan rotary evaporator pada suhu $<40^\circ\text{C}$ hingga mendekati kental, kemudian dilarutkan kembali dalam volume akhir yang diketahui (misalnya 10 mL atau 25 mL) menggunakan metanol-HCl 1% dan disimpan dalam botol amber pada 4°C sampai analisis dilaksanakan..

b) Pembuatan larutan *buffer* kalium klorida (pH 1,0)

Membuat larutan *buffer* kalium klorida pH 1,0 dilakukan dengan melarutkan 0,465 g kalium klorida (KCl) dalam aquadest menggunakan labu ukur 250 mL hingga tanda batas. Selanjutnya pH larutan diukur dengan pH-meter dan disesuaikan secara perlahan hingga mencapai $\text{pH } 1,0 \pm 0,1$ dengan penambahan asam klorida (HCl) secara bertahap, kemudian larutan dihomogenkan dan disimpan sebagai *buffer* pH 1,0 untuk analisis pH diferensial.

c) Pembuatan larutan *buffer* natrium asetat (pH 4,5)

Membuat larutan *buffer* natrium asetat pH 4,5 dilakukan dengan melarutkan 8,2 g natrium asetat dalam aquadest menggunakan labu ukur 250 mL hingga tanda batas. Selanjutnya pH larutan diukur dengan pH-meter dan disesuaikan secara perlahan hingga mencapai $\text{pH } 4,5 \pm 0,1$ dengan penambahan asam klorida (HCl) secara bertahap, kemudian larutan dihomogenkan dan disimpan sebagai *buffer* pH 4,5 untuk analisis pH diferensial.

d) Penentuan panjang gelombang maksimum (λ_{maks})

Untuk menetapkan λ_{maks} , sebanyak 1,0 mL ekstrak diencerkan dengan 5,0 mL metanol dan spektrum absorbansi larutan diukur menggunakan spektrofotometer UV–Vis pada rentang 400–800 nm; panjang gelombang dengan nilai absorbansi tertinggi ditetapkan sebagai λ_{maks} dan akan digunakan pada pengukuran pH diferensial berikutnya.

e) Penetapan Kadar Antosianin Total dengan Metode pH *Differential*

Penetapan kadar antosianin total dilakukan dengan membuat dua larutan uji yang identik kecuali pH. 25 mg ekstrak dilarutkan dalam 5,0 mL metanol yang mengandung 1% HCl, kemudian dari larutan tersebut diambil 1,0 mL dan dipindahkan ke dua vial terpisah. Vial pertama ditambahkan 5,0 mL *buffer* KCl pH 1,0 dan vial kedua ditambahkan 5,0 mL *buffer* natrium asetat pH 4,5, setelah itu kedua larutan dikocok hingga homogen dan dibiarkan pada suhu ruang dalam keadaan gelap selama 30 menit sampai 1 jam sebelum pengukuran. Setelah waktu inkubasi, absorbansi masing-masing larutan diukur pada λ_{maks} dan pada 700 nm (untuk koreksi kekeruhan) menggunakan spektrofotometer UV–Vis dengan blanko yang sesuai (metanol + *buffer* pH 1,0 atau 4,5).

Rumus Perhitungan Kadar Antosianin

$$A = (A_{510} - A_{700})_{10} - (A_{510} - A_{700})_{4,5}$$

$$\text{Konsentrasi antosianin (mg/L)} = \frac{A \times BM \times FP \times 1000}{\epsilon \times b}$$

Keterangan:

A : Absorbansi sampel

BM : Berat molekul dihitung sebagai sianidin-3-glukosida (BM = 449,2) (g/mol)

FP : Faktor pengenceran

b : Lebar kuvet = 1 cm

ϵ : Absorptivitas molar sianidin-3-glukosida = 26.900 L/mol.cm

1000 : Faktor konversi untuk perhitungan dalam mg/L sampel

Lampiran 5. Prosedur Analisis *X-Ray Diffractometer* (XRD) (Laboratorium X-Ray, 2020)

Siapkan sampel yang akan dianalisis, kemudian merekatkannya pada kaca dan kemudian memasangnya pada tempatnya berupa lempeng tipis berbentuk persegi panjang (sampel *holder*) dengan lilin perekat. Setelah itu sampel yang telah disimpan pada sampel *holder* kemudian diletakan pada sampel stand dibagian goniometer. Kemudian masukkan parameter pengukuran pada software pengukuran melalui komputer pengontrol, yaitu meliputi penentuan *Scan* mode, penentuan rentang sudut, kecepatan *Scan* cuplikan, memberi nama cuplikan dan memberi nomor urut file data. Setelah itu mengoperasikan alat difraktometer dengan perintah "*start*" pada menu komputer, dimana sinar-X akan meradiasi sampel yang terpancar dari target Cu dengan panjang gelombang 1,5406 Å. Untuk melihat hasil difraksi pada komputer dan intensitas difraksi pada sudut 2θ tertentu dapat dicetak oleh mesin printer. Data yang terekam berupa sudut difraksi (2θ), besarnya intensitas (*I*), dan waktu pencatatan perlangkah (*t*). Setelah itu data diperoleh analisis kualitatif dengan menggunakan search match analysis, yaitu membandingkan data yang diperoleh dengan data standar (*Power Diffraction File database = database PDF*)

Lampiran 6. Prosedur Analisis Mikroskopis (Microscopic Analysis) Metode Scanning Electron Microscope (SEM) (Rohmah et al., 2022)

Scanning Electron Microscopy (SEM) dilakukan untuk analisis mikroskopis produk. Sampel ditempelkan pada sample holder alumunium kemudian dilapisi dengan logam emas pada keadaan vakum dengan alat gold sputter coater. 50 sampel tersebut kemudian dimasukkan kedalam mikroskop SEM. Gambar topografi diamati sampai perbesaran 1000-5000x.

Lampiran 7. Prosedur Analisis RVA (*Rapid Visco Analyzer*) (Hebishy et al., 2024)

Analisis dengan menggunakan *Rapid Visco Analyzer* (RVA 4500, Perten/PerkinElmer). Sampel yang sudah diketahui memiliki kadar air 14%. Kemudian ditimbang sebanyak 2,5 g (basis kering) dan dimasukkan ke dalam tabung canister RVA. Selanjutnya ditambahkan 25 g aquadest sehingga terbentuk suspensi pati yang dihomogenkan secara perlahan untuk menghindari pembentukan gumpalan dan gelembung udara. Canister dipasang pada instrumen dan pengujian dijalankan menggunakan program pemanasan dan pendinginan standar yang dimulai pada 50 °C, dipanaskan bertahap hingga 95 °C, lalu didinginkan kembali ke 50 °C dengan laju pemanasan, pendinginan, dan waktu penahanan yang terkontrol sesuai pengaturan instrumen. Selama pengujian, perangkat lunak RVA merekam perubahan viskositas secara kontinu terhadap waktu dan suhu sehingga terbentuk kurva pasting, dari kurva tersebut diambil parameter utama yaitu *Peak Viscosity*, *Trough Viscosity*, *Breakdown*, *Final Viscosity*, *Setback* , *Pasting Temperature*, dan *Peak Time*. Hasil analisis RVA digunakan untuk mengevaluasi karakteristik gelatinisasi dan stabilitas pati atau beras selama proses pemanasan dan pendinginan.

Lampiran 8. Prosedur Analisis Aktivitas Air (Aw) dengan menggunakan Aw Meter (AOAC, 2005)

Pengujian Aw Gabah Beras Hitam yang sudah dihaluskan dalam bentuk tepung Beras Pecah Kulit (BPK) dilakukan dengan pengambilan sampel ke dalam wadah sampel sampai terisi setengahnya kemudian disimpan ke dalam alat Aw meter lalu dilakukan pembacaan Aw oleh alat.

Lampiran 9. Perhitungan Kebutuhan Sampel Gabah Beras Hitam

Tabel 18. Perhitungan Kebutuhan Sampel Gabah Beras Hitam

No	Analisis	Bahan	Kebutuhan	Total (gram)
1.	Kadar Air	Gabah Beras Hitam	1 gram x 15 sampel	15
2.	Kadar Antosianin	Gabah Beras Hitam	5 gram x 15 sampel	75
3.	Kadar Pati	Gabah Beras Hitam	1 gram x 15 sampel	15
4.	RVA	Gabah Beras Hitam	4 gram x 15 sampel	60
5.	FTIR	Gabah Beras Hitam	1 gram x 5 sampel	5
6.	XRD	Gabah Beras Hitam	1 gram x 5 sampel	5
7.	SEM	Gabah Beras Hitam	1 gram x 5 sampel	5
8.	AW	Gabah Beras Hitam	2 gram x 15 sampel	30
Total				210

Lampiran 10. Perhitungan Kebutuhan Bahan Baku

Tabel 19. Perhitungan Kebutuhan Bahan Baku

No	Nama Bahan	Harga	Keterangan	Jumlah	Total
1.	Gabah Beras Hitam	Rp15.000	Kg	1	Rp15.000
Total					Rp15.000

Lampiran 11. Rincian Biaya Analisis Penelitian

Tabel 20. Rincian Biaya Analisis Penelitian

No	Analisis	Jumlah Sampel	Harga	Jumlah
1.	Kadar Air	15	Rp5.000	Rp75.000
2.	Kadar Antosianin	15	Rp330.000	Rp4.950.000
3.	Kadar Pati	15	Rp30.000	Rp450.000
4.	RVA	15	Rp500.000	Rp7.500.000
5.	FTIR	5	Rp300.000	Rp1.500.000
6.	XRD	5	Rp650.000	Rp3.250.000
7.	SEM	5	Rp500.000	Rp2.500.000
8.	AW	15	Rp30.000	Rp450.000
Total				Rp20.675.000

Lampiran 12. Perhitungan Analisis Kadar Air

Tabel 21. Hasil Analisis Kadar Air Gabah Beras Hitam

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan Kadar Air			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm	11,853	11,178	11,976	35,006	11,669	0,430
2 ppm	12,188	11,776	11,078	35,042	11,681	0,561
4 ppm	11,477	12,076	11,389	34,942	11,647	0,374
6 ppm	12,139	11,067	11,976	35,182	11,727	0,578
8 ppm	11,178	11,577	11,864	34,619	11,540	0,345
Jumlah	58,834	57,674	58,283	174,791		
Rata Rata	11,767	11,535	11,657			

Perhitungan ANAVA Analisis Kadar Air

$$FK = \frac{(\text{Total})^2}{\sum \text{Ulangan} \times \sum \text{Sampel}} = 2036,792$$

$$\begin{aligned}
 JKK &= \frac{(\sum K1)^2 + (\sum K2)^2 + (\sum K3)^2}{\sum \text{Sampel}} - FK \\
 &= \frac{(\sum 58,834)^2 + (\sum 57,674)^2 + (\sum 58,283)^2}{\sum 5} - 2036,792 \\
 &= 0,1348
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKP &= \frac{(\sum a1)^2 + (\sum a2)^2 + (\sum a3)^2 + (\sum a4)^2 + (\sum a5)^2}{\sum \text{Ulangan}} - FK \\
 &= \frac{(\sum 35,006)^2 + (\sum 35,042)^2 + (\sum 34,942)^2 + (\sum 35,182)^2 + (\sum 34,619)^2}{\sum 3} - 2036,792 \\
 &= 0,0583
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKT &= ((n1)^2 + (n2)^2 + \dots + (n_n)^2) - FK \\
 &= ((11,853)^2 + (11,178)^2 + \dots + (11,864)^2) - 2036,792 \\
 &= 2,243
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKG &= JKT - JKP - JKK \\
 &= 2,243 - 0,0583 - 0,1348 \\
 &= 2,050
 \end{aligned}$$

$$KTK = \frac{JKK}{r-1} = \frac{0,1348}{3-1} = 0,0674$$

$$KTP = \frac{JKP}{t-1} = \frac{0,0583}{5-1} = 0,0145$$

$$KTG = \frac{JKG}{(r-1)(t-1)} = \frac{2,050}{(3-1)(5-1)} = 0,2562$$

$$F_{\text{Hitung}} = \frac{KTP}{KTG} = \frac{0,0145}{0,2562} = 0,0569 \text{ (Perlakuan)}$$

$$F_{\text{Hitung}} = \frac{KTK}{KTG} = \frac{0,0674}{0,2562} = 0,2632 \text{ (Kelompok)}$$

Tabel 22. ANAVA Kadar Air Gabah Beras Hitam

SK	db	JK	KT	F Hitung	F Tabel 5%	Notasi
Kelompok	2	0,134859844	0,067429922	0,263184784	4,46	tn
Perlakuan	4	0,058303483	0,014575871	0,056890877	3,84	tn
Galat	8	2,050	0,256207524			
Total	14	2,243				

Keterangan: (tn) = Tidak berpengaruh nyata; (*) = Berpengaruh nyata

Berdasarkan tabel ANAVA analisis kadar air memiliki nilai F hitung $\leq$ F tabel pada taraf 5% dan dinyatakan bahwa tidak berpengaruh nyata.

Lampiran 13. Perhitungan Analisis Kadar Pati

Tabel 23. Hasil Analisis Kadar Pati Gabah Beras Hitam

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan Kadar Pati			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm	65,34	64,04	66,39	195,77	65,26	1,18
2 ppm	65,28	64,23	64,17	193,67	64,56	0,62
4 ppm	63,12	61,95	61,88	186,95	62,32	0,70
6 ppm	60,90	60,96	61,95	183,80	61,27	0,59
8 ppm	60,96	59,67	59,72	180,35	60,12	0,73
Jumlah	315,59	310,84	314,11	940,54		
Rata Rata	63,12	62,17	62,82			

Perhitungan ANAVA Analisis Kadar Pati

$$FK = \frac{(\text{Total})^2}{\sum \text{Ulangan} \times \sum \text{Sampel}} = 58974,03$$

$$JKK = \frac{(\sum K1)^2 + (\sum K2)^2 + (\sum K3)^2}{\sum \text{Sampel}} - FK$$

$$= \frac{(\sum 315,59)^2 + (\sum 310,84)^2 + (\sum 314,11)^2}{\sum 5} - 58974,03$$

$$= 2,367$$

$$JKP = \frac{(\sum a1)^2 + (\sum a2)^2 + (\sum a3)^2 + (\sum a4)^2 + (\sum a5)^2}{\sum \text{Ulangan}} - FK$$

$$= \frac{(\sum 195,77)^2 + (\sum 193,67)^2 + (\sum 186,95)^2 + (\sum 183,80)^2 + (\sum 180,35)^2}{\sum 3} - 58974,03$$

$$= 56,601$$

$$JKT = ((n1)^2 + (n2)^2 + \dots + (n_n)^2) - FK$$

$$= ((65,34)^2 + (64,04)^2 + \dots + (59,72)^2) - 58974,03$$

$$= 62,873$$

$$JKG = JKT - JKP - JKK$$

$$= 62,873 - 56,601 - 2,367$$

$$= 3,906$$

$$KTK = \frac{JKK}{r-1} = \frac{2,367}{3-1} = 1,183$$

$$KTP = \frac{JKP}{t-1} = \frac{56,601}{5-1} = 14,150$$

$$KTG = \frac{JKG}{(r-1)(t-1)} = \frac{3,906}{(3-1)(5-1)} = 0,488$$

$$F_{\text{Hitung}} = \frac{KTP}{KTG} = \frac{14,150}{0,488} = 28,979 \text{ (Perlakuan)}$$

$$F_{\text{Hitung}} = \frac{KTK}{KTG} = \frac{1,183}{0,488} = 2,423 \text{ (Kelompok)}$$

Tabel 24. ANAVA Kadar Pati Gabah Beras Hitam

SK	db	JK	KT	F Hitung	F Tabel	Notasi
Kelompok	2	2,367	1,183	2,423	4,46	tn
Perlakuan	4	56,601	14,150	28,979	3,84	*
Galat	8	3,906	0,488			
Total	14	62,873				

Keterangan : (tn) = Tidak berpengaruh nyata; (*) = Berpengaruh nyata

Berdasarkan tabel ANAVA analisis kadar pati memiliki nilai F hitung $\geq$ F tabel pada taraf 5% dan dinyatakan berpengaruh nyata sehingga diperlukan uji lanjut Duncan.

Tabel Uji Lanjut Duncan

$$S_y = \sqrt{\frac{KTG}{r}}$$

$$= \sqrt{\frac{0,488}{3}}$$

$$= 0,403$$

Tabel 25. Uji Lanjut Duncan Analisis Kadar Pati Gabah Beras Hitam

SSR 5%	LSR%	Rata-rata Kode perlakuan		Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	60,12	a5						a
3,26	1,31521	61,27	a4	1,15					ab
3,39	1,36766	62,32	a3	2,20*	1,05				b
3,47	1,399932	64,56	a2	4,44*	3,29*	2,24*			c
3,52	1,420104	65,26	a1	5,14*	3,99*	2,94*	0,70	-	c

Keterangan : (tn) = Tidak berpengaruh nyata; (*) = Berpengaruh nyata

Kesimpulan :

Berdasarkan uji lanjut Duncan dapat disimpulkan bahwa kode perlakuan a5 tidak berbeda nyata dengan kode perlakuan a4, namun berbeda nyata dengan kode perlakuan a3, a2, dan a. Kode perlakuan a4 tidak berbeda nyata dengan kode perlakuan a5 dan a3, namun berbeda nyata dengan kode perlakuan a2 dan a1. Kode perlakuan a3 tidak berbeda nyata dengan kode perlakuan a4, namun berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a2, dan a1. Kode perlakuan a2 tidak berbeda nyata dengan kode perlakuan a1, namun berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, dan a3. Kode perlakuan a1 tidak berbeda nyata dengan kode perlakuan a2, namun berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, dan a3.

Lampiran 14. Perhitungan Analisis Kadar Antosianin

Tabel 26. Hasil Analisis Kadar Antosianin Gabah Beras Hitam

Konsentras i Ozon	Kelompok Ulangan Antosianin			Jumlah	Rata- Rata	Stdev
	1	2	3			
0 ppm	114,888	112,550	107,207	334,646	111,549	3,938
2 ppm	44,319	47,024	45,555	136,897	45,632	1,354
4 ppm	85,832	86,233	87,001	259,066	86,355	0,594
6 ppm	65,126	66,796	69,801	201,723	67,241	2,369
8 ppm	60,483	59,348	59,081	178,912	59,637	0,745
Jumlah	370,648	371,951	368,645	1111,244		
Rata Rata	74,130	74,390	73,729			

Perhitungan ANAVA Analisis Kadar Antosianin

$$FK = \frac{(\text{Total})^2}{\sum \text{Ulangan} \times \sum \text{Sampel}} = 82324,213$$

$$JKK = \frac{(\sum K1)^2 + (\sum K2)^2 + (\sum K3)^2}{\sum \text{Sampel}} - FK$$

$$= \frac{(\sum 370,648)^2 + (\sum 371,951)^2 + (\sum 368,645)^2}{\sum 5} - 82324,213$$

$$= 1,1096$$

$$JKP = \frac{(\sum a1)^2 + (\sum a2)^2 + (\sum a3)^2 + (\sum a4)^2 + (\sum a5)^2}{\sum \text{Ulangan}} - FK$$

$$= \frac{(\sum 334,646)^2 + (\sum 136,897)^2 + (\sum 259,066)^2 + (\sum 201,723)^2 + (\sum 178,912)^2}{\sum 3} - 82324,213$$

$$= 7857,6219$$

$$JKT = ((n1)^2 + (n2)^2 + \dots + (n_n)^2) - FK$$

$$= ((114,888)^2 + (112,550)^2 + \dots + (59,081)^2) - 82324,213$$

$$= 7905,342$$

$$JKG = JKT - JKP - JKK$$

$$= 7905,342 - 7857,621864 - 1,109610871$$

$$= 46,611$$

$$KTK = \frac{JKK}{r-1} = \frac{1,1096}{3-1} = 0,5548$$

$$KTP = \frac{JKP}{t-1} = \frac{7857,6219}{5-1} = 1964,4055$$

$$KTG = \frac{JKG}{(r-1)(t-1)} = \frac{46,611}{(3-1)(5-1)} = 5,8263$$

$$F_{\text{Hitung}} = \frac{KTP}{KTG} = \frac{1964,4055}{5,8263} = 337,1599 \text{ (Perlakuan)}$$

$$F_{\text{Hitung}} = \frac{KTK}{KTG} = \frac{0,5548}{5,8263} = 0,0952 \text{ (Kelompok)}$$

Tabel 27. ANAVA Kadar Antosianin Gabah Beras Hitam

SK	db	JK	KT	F Hitung	F Tabel 5%	Notasi
Kelompok	2	1,109610871	0,554805436	0,095223813	4,46	tn
Perlakuan	4	7857,621864	1964,405466	337,1599603	3,84	*
Galat	8	46,611	5,826330814			
Total	14	7905,342				

Keterangan : (tn) = Tidak berpengaruh nyata; (*) = Berpengaruh nyata

Berdasarkan tabel ANAVA analisis kadar antosianin nilai F hitung $\geq$ F tabel pada taraf 5% dan dinyatakan berpengaruh nyata sehingga diperlukan uji lanjut Duncan.

Tabel Uji Lanjut Duncan

$$\begin{aligned}
 Sy &= \sqrt{\frac{KTG}{r}} \\
 &= \sqrt{\frac{5,826330814}{3}} \\
 &= 1,3936
 \end{aligned}$$

Tabel 28. Uji Lanjut Duncan Analisis Kadar Antosianin Gabah Beras Hitam

SSR 5%	LSR %	Rata-rata Kode Perlakuan	Perlakuan					Taraf Nyata
			1	2	3	4	5	
-	-	45,632 (a2)	-	-	-	-	-	a
3,26	4,5431	59,637 (a5)	14,005*	-	-	-	-	b
3,39	4,7243	67,241 (a4)	21,608*	7,604*	-	-	-	c
3,47	4,8358	86,355 (a3)	40,723*	26,718*	19,115*	-	-	d
3,52	4,9054	111,549 (a1)	65,916*	51,911*	44,308*	25,193*	-	e

Keterangan : (tn) = Tidak berpengaruh nyata; (*) = Berpengaruh nyata

Kesimpulan :

Berdasarkan uji lanjut Duncan dapat disimpulkan bahwa kode perlakuan a2 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a3, dan a1. Kode perlakuan a5 berbeda nyata dengan kode perlakuan a4, a3, a2, dan a1. Kode perlakuan a4 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a3, a2, dan a1. Kode perlakuan a3 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a2, dan a1. Kode perlakuan a1 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a3, dan a2.

Lampiran 15. Perhitungan Analisis Aktivitas Air

Tabel 29. Hasil Analisis Aktivitas Air Gabah Beras Hitam

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan AW			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm	0,78	0,75	0,76	2,29	0,76	0,02
2 ppm	0,76	0,75	0,78	2,29	0,76	0,02
4 ppm	0,75	0,73	0,78	2,26	0,75	0,03
6 ppm	0,75	0,74	0,78	2,27	0,76	0,02
8 ppm	0,76	0,75	0,72	2,23	0,74	0,02
Jumlah	3,80	3,72	3,82	11,34		
Rata Rata	0,76	0,74	0,76			

Perhitungan ANAVA Analisis Kadar Aw

$$FK = \frac{(\text{Total})^2}{\sum \text{Ulangan} \times \sum \text{Sampel}} = 8,57304$$

$$JKK = \frac{(\sum K1)^2 + (\sum K2)^2 + (\sum K3)^2}{\sum \text{Sampel}} - FK$$

$$= \frac{(\sum 3,80)^2 + (\sum 3,72)^2 + (\sum 3,82)^2}{\sum 5} - 8,57304$$

$$= 0,0011$$

$$JKP = \frac{(\sum a1)^2 + (\sum a2)^2 + (\sum a3)^2 + (\sum a4)^2 + (\sum a5)^2}{\sum \text{Ulangan}} - FK$$

$$= \frac{(\sum 2,29)^2 + (\sum 2,29)^2 + (\sum 2,26)^2 + (\sum 2,27)^2 + (\sum 2,23)^2}{\sum 3} - 8,57304$$

$$= 0,0008$$

$$JKT = ((n1)^2 + (n2)^2 + \dots + (n_n)^2) - FK$$

$$= ((0,78)^2 + (0,75)^2 + \dots + (0,72)^2) - 8,57304$$

$$= 0,005$$

$$JKG = JKT - JKP - JKK$$

$$= 0,005 - 0,000826667 - 0,001120$$

$$= 0,0028$$

$$KTK = \frac{JKK}{r-1} = \frac{0,0011}{3-1} = 0,00056$$

$$KTP = \frac{JKP}{t-1} = \frac{0,0008}{5-1} = 0,0002067$$

$$KTG = \frac{JKG}{(r-1)(t-1)} = \frac{0,005}{(3-1)(5-1)} = 0,00035$$

$$F_{\text{Hitung}} = \frac{KTP}{KTG} = \frac{0,0002067}{0,00035} = 0,587678 \text{ (Perlakuan)}$$

$$F_{\text{Hitung}} = \frac{KTK}{KTG} = \frac{0,00056}{0,00035} = 1,5924 \text{ (Kelompok)}$$

Tabel 30. ANAVA Aktivitas Air Gabah Beras Hitam

SK	db	JK	KT	F Hitung	F Tabel 5%	Notasi
Kelompok	2	0,00112	0,000560	1,592417062	4,46	tn
Perlakuan	4	0,000826667	0,000206667	0,587677725	3,84	tn
Galat	8	0,00281	0,0003517			
Total	14	0,005				

Keterangan: (tn) = Tidak berpengaruh nyata; (*) = Berpengaruh nyata

Berdasarkan tabel ANAVA analisis Aktivitas air memiliki nilai F hitung $\leq$ F tabel pada taraf 5% dan dinyatakan bahwa tidak berpengaruh nyata.

Lampiran 16. Perhitungan Analisis *Rapid Visco Analyzer* (RVA)

Tabel 31. Hasil Analisis Profil Gelatiniasi pada Data *Peak Viscosity*

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	1211	1218	1225	3654	1218	7,00
2 ppm (a2)	523	528	533	1584	528	5,00
4 ppm (a3)	577	582	587	1746	582	5,00
6 ppm (a4)	831	837	843	2511	837	6,00
8 ppm (a5)	896	904	912	2712	904	8,00
Jumlah	4038	4069	4100	12207		
Rata-rata	808	814	820			

Tabel 32. ANAVA Hasil Data *Peak Viscosity* pada Profil Gelatinisasi (RVA)

Sumber Variasi	db	JK	KT	F Hitung	F tabel	Notasi
Kelompok	2	384,400	192,200	113,05882353	4,46	*
Perlakuan	4	922394,400	230598,600	135646,23530	3,84	*
Galat	8	13,600	1,700			
Total	14	922792,400				

Keterangan : (tn) = Tidak berpengaruh nyata; (*) = Berpengaruh nyata

Berdasarkan tabel ANAVA RVA untuk hasil *Peak Viscosity* nilai F hitung $\geq$ F tabel pada taraf 5% dan dinyatakan berpengaruh nyata sehingga diperlukan uji lanjut Duncan.

Tabel 33. Uji Lanjut Duncan Hasil Data *Peak Viscosity* pada Profil Gelatinisasi (RVA)

SSR 5%	LSR %	Rata-rata Kode perlakuan		Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	528	a2	-	-	-	-	-	a
3,26	2,454	582	a3	54*	-	-	-	-	b
3,39	2,552	837	a4	309*	255*	-	-	-	c
3,47	2,612	904	a5	376*	322*	67*	-	-	d
3,52	2,650	1218	a1	690*	636*	381*	314*	-	e

Keterangan : (tn) = Tidak berpengaruh nyata; (*) = Berpengaruh nyata

Kesimpulan:

Berdasarkan uji lanjut Duncan dapat disimpulkan bahwa kode perlakuan a2 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a3, dan a1. Kode perlakuan a3 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a2, dan a1. Kode perlakuan a4 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a3, a2, dan a1. Kode perlakuan a5 berbeda nyata dengan kode perlakuan a4, a3, a2, dan a1. Kode perlakuan a1 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a3, dan a2.

Tabel 34. Hasil Analisis Profil Gelatinisasi pada Data *Trought*

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	883	889	895	2667	889	6,00
2 ppm (a2)	336	341	346	1023	341	5,00
4 ppm (a3)	370	374	378	1122	374	4,00
6 ppm (a4)	567	573	579	1719	573	6,00
8 ppm (a5)	504	512	520	1536	512	8,00
Jumlah	2660	2689	2718	8067		
Rata-rata	532	538	544			

Tabel 35. ANAVA Hasil Data *Trought* pada Profil Gelatinisasi (RVA)

Sumber Variasi	db	JK	KT	F Hitung	F tabel	Notasi
Kelompok	2	336,40	168,200	76,45454546	4,46	*
Perlakuan	4	572420,40	143105,100	65047,77273	3,84	*
Galat	8	17,60	2,200			
Total	14	572774,40				

Keterangan : (tn) = Tidak berpengaruh nyata; (*) = Berpengaruh nyata

Berdasarkan tabel ANAVA RVA untuk hasil *Trought* nilai F hitung $\geq$ F tabel pada taraf 5% dan dinyatakan berpengaruh nyata sehingga diperlukan uji lanjut Duncan.

Tabel 36. Uji Lanjut Duncan Hasil Data *Trought* pada Profil Gelatinisasi (RVA)

SSR 5%	LSR %	Rata-rata Kode perlakuan		Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	341	a2	-	-	-	-	-	a
3,26	2,79170	374	a3	33*	-	-	-	-	b
3,39	2,90302	512	a5	171*	138*	-	-	-	c
3,47	2,97153	573	a4	232*	199*	61*	-	-	d
3,52	3,01435	889	a1	548*	515*	377*	316*	-	e

Keterangan : (tn) = Tidak berpengaruh nyata; (*) = Berpengaruh nyata

Kesimpulan:

Berdasarkan uji lanjut Duncan dapat disimpulkan bahwa kode perlakuan a2 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a3, dan a1. Kode perlakuan a3 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a2, dan a1. Kode perlakuan a5 berbeda nyata dengan kode perlakuan a4, a3, a2, dan a1. Kode perlakuan a4 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a3, a2, dan a1. Kode perlakuan a1 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a3, dan a2.

Tabel 37. Hasil Analisis Profil Gelatinisasi pada Data *Breakdown*

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan			Jumlah	Rata- Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	322	329	336	987	329	7,00
2 ppm (a2)	183	187	191	561	187	4,00
4 ppm (a3)	203	208	213	624	208	5,00
6 ppm (a4)	259	264	269	792	264	5,00
8 ppm (a5)	384	392	400	1176	392	8,00
Jumlah	1351	1380	1409	4140		
Rata-rata	270	276	282			

Tabel 38. ANAVA Hasil Data *Breakdown* pada Profil Gelatinisasi (RVA)

Sumber Variasi	db	JK	KT	F Hitung	F tabel	Notasi
Kelompok	2	336,400	168,200	62,2962963	4,46	*
Perlakuan	4	86862,000	21715,500	8042,77778	3,84	*
Galat	8	21,600	2,700			
Total	14	87220,000				

Keterangan : (tn) = Tidak berpengaruh nyata; (*) = Berpengaruh nyata

Berdasarkan tabel ANAVA RVA untuk hasil *Breakdown* nilai F hitung $\geq$ F tabel pada taraf 5% dan dinyatakan berpengaruh nyata sehingga diperlukan uji lanjut Duncan.

Tabel 39. Uji Lanjut Duncan Hasil Data *Breakdown* pada Profil Gelatinisasi (RVA)

SSR 5%	LSR%	Rata-rata Kode perlakuan		Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	187	a2	-	-	-	-	-	a
3,26	3,09271	208	a3	21*	-	-	-	-	b
3,39	3,21604	264	a4	77*	56*	-	-	-	c
3,47	3,29193	329	a1	142*	121*	65*	-	-	d
3,52	3,33937	392	a5	205*	184*	128*	63*	-	e

Keterangan : (tn) = Tidak berpengaruh nyata; (*) = Berpengaruh nyata

Kesimpulan:

Berdasarkan uji lanjut Duncan dapat disimpulkan bahwa kode perlakuan a2 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a3, dan a1. Kode perlakuan a3 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a2, dan a1. Kode perlakuan a4 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a3, a2, dan a1. Kode perlakuan a1 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a3, dan a2. Kode perlakuan a5 berbeda nyata dengan kode perlakuan a4, a3, a2, dan a1.

Tabel 40. Hasil Analisis Profil Gelatinisasi pada Data *Final Viscosity*

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	1440	1451	1462	4353	1451	11,00
2 ppm (a2)	659	665	671	1995	665	6,00
4 ppm (a3)	718	725	732	2175	725	7,00
6 ppm (a4)	1082	1090	1098	3270	1090	8,00
8 ppm (a5)	2042	2053	2064	6159	2053	11,00
Jumlah	5941	5984	6027	17952		
Rata-rata	1188	1197	1205			

Tabel 41. ANAVA Hasil Data *Final Viscosity* pada Profil Gelatinisasi (RVA)

Sumber Variasi	db	JK	KT	F Hitung	F tabel	Notasi
Kelompok	2	739,60	369,80	69,7735849	4,46	*
Perlakuan	4	3943526,40	985881,60	186015,39622	3,84	*
Galat	8	42,40	5,30			
Total	14	3944308,40				

Keterangan : (tn) = Tidak berpengaruh nyata; (*) = Berpengaruh nyata

Berdasarkan tabel ANAVA RVA untuk hasil *Final Viscosity* nilai F hitung $\geq$ F tabel pada taraf 5% dan dinyatakan berpengaruh nyata sehingga diperlukan uji lanjut Duncan.

Tabel 42. Uji Lanjut Duncan Hasil Data *Final Viscosity* pada Profil Gelatinisasi (RVA)

SSR 5%	LSR%	Rata-rata Kode perlakuan		Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	665	a2	-	-	-	-	-	a
3,26	4,33306	725	a3	60*	-	-	-	-	b
3,39	4,50585	1090	a4	425*	365*	-	-	-	c
3,47	4,61219	1451	a1	786*	726*	361*	-	-	d
3,52	4,67864	2053	a5	1388*	1328*	963*	602*	-	e

Keterangan : (tn) = Tidak berpengaruh nyata; (*) = Berpengaruh nyata

Kesimpulan:

Berdasarkan uji lanjut Duncan dapat disimpulkan bahwa kode perlakuan a2 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a3, dan a1. Kode perlakuan a3 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a2, dan a1. Kode perlakuan a4 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a3, a2, dan a1. Kode perlakuan a1 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a3, dan a2. Kode perlakuan a5 berbeda nyata dengan kode perlakuan a4, a3, a2, dan a1.

Tabel 43. Hasil Analisis Profil Gelatiniasi pada Data *Setback*

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	554	562	570	1686	562	8,00
2 ppm (a2)	319	324	329	972	324	5,00
4 ppm (a3)	346	351	356	1053	351	5,00
6 ppm (a4)	512	517	522	1551	517	5,00
8 ppm (a5)	1531	1541	1551	4623	1541	10,00
Jumlah	3262	3295	3328	9885		
Rata-rata	652	659	666			

Tabel 44. ANAVA Hasil Data *Setback* pada Profil Gelatinisasi (RVA)

Sumber Variasi	db	JK	KT	F Hitung	F tabel	Notasi
Kelompok	2	435,60	217,80	41,0943396	4,46	*
Perlakuan	4	3043758	760939,50	143573,49056	3,84	*
Galat	8	42,400	5,30			
Total	14	3044236,00				

Keterangan : (tn) = Tidak berpengaruh nyata; (*) = Berpengaruh nyata

Berdasarkan tabel ANAVA RVA untuk hasil *Setback* nilai F hitung $\geq$ F tabel pada taraf 5% dan dinyatakan berpengaruh nyata sehingga diperlukan uji lanjut Duncan.

Tabel 45. Uji Lanjut Duncan Hasil Data *Setback* pada Profil Gelatinisasi (RVA)

SSR 5%	LSR%	Rata-rata Kode perlakuan		Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	324	a2	-	-	-	-	-	a
3,26	4,33306	351	a3	27*	-	-	-	-	b
3,39	4,50585	517	a4	193*	166*	-	-	-	c
3,47	4,61219	562	a1	238*	211*	45*	-	-	d
3,52	4,67864	1541	a5	1217*	1190*	1024*	979*	-	e

Keterangan : (tn) = Tidak berpengaruh nyata; (*) = Berpengaruh nyata

Kesimpulan:

Berdasarkan uji lanjut Duncan dapat disimpulkan bahwa kode perlakuan a2 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a3, dan a1. Kode perlakuan a3 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a2, dan a1. Kode perlakuan a4 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a3, a2, dan a1. Kode perlakuan a1 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a3, dan a2. Kode perlakuan a5 berbeda nyata dengan kode perlakuan a4, a3, a2, dan a1.

Tabel 46. Hasil Analisis Profil Gelatinisasi pada Data *Peak Time*

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	5,1	5,4	5,7	16,2	5,4	0,3
2 ppm (a2)	4,7	5,0	5,3	15,0	5,0	0,3
4 ppm (a3)	4,8	5,0	5,2	15,0	5,0	0,2
6 ppm (a4)	4,9	5,2	5,5	15,6	5,2	0,3
8 ppm (a5)	6,6	7,0	7,4	21,0	7,0	0,4
Jumlah	26,1	27,6	29,1	82,8		
Rata-rata	5,2	5,5	5,8			

Tabel 47. ANAVA Hasil Data *Peak Time* pada Profil Gelatinisasi (RVA)

Sumber Variasi	db	JK	KT	F Hitung	F tabel	Notasi
Kelompok	2	0,900	0,450	90,0000000	4,46	*
Perlakuan	4	8,544	2,136	427,20000	3,84	*
Galat	8	0,040	0,005			
Total	14	9,484				

Keterangan : (tn) = Tidak berpengaruh nyata; (*) = Berpengaruh nyata

Berdasarkan tabel ANAVA RVA untuk hasil *Peak Time* nilai F hitung $\geq$ F tabel pada taraf 5% dan dinyatakan berpengaruh nyata sehingga diperlukan uji lanjut Duncan.

Tabel 48. Uji Lanjut Duncan Hasil Data *Peak Time* pada Profil Gelatinisasi (RVA)

SSR 5%	LSR%	Rata-rata Kode perlakuan		Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	5,0	a2	-	-	-	-	-	a
3,26	0,13309	5,0	a3	0,00	-	-	-	-	a
3,39	0,13840	5,2	a4	0,20*	0,20*	-	-	-	b
3,47	0,14166	5,4	a1	0,40*	0,40*	0,20*	-	-	c
3,52	0,1437	7,0	a5	2,00*	2,00*	1,80*	1,60*	-	d

Keterangan : (tn) = Tidak berpengaruh nyata; (*) = Berpengaruh nyata

Kesimpulan:

Berdasarkan uji lanjut Duncan dapat disimpulkan bahwa kode perlakuan a2 tidak berbeda nyata dengan kode perlakuan a3, namun berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, dan a1. Kode perlakuan a3 tidak berbeda nyata dengan kode perlakuan a2, namun berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, dan a1. Kode perlakuan a4 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a3, a2, dan a1. Kode perlakuan a1 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a3, dan a2. Kode perlakuan a5 berbeda nyata dengan kode perlakuan a4, a3, a2, dan a1.

Tabel 49. Hasil Analisis Profil Gelatinisasi pada Data *Pasting Temperatur*

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan			Jumlah	Rata- Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	70,5	71,3	72,1	213,9	71,3	0,80
2 ppm (a2)	82,7	83,2	83,7	249,6	83,2	0,50
4 ppm (a3)	81,95	82,35	82,75	247,05	82,35	0,40
6 ppm (a4)	83,4	84,0	84,6	252,0	84,0	0,60
8 ppm (a5)	90,0	90,7	91,4	272,1	90,7	0,70
Jumlah	408,6	411,6	414,6	1234,7		
Rata-rata	81,7	82,3	82,9			

Tabel 50. ANAVA Hasil Data *Pasting Temperatur* pada Profil Gelatinisasi (RVA)

Sumber Variasi	db	JK	KT	F Hitung	F tabel	Notasi
Kelompok	2	3,600	1,800	72,0000000	4,46	*
Perlakuan	4	585,786	146,447	5857,86000	3,84	*
Galat	8	0,200	0,025			
Total	14	589,586				

Keterangan : (tn) = Tidak berpengaruh nyata; (*) = Berpengaruh nyata

Berdasarkan tabel ANAVA RVA untuk hasil *Pasting Temperatur* nilai F hitung $\geq$ F tabel pada taraf 5% dan dinyatakan berpengaruh nyata sehingga diperlukan uji lanjut Duncan.

Tabel 51. Uji Lanjut Duncan Hasil Data *Pasting Temperatur* pada Profil Gelatinisasi (RVA)

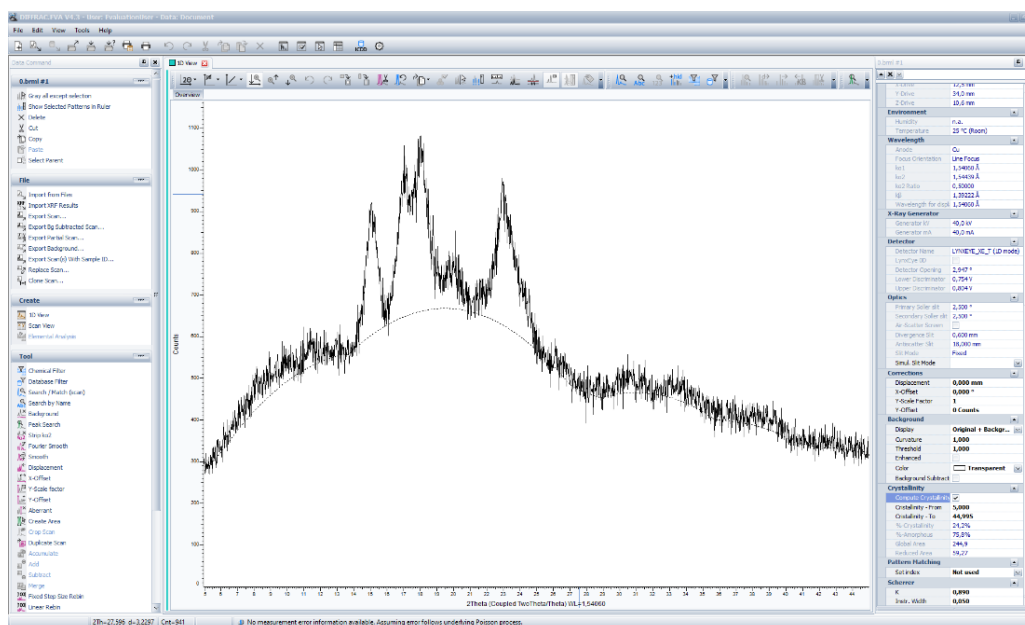
SSR 5%	LSR%	Rata-rata Kode perlakuan		Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	71,3	a1	-	-	-	-	-	a
3,26	0,29760	82,35	a3	11,05*	-	-	-	-	b
3,39	0,30946	83,2	a2	11,90*	0,85*	-	-	-	c
3,47	0,31677	84,0	a4	12,70*	1,65*	0,80*	-	-	d
3,52	0,32133	90,7	a5	19,40*	8,35*	7,50*	6,70*	-	e

Keterangan : (tn) = Tidak berpengaruh nyata; (*) = Berpengaruh nyata

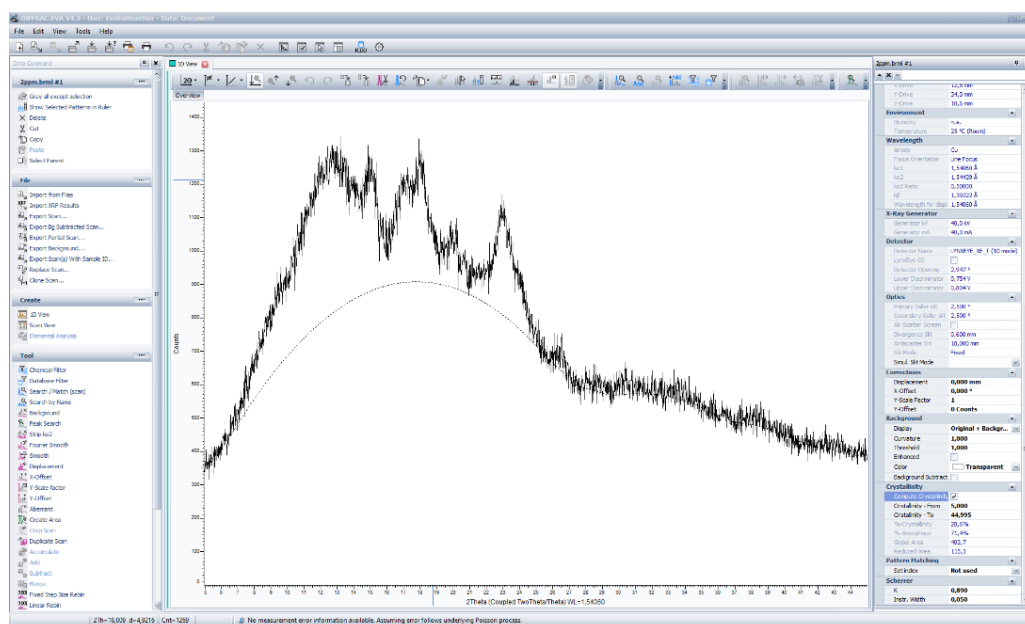
Kesimpulan:

Berdasarkan uji lanjut Duncan dapat disimpulkan bahwa kode perlakuan a1 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a3, dan a2. Kode perlakuan a3 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a2, dan a1. kode perlakuan a2 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a3, dan a1. Kode perlakuan a4 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a3, a2, dan a1. Kode perlakuan a5 berbeda nyata dengan kode perlakuan a4, a3, a2, dan a1.

Lampiran 17. Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf menggunakan X-Ray Diffractometer (XRD)



Gambar 10. Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf menggunakan X-Ray Diffractometer (XRD) Gabah Beras Hitam pada Konsentrasi 0 ppm

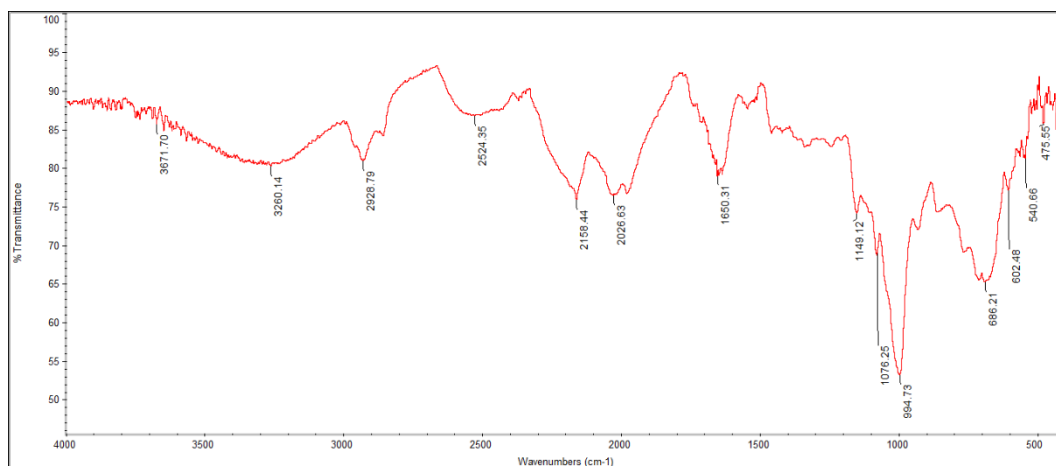


Gambar 11. Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf menggunakan X-Ray Diffractometer (XRD) Gabah Beras Hitam pada Konsentrasi 2 ppm

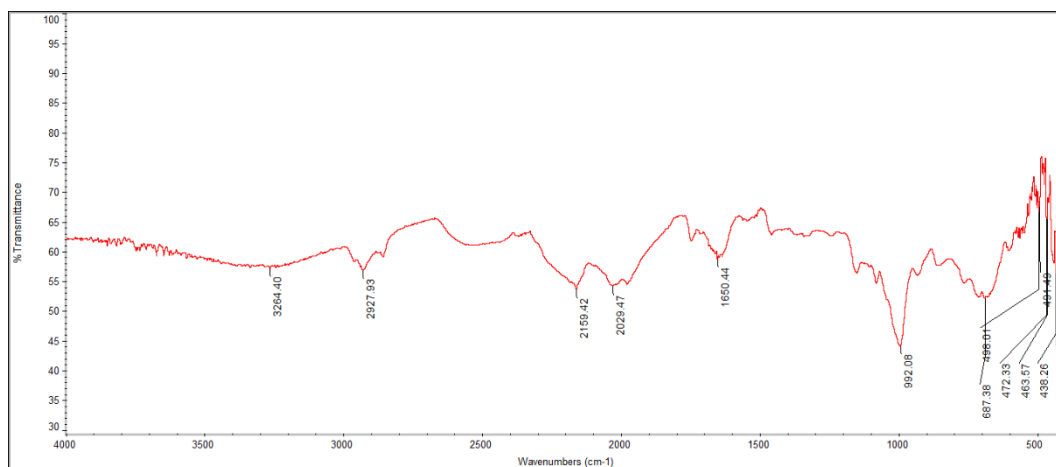
The screenshot displays the Origin 8.5 SR1 software interface. The main window shows a plot of 'Counts' versus '2-theta (Coupled Two Theta) (deg)'. The plot contains a noisy black line representing experimental data and a smooth dashed line representing a multi-peak fit. The fit is composed of several individual peaks and a baseline. The left sidebar shows the 'Project: Sample1' tree with folders for 'Data', 'Fit', and 'Analysis'. The right sidebar shows the 'Fit List' and 'Fit Results' for the 'Gauss' fit, including parameters like 'Amplitude', 'Position', and 'Width'.

Gambar 14. Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf menggunakan *X-Ray Diffractometer* (XRD) Gabah Beras Hitam pada Konsentrasi 8 ppm

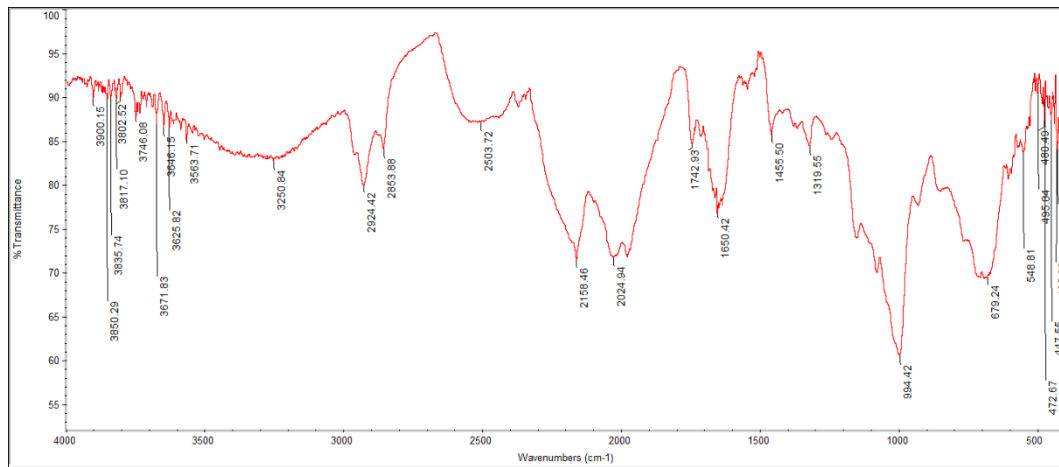
Lampiran 18. Grafik Analisis Gugus Fungsi menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) Gabah Beras Hitam



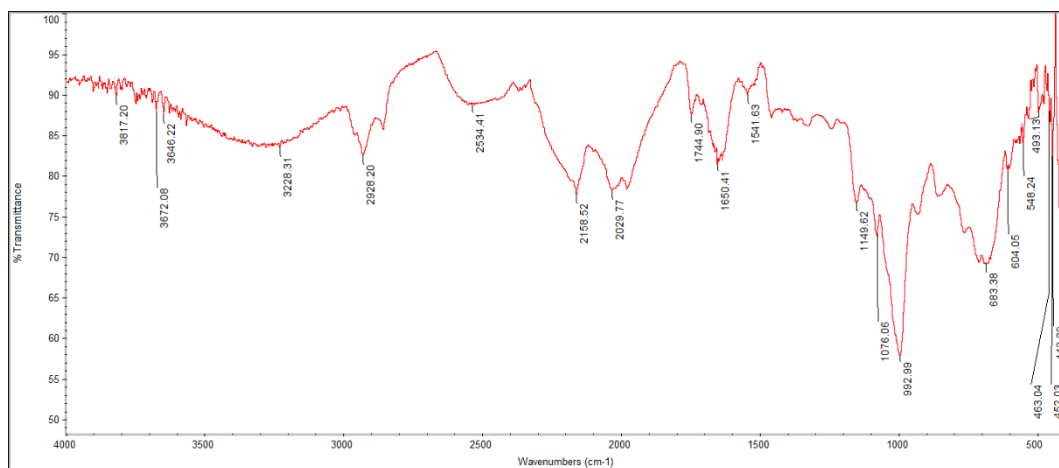
Gambar 15. Grafik Analisis Gugus Fungsi menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) Gabah Beras Hitam pada Konsentrasi 0 ppm



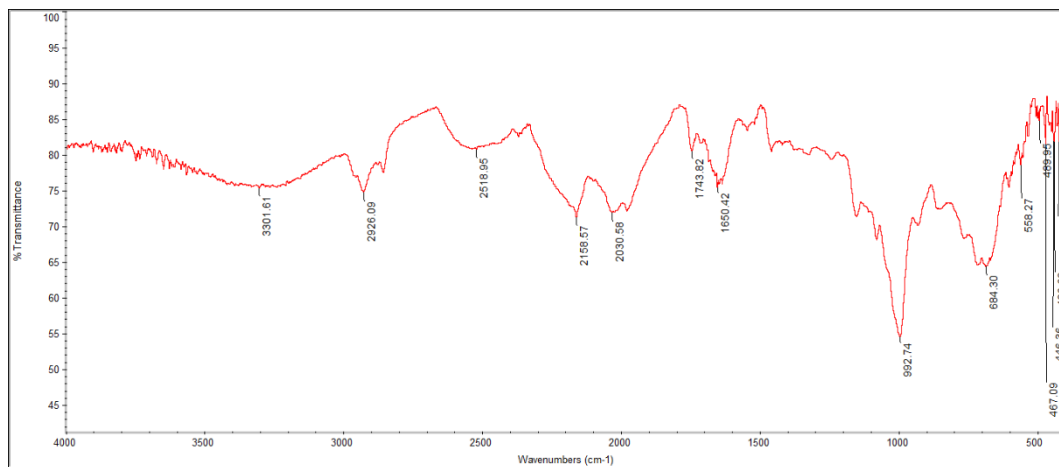
Gambar 16. Grafik Analisis Gugus Fungsi menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) Gabah Beras Hitam pada Konsentrasi 2 ppm



Gambar 17. Grafik Analisis Gugus Fungsi menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) Gabah Beras Hitam pada Konsentrasi 4 ppm

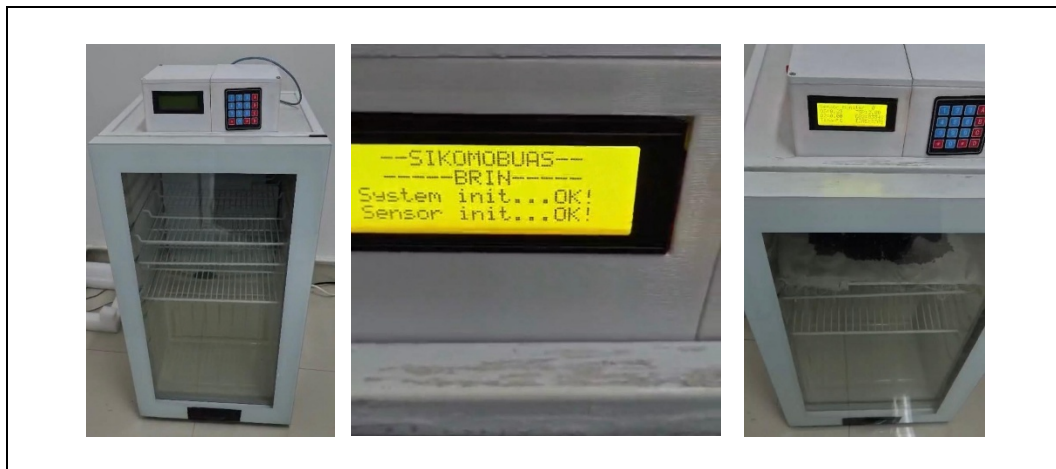


Gambar 18. Grafik Analisis Gugus Fungsi menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) Gabah Beras Hitam pada Konsentrasi 6 ppm

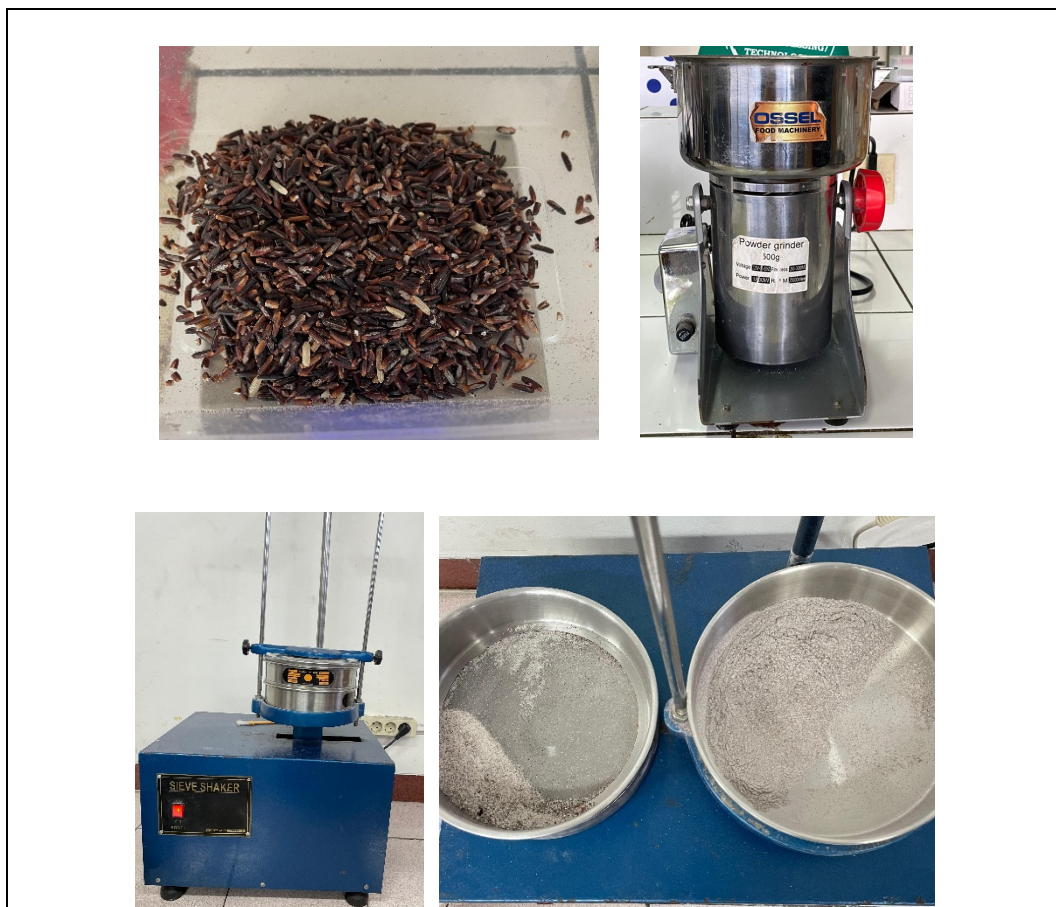


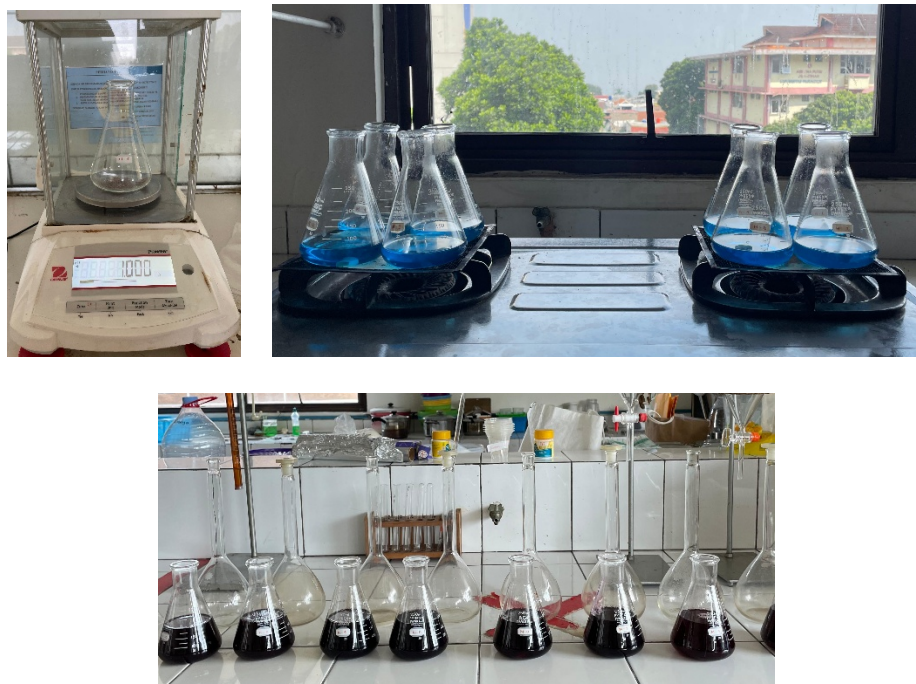
Gambar 19. Grafik Analisis Gugus Fungsi menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) Gabah Beras Hitam pada Konsentrasi 8 ppm

Lampiran 19. Dokumentasi Proses Ozonisasi Gabah Beras Hitam

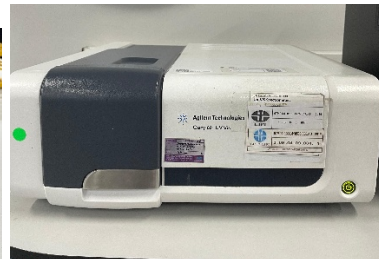
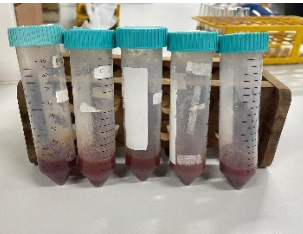
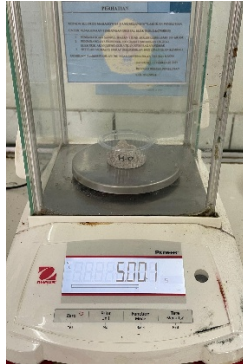


Lampiran 20. Dokumentasi Proses Beras Hitam Pecah Kulit menjadi tepung



Lampiran 21. Dokumentasi Penelitian**Analisis Pengujian Kadar Air Metode Gravimetri****Analisis Pengujian Kadar Pati Metode *Luff Schoorl***

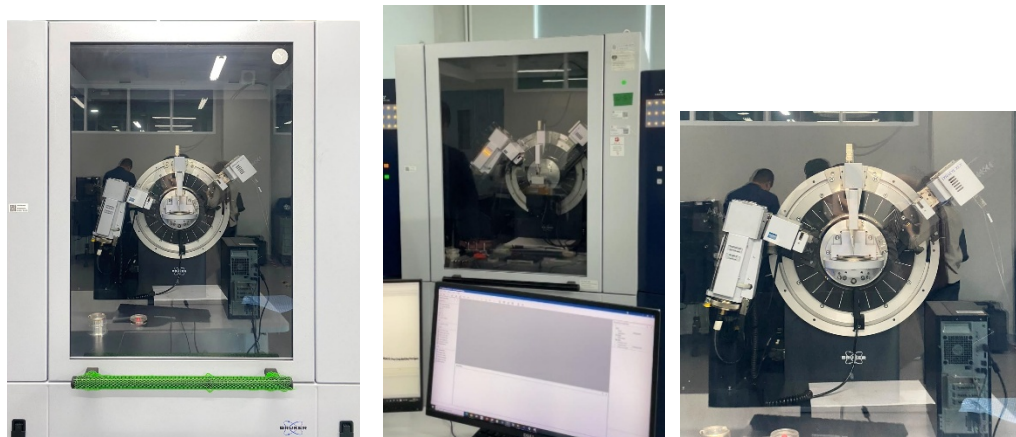
Analisis Pengujian Kadar Antosianin Metode *pH* Differensial



Analisis Pengujian Aw menggunakan Aw Meter



Analisis *X-Ray Diffractometer* (XRD)



Analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)



Analisis Mikroskopis (*Microscopic Analysis*) Metode *Scanning Electron*
Microscope (SEM)

