

**PENGARUH KONSENTRASI OZON TERHADAP
KARAKTERISTIK FISIK DAN KIMIA GABAH
BERAS MERAH (*Oryza sativa* L.)**

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

Zahra Putri Alviena
223020015



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

ABSTRAK

PENGARUH KONSENTRASI OZON TERHADAP KARAKTERISTIK FISIK DAN KIMIA GABAH BERAS MERAH (*Oryza sativa* L.)

Oleh:

Zahra Putri Alviena
223020015

(Program Studi Teknologi Pangan)

Beras merah (*Oryza sativa* L.) memiliki nilai fungsional tinggi karena kandungan antosianin dan senyawa fenolikanya, namun senyawa tersebut rentan mengalami degradasi akibat perlakuan oksidatif seperti ozonisasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh konsentrasi ozon (0, 2, 4, 6, dan 8 ppm) terhadap karakteristik fisik dan kimia gabah beras merah varietas Inpari 24, meliputi kadar air, kadar pati, *water activity* (a_w), kadar antosianin, kristalinitas dan morfologi granula pati (XRD dan SEM), profil gelatinisasi (RVA), serta gugus fungsi (FTIR), menggunakan Rancangan Acak Kelompok satu faktor dengan tiga ulangan. Hasil penelitian menunjukkan konsentrasi ozon berpengaruh nyata terhadap enam dari delapan parameter yang diamati, yaitu kadar pati, kadar antosianin, kristalinitas dan morfologi granula pati, profil gelatinisasi, dan gugus fungsi, sedangkan kadar air dan *water activity* (a_w) tidak berpengaruh nyata pada seluruh taraf konsentrasi yang diuji. Kadar pati menurun secara moderat seiring meningkatnya konsentrasi ozon akibat terputusnya sebagian rantai pati oleh oksidasi, sementara kadar antosianin menurun secara nyata dan konsisten pada hampir seluruh taraf konsentrasi, menjadikannya komponen yang paling rentan terhadap ozonisasi dibandingkan parameter lain yang diamati. Data XRD, SEM, dan RVA secara konsisten menunjukkan kerusakan struktural granula pati berupa penurunan kristalinitas, fragmentasi permukaan granula, dan penurunan ketahanan pasta yang meningkat seiring naiknya konsentrasi ozon hingga mencapai penurunan kristalinitas dan fragmentasi granula terbesar dalam seri perlakuan pada 6 ppm. Pada konsentrasi 8 ppm, granula justru menunjukkan reorganisasi struktural berupa peningkatan kembali kristalinitas dan pembentukan granula baru berukuran lebih halus. Temuan ini menunjukkan adanya *trade-off* antara modifikasi fungsional pati yang berpotensi menguntungkan (peningkatan viskositas akhir dan ketahanan pasta) dengan penurunan kandungan antosianin, sehingga pemilihan konsentrasi ozon dalam aplikasi praktis perlu disesuaikan dengan tujuan spesifik yang ingin dicapai.

Kata kunci: gabah beras merah, ozonisasi, karakteristik fisik dan kimia, kadar antosianin, kristalinitas granula pati

ABSTRACT

EFFECT OF OZONE CONCENTRATION ON THE PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF RED RICE PADDY (*Oryza sativa* L.)

By:

Zahra Putri Alviena
223020015

(Food Technology Study Program)

*Red rice paddy (*Oryza sativa* L.) possesses high functional value due to its anthocyanin and phenolic compound content, yet these compounds are highly susceptible to degradation under oxidative treatments such as ozonation. This study aimed to analyze the effect of ozone concentration (0, 2, 4, 6, and 8 ppm) on the physical and chemical characteristics of red rice paddy of the Inpari 24 Gabusan variety, covering moisture content, starch content, water activity, anthocyanin content, starch granule crystallinity and morphology (XRD and SEM), gelatinization profile (RVA), and functional groups (FTIR), using a one-factor Randomized Block Design with three replications. The results showed that ozone concentration significantly affected six of the eight parameters observed starch content, anthocyanin content, starch granule crystallinity and morphology, gelatinization profile, and functional groups while moisture content and water activity were not significantly affected at any concentration tested. Starch content decreased moderately with increasing ozone concentration due to partial cleavage of starch chains, while anthocyanin content decreased significantly and consistently across nearly all concentration levels, making it the component most vulnerable to ozonation compared to the other parameters observed. XRD, SEM, and RVA data consistently showed structural damage to starch granules reduced crystallinity, surface fragmentation, and reduced paste resistance that increased with rising ozone concentration, reaching the greatest decline in crystallinity and the most extensive granule fragmentation in the treatment series at 6 ppm. At 8 ppm, the granules instead showed structural reorganization marked by a partial recovery in crystallinity and the formation of finer new granules. These findings indicate a trade-off between potentially beneficial functional modification of starch (increased final viscosity and paste stability) and reduced anthocyanin content, so the choice of ozone concentration for practical applications should be tailored to the specific intended purpose.*

Keywords: red rice paddy, ozonation, physical and chemical characteristics, anthocyanin content, starch granule crystallinity

**PENGARUH KONSENTRASI OZON TERHADAP
KARAKTERISTIK FISIK DAN KIMIA GABAH BERAS
MERAH (*Oryza sativa* L.)**

Oleh:

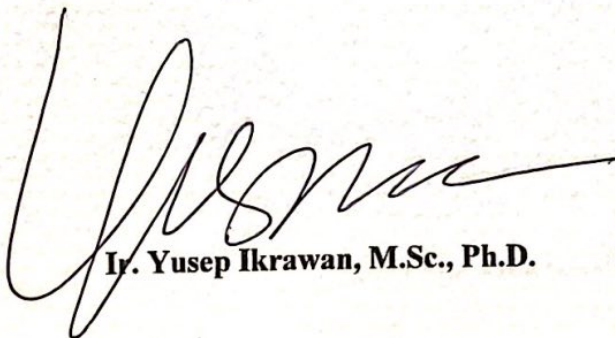
Zahra Putri Alviena
223020015
(Program Studi Teknologi Pangan)

Fakultas Teknik
Universitas Pasundan

Menyetujui,
Tim Pembimbing

Tanggal 11 - 08 - 2026

Pembimbing 1



Ir. Yusep Ikrawan, M.Sc., Ph.D.

Pembimbing 2



Sandi Darniadi, S.P., M.T., Ph.D.

**PENGARUH KONSENTRASI OZON TERHADAP
KARAKTERISTIK FISIK DAN KIMIA GABAH BERAS
MERAH (*Oryza sativa* L.)**

Oleh:

Zahra Putri Alviena
223020015
(Program Studi Teknologi Pangan)

Fakultas Teknik
Universitas Pasundan

Menyetujui,

Tanggal12-08-2026.....

Koordinator Tugas Akhir

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized 'R' followed by a horizontal line and a loop.

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 arahan 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 ditulis dalam Bahasa Indonesia sebagai berikut:

Alviena, Z. P. (2026). Pengaruh Konsentrasi Ozon Terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Gabah Beras Merah (*Oryza sativa* L.). Tugas Akhir Program Sarjana, Universitas Pasundan.

Dan dalam Bahasa Inggris sebagai berikut:

Alviena, Z. P. (2026). *Effect of Ozone Concentration on The Physical and Chemical Characteristics of Red Rice Paddy (Oryza Sativa L.)*. Tugas Akhir Program Sarjana, Universitas Pasundan.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah ﷻ karena atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya, Sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul **“PENGARUH KONSENTRASI OZON TERHADAP KARAKTERISTIK FISIK DAN KIMIA GABAH BERAS MERAH (*Oryza sativa* L.)”**.

Selama penyusunan laporan usulan penelitian ini, tentunya tidak dapat terselesaikan, tanpa dukungan, bantuan, dan masukan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan kali ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ir. Yusep Ikrawan, M.Sc., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang senantiasa meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan, arahan serta saran yang bermanfaat kepada penulis dalam penyusunan laporan ini.
2. Sandi Darniadi, S.P., M.T., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing Lapangan yang senantiasa meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan, arahan serta saran yang bermanfaat kepada penulis dalam penyusunan laporan ini.
3. Dr. Ira Endah Rohima, S.T., M.Si, selaku Dosen Penguji Sidang Tugas Akhir Program Studi Teknologi Pangan Universitas Pasundan yang telah memberikan saran dan masukan kepada penulis.
4. Jaka Rukmana, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknologi Pangan Universitas Pasundan beserta jajarannya.
5. Keluarga yang penulis cintai, terutama kedua orang tua dan adik penulis yaitu Ayah Agus Lidianto, Bunda Novy Herlin, dan Nadhira Putri Alviesya atas segala doa, kasih sayang, dukungan, pengorbanan, dan perhatian yang senantiasa diberikan. Berkat doa dan dukungan yang tulus dari keluarga, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
6. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Olivio Pascalis, yang telah memberikan doa, dukungan, kasih sayang, motivasi, perhatian, serta

semangat kepada penulis selama proses penyusunan skripsi ini. Terima kasih atas segala kesabaran, pengertian, dan segala bentuk dukungan yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.

7. Sahabat-sahabat terdekat penulis dari SMP, SMA, hingga bangku perkuliahan yang telah memberikan dukungan, semangat, serta kebersamaan disertai dengan canda tawa selama ini, yaitu kepada Lily Amaliyah, Nasywa Ubaidillah, Yasyfa Kharima, Intan Armelianti, Vani Aulia, Siti Syarah, Rifda Alya, Lavina Nazhimah, Hilda Muthia, Erica Nadia, Desta Mia, Kamiliya Nailah, Irma Faustina, Raissa Rahmalia, Diandra Khansa, dan teman-teman lainnya yang tidak dapat disebutkan satu per satu.
8. Teman-teman seperjuangan penelitian tugas akhir ini yaitu Hani Uswatun Hasanah, Ismail Ahmad Danial, Nazmi Ghita Fauziah, Riafany Agustin dan Nazwa Amelia Cahyani yang telah memberikan dukungan, bantuan, serta motivasi kepada penulis.
9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah memberikan motivasi dan semangat kepada penulis dalam kelancaran penelitian ini.

Akhir kata, dengan ini penulis berharap semoga dengan tersusunnya laporan tugas akhir ini, dapat memberikan dampak dan manfaat yang luas bagi pembaca, serta agar ilmu yang didapatkan dapat berguna. *Aamiinnn.*

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.....	3
1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Kerangka Pemikiran.....	4
1.6 Hipotesis.....	9
1.7 Waktu dan Tempat Penelitian.....	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1 Beras Merah (<i>Oryza sativa</i> L.).....	10
2.1.1 Taksonomi dan Klasifikasi Beras Merah	11
2.1.2 Morfologi Tanaman Padi Beras Merah	12
2.1.3 Varietas Inpari 24	12
2.1.4 Komposisi Gizi Beras Merah.....	15
2.1.5 Antosianin	16
2.2 Gabah	16
2.2.1 Struktur Anatomi Gabah	17
2.2.2 Karakteristik Fisik Gabah	18
2.2.3 Karakteristik Kimia Gabah Beras Merah.....	19
2.2.4 Standar Mutu Gabah Berdasarkan SNI 224:2023	20
2.3 Ozon	21
2.3.1 Pembentukan Ozon	22

2.3.2 Ozon Generator dengan Metode Lucutan Plasma.....	23
2.3.3 Keunggulan Metode <i>Plasma Chamber</i>	25
2.3.4 Mekanisme Oksidasi Ozon	26
2.3.5 Aplikasi Ozonisasi pada Bahan Pangan	27
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	30
3.1 Bahan dan Alat	30
3.1.1 Bahan.....	30
3.1.2 Alat.....	30
3.2 Metode Penelitian.....	31
3.2.1 Penelitian Utama	31
3.3 Prosedur Penelitian.....	37
3.4 Jadwal Penelitian.....	40
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	41
4.1 Hasil Penelitian	41
4.1.1 Respon Fisik.....	41
4.1.2 Respon Kimia.....	65
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	88
5.1 Kesimpulan	88
5.2 Saran.....	88
DAFTAR PUSTAKA	89
LAMPIRAN.....	95

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Klasifikasi Taksonomi Tanaman Padi Beras Merah (<i>Oryza sativa</i> L.)	11
Tabel 2.	Deskripsi Varietas Padi Beras Merah Inpari 24.....	13
Tabel 3.	Komposisi Gizi Beras Merah per 100 Gram Bahan Mentah.....	15
Tabel 4.	Persyaratan Mutu Gabah Kering Panen (GKP) Menurut SNI 224:2023	21
Tabel 5.	Persyaratan Mutu Gabah Kering Giling (GKG) Menurut SNI 224:2023	21
Tabel 6.	Rancangan Perlakuan	31
Tabel 7.	Rancangan Percobaan Faktorial	31
Tabel 8.	Kelompok Ulangan Rancangan Percobaan	32
Tabel 9.	Analisis Variasi Konsentrasi Ozon terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Gabah Beras Merah	33
Tabel 10.	Jadwal Penelitian	40
Tabel 11.	Posisi Puncak Difraksi, Kristalinitas Relatif, dan Fraksi Amorf Gabah Beras Merah	42
Tabel 12.	Hasil Analisis SEM pada Gabah Beras Merah Hasil Ozonisasi Konsentrasi pada Perbesaran 500x.....	49
Tabel 13.	Hasil Analisis SEM pada Gabah Beras Merah Hasil Ozonisasi Konsentrasi pada Perbesaran 1000x.....	51
Tabel 14.	Hasil Analisis SEM pada Gabah Beras Merah Hasil Ozonisasi Konsentrasi pada Perbesaran 2500x.....	53
Tabel 17.	Profil Gelatinisasi (RVA) Gabah Beras Merah pada Berbagai Konsentrasi Ozon	58
Tabel 18.	Pengaruh Konsentrasi Ozon terhadap Kadar Air Gabah Beras Merah.....	66
Tabel 19.	Pengaruh Konsentrasi Ozon terhadap Kadar Pati Gabah Beras Merah.....	68

Tabel 20. Pengaruh Konsentrasi Ozon terhadap <i>Water Activity</i> (a_w) Gabah Beras Merah.....	72
Tabel 21. Pengaruh Konsentrasi Ozon terhadap Kadar Antosianin Gabah Beras Merah.....	75
Tabel 22. Posisi Puncak Serapan FTIR Gabah Beras Merah pada Berbagai Konsentrasi Ozon	80
Tabel 23. Perhitungan Kebutuhan Sampel	100
Tabel 24. Kebutuhan Bahan Penelitian	100
Tabel 26. Hasil Analisis Respon Kimia Kadar Air	104
Tabel 27. Analisis Variasi (ANOVA) Kadar Air	105
Tabel 28. Data Hasil Analisis Kadar Pati	106
Tabel 29. Analisis Variasi (ANOVA) Kadar Pati	107
Tabel 30. Hasil Uji Lanjut Duncan Kadar Pati.....	108
Tabel 31. Data Hasil Analisis <i>Water Activity</i> (a_w).....	109
Tabel 32. Analisis Variasi (ANOVA) <i>Water Activity</i> (a_w)	110
Tabel 33. Data Hasil Analisis Kadar Antosianin	111
Tabel 34. Analisis Variasi (ANOVA) Kadar Antosianin	112
Tabel 35. Uji Lanjut Duncan Kadar Antosianin	113
Tabel 36. Data Hasil Analisis <i>Peak Viscosity</i> Profil Gelatinisasi (RVA).....	114
Tabel 37. Analisis Variasi (ANOVA) <i>Peak Viscosity</i> Profil Gelatinisasi (RVA)	114
Tabel 38. Uji Lanjut Duncan Analisis <i>Peak Viscosity</i> Profil Gelatinisasi (RVA).....	115
Tabel 39. Data Hasil Analisis <i>Through Viscosity</i> Profil Gelatinisasi (RVA) ...	116
Tabel 40. Analisis Variasi (ANOVA) <i>Through Viscosity</i> Profil Gelatinisasi (RVA).....	116
Tabel 41. Uji Lanjut Duncan Analisis <i>Through Viscosity</i> Profil Gelatinisasi (RVA).....	117
Tabel 42. Data Hasil Analisis <i>Breakdown</i> Profil Gelatinisasi (RVA).....	118
Tabel 43. Analisis Variasi (ANOVA) <i>Breakdown</i> Profil Gelatinisasi (RVA)...	118
Tabel 44. Uji Lanjut Duncan Analisis <i>Breakdown</i> Profil Gelatinisasi (RVA).	119

Tabel 45. Data Hasil Analisis <i>Final Viscosity</i> Profil Gelatinisasi (RVA)	120
Tabel 46. Analisis Variasi (ANAVA) <i>Final Viscosity</i> Profil Gelatinisasi (RVA).....	120
Tabel 47. Uji Lanjut Duncan Analisis <i>Final Viscosity</i> Profil Gelatinisasi (RVA).....	121
Tabel 48. Data Hasil Analisis <i>Setback</i> Profil Gelatinisasi (RVA).....	122
Tabel 49. Analisis Variasi (ANAVA) <i>Setback</i> Profil Gelatinisasi (RVA)	122
Tabel 50. Uji Lanjut Duncan Analisis <i>Setback</i> Profil Gelatinisasi (RVA).....	123
Tabel 51. Data Hasil Analisis <i>Peak Time</i> Profil Gelatinisasi (RVA)	124
Tabel 52. Analisis Variasi (ANAVA) <i>Peak Time</i> Profil Gelatinisasi (RVA)....	124
Tabel 53. Uji Lanjut Duncan Analisis <i>Peak Time</i> Profil Gelatinisasi (RVA) ..	125
Tabel 54. Data Hasil Analisis <i>Pasting Temperature</i> Profil Gelatinisasi (RVA)	126
Tabel 55. Analisis Variasi (ANAVA) <i>Pasting Temperature</i> Profil Gelatinisasi (RVA).....	126
Tabel 56. Uji Lanjut Duncan Analisis <i>Pasting Temperature</i> Profil Gelatinisasi (RVA).....	127

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Beras Merah.....	10
Gambar 2.	Tanaman Padi Beras Merah	12
Gambar 3.	Gabah Beras Merah	17
Gambar 4.	Struktur Anatomi Gabah	17
Gambar 5.	Generator Ozon (<i>Plasma Chamber</i>)	23
Gambar 6.	Diagram Alir Prosedur Penelitian Pengaruh Konsentrasi Ozon terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Gabah Beras Merah (<i>Oryza sativa</i> L.).....	39
Gambar 7.	Pola Difraksi Sinar-X (XRD) Gabah Beras Merah pada Berbagai Konsentrasi Ozon	42
Gambar 8.	Grafik Profil Gelatinisasi (RVA) Gabah Beras Merah pada Berbagai Konsentrasi Ozon	59
Gambar 9.	Grafik FTIR Gabah Beras Merah pada Berbagai Konsentrasi Ozon.....	80
Gambar 10.	Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf (XRD) Gabah Beras Merah pada Konsentrasi 0 ppm (a1).....	101
Gambar 11.	Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf (XRD) Gabah Beras Merah pada Konsentrasi 2 ppm (a2).....	101
Gambar 12.	Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf (XRD) Gabah Beras Merah pada Konsentrasi 4 ppm (a3).....	102
Gambar 13.	Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf (XRD) Gabah Beras Merah pada Konsentrasi 6 ppm (a4).....	102
Gambar 14.	Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf (XRD) Gabah Beras Merah pada Konsentrasi 8 ppm (a5).....	103
Gambar 15.	Grafik Analisis Gugus Fungsi (FTIR) Gabah Beras Merah pada Konsentrasi 0 ppm (a1).....	128
Gambar 16.	Grafik Analisis Gugus Fungsi (FTIR) Gabah Beras Merah pada Konsentrasi 2 ppm (a2).....	128

Gambar 17. Grafik Analisis Gugus Fungsi (FTIR) Gabah Beras Merah pada Konsentrasi 4 ppm (a3).....	129
Gambar 18. Grafik Analisis Gugus Fungsi (FTIR) Gabah Beras Merah pada Konsentrasi 6 ppm (a4).....	129
Gambar 19. Grafik Analisis Gugus Fungsi (FTIR) Gabah Beras Merah pada Konsentrasi 8 ppm (a5).....	129
Gambar 20. Dokumentasi Proses Ozonisasi Gabah Beras Merah	130
Gambar 21. Dokumentasi Proses Preparasi Sampel Gabah Beras Merah.....	130
Gambar 22. Dokumentasi Analisis Kadar Air Metode Gravimetri.....	130
Gambar 23. Dokumentasi Analisis Kadar Pati Metode Luff Schoorl.....	131
Gambar 24. Dokumentasi Analisis Morfologi Granula Pati (SEM).....	132
Gambar 25. Dokumentasi Analisis Kristalinitas dan Amorf (XRD)	132
Gambar 26. Dokumentasi Analisis Gugus Fungsi (FTIR).....	133
Gambar 27. Dokumentasi Analisis <i>Water Activity</i> (a_w)	133
Gambar 28. Dokumentasi Analisis Kadar Antosianin Metode pH Differential.....	134

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Prosedur Analisis Kadar Air Metode Gravimetri (AOAC, 2005).....	95
Lampiran 2.	Prosedur Analisis Kadar Pati Metode Luff Schoorl (AOAC, 1992).....	95
Lampiran 3.	Prosedur Analisis Nilai <i>Water Activity</i> (a_w) (Afistia, 2024)	96
Lampiran 4.	Prosedur Analisis Antosianin menggunakan Metode pH Differential (Anggraeni et al., 2018)	96
Lampiran 5.	Prosedur Analisis Profil Gelatinisasi menggunakan Rapid Visco Analyzer (RVA) (Rapid Visco Analyzer (RVA), 1994) ..	98
Lampiran 6.	Prosedur Analisis Gugus Fungsi menggunakan Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy (Alrasyid, 2025)	99
Lampiran 7.	Prosedur Analisis Kristalinitas dan Amorf menggunakan X-Ray Diffractometer (XRD) (Laboratorium X-Ray, 2020).....	99
Lampiran 8.	Prosedur Analisis Morfologi Granula Pati menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) (Rohmah et al., 2022).	100
Lampiran 9.	Perhitungan Kebutuhan Sampel	100
Lampiran 10.	Kebutuhan Bahan Penelitian	100
Lampiran 11.	Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf (XRD) pada Berbagai Konsentrasi Ozon	101
Lampiran 12.	Hasil Analisis Kadar Air	104
Lampiran 13.	Hasil Analisis Kadar Pati.....	106
Lampiran 14.	Hasil Analisis <i>Water Activity</i> (a_w).....	109
Lampiran 15.	Hasil Analisis Kadar Antosianin.....	111
Lampiran 16.	Hasil Analisis Profil Gelatinisasi (RVA).....	114
Lampiran 17.	Grafik Analisis Gugus Fungsi (FTIR) Gabah Beras Merah pada Berbagai Konsentrasi Ozon	128
Lampiran 18.	Dokumentasi Penelitian.....	130

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini membahas 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, dan (1.7) Waktu dan Tempat Penelitian.

1.1 Latar Belakang

Beras merupakan komoditas pangan strategis bagi lebih dari separuh penduduk dunia, termasuk Indonesia dengan populasi 284,44 juta jiwa pada tahun 2025 (Badan Pusat Statistik, 2025). Produksi padi nasional tahun 2025 mencapai 60,21 juta ton GKG, meningkat 13,29 persen dibanding 2024 yang sebesar 53,14 juta ton GKG, dengan produksi beras diperkirakan 34,69 juta ton. Peningkatan ini didorong oleh luas panen 11,32 juta hektare dan produktivitas 63,55 kuintal per hektare (Badan Pusat Statistik, 2026). Di tengah upaya peningkatan ketahanan pangan, diversifikasi melalui beras merah semakin relevan mengingat nilai gizi dan fungsionalnya yang lebih tinggi dibanding beras putih konvensional.

Beras merah (*Oryza sativa* L.) mengandung antosianin, pigmen flavonoid yang memberikan warna merah pada perikarp sekaligus berfungsi sebagai antioksidan alami (Sulianti *et al.*, 2011; Syafutri *et al.*, 2020). Kandungan gizinya per 100 gram meliputi 360 kkal energi, 6,6 gram protein, 0,58 gram lemak, dan 79,34 gram karbohidrat, dengan kadar serat lebih tinggi dibanding beras putih (Hernawan, E., & Meylani, 2016). Kandungan senyawa fenolik turut berkontribusi terhadap aktivitas antioksidan (Anggraeni *et al.*, 2018; Anggraini *et al.*, 2017), dengan potensi pencegahan penyakit degeneratif seperti diabetes dan kardiovaskular (Sulianti *et al.*, 2011). Keberadaan lapisan perikarp dan aleuron yang masih utuh pada gabah beras merah menjadikannya objek yang menarik untuk dikaji, terutama dalam konteks respons karakteristik fisik dan kimianya terhadap berbagai perlakuan.

Teknologi ozonisasi telah banyak diterapkan dalam industri pangan sebagai agen perlakuan yang bersifat non-termal. Ozon merupakan oksidator kuat dengan potensial oksidasi 2,07 volt yang mampu menghasilkan radikal hidroksida 2,7 volt, dan telah diakui sebagai bahan *Generally Recognized as Safe* (GRAS) oleh US-

FDA sejak tahun 2001 (Sivaranjani *et al.*, 2021). Sebagai agen oksidatif, ozon diketahui mampu berinteraksi dengan berbagai komponen kimia bahan pangan, termasuk pati, protein, lipid, dan senyawa bioaktif (Brodowska *et al.*, 2018). Sifat oksidatif yang kuat ini menjadikan ozon tidak hanya berperan sebagai agen antimikroba, tetapi juga berpotensi memodifikasi karakteristik fisik dan kimia bahan yang dikenai perlakuan.

Penerapan ozon pada gabah beras merah menghadirkan pertanyaan ilmiah yang mendasar terkait sejauh mana interaksi antara ozon dan komponen penyusun gabah dapat mengubah karakteristik fisik dan kimianya. Sebagai oksidator kuat, ozon berpotensi memengaruhi komponen kimia gabah seperti pati, protein, lemak, dan senyawa bioaktif, terutama pada lapisan aleuron yang kaya antosianin dan fenolik. Antosianin sebagai senyawa flavonoid yang bersifat tidak stabil diketahui sangat rentan terhadap kondisi oksidatif (Hou *et al.*, 2013; Loypimai *et al.*, 2016), sehingga perlakuan ozon pada berbagai konsentrasi berpotensi menginduksi perubahan kuantitatif maupun kualitatif pada senyawa bioaktif tersebut. Di sisi lain, komponen pati, protein, dan lipid pada lapisan endosperma dan bekatul juga dapat mengalami modifikasi struktural akibat mekanisme oksidasi langsung maupun tidak langsung oleh ozon (Obadi *et al.*, 2018; Zhu, 2018).

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji pengaruh ozon terhadap sereal, namun mayoritas difokuskan pada beras putih, tepung gandum, jagung, dan pati terisolasi. Shah *et al.* (2015) melaporkan bahwa perlakuan ozon pada beras putih menyebabkan perubahan signifikan pada parameter warna, sementara Obadi *et al.* (2018) menunjukkan adanya modifikasi pada struktur protein dan daya serap tepung gandum utuh yang diozonisasi. Efektivitas dan dampak perlakuan ozon sangat dipengaruhi oleh konsentrasi yang digunakan, mengingat konsentrasi ozon yang berbeda akan menghasilkan intensitas oksidasi yang berbeda pula terhadap setiap komponen kimia bahan (Brodowska *et al.*, 2018; Prabha *et al.*, 2015). Hingga saat ini, kajian ilmiah yang spesifik mengkaji pengaruh variasi konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisik dan kimia gabah beras merah (*Oryza sativa* L.), khususnya terhadap stabilitas senyawa antosianin dan komponen fungsional lainnya, masih sangat terbatas.

Oleh karena itu, penelitian berjudul "Pengaruh Konsentrasi Ozon terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Gabah Beras Merah (*Oryza sativa* L.)" ini bertujuan menghasilkan data ilmiah komprehensif mengenai bagaimana variasi konsentrasi ozon memengaruhi karakteristik fisik dan kimia gabah beras merah, termasuk perubahan pada komponen bioaktif (antosianin), struktur dan profil gelatinisasi pati, serta kadar air gabah. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan data ilmiah yang menggambarkan pola respons karakteristik fisik dan kimia gabah beras merah terhadap variasi konsentrasi ozon, sekaligus menjadi acuan dalam menentukan konsentrasi ozon yang optimal berdasarkan profil perubahan komponen fisik, kimia, dan bioaktif yang terukur.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka masalah yang dapat diidentifikasi adalah bagaimana pengaruh konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisik dan kimia gabah beras merah?

1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian

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

Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui sejauh mana konsentrasi ozon memengaruhi karakteristik fisik dan kimia gabah beras merah.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini yaitu:

1. Menyediakan data ilmiah dasar mengenai respons fisik dan kimia gabah beras merah utuh terhadap ozonisasi pada berbagai konsentrasi.
2. Memberikan gambaran mengenai *trade-off* antara modifikasi fungsional pati yang berpotensi menguntungkan, dengan penurunan kandungan antosianin akibat ozonisasi, sehingga dapat menjadi dasar pertimbangan dalam memilih konsentrasi ozon sesuai dengan tujuan aplikasi yang ingin dicapai.

3. Memberikan data pendukung bagi Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) dalam pengembangan aplikasi teknologi ozon pada komoditas sereal berpigmen.
4. Melengkapi riset ozonisasi bahan pangan berpigmen di Program Studi Teknologi Pangan Universitas Pasundan, khususnya dalam memperkaya perbandingan respons terhadap perlakuan ozon.

1.5 Kerangka Pemikiran

Beras merah (*Oryza sativa* L.) merupakan salah satu varietas padi yang memiliki karakteristik fisikokimia berbeda secara signifikan dibandingkan beras putih maupun beras hitam (*Oryza sativa* L. indica), di antaranya suhu gelatinisasi yang lebih rendah (83–85°C pada beras merah non-organik) serta kandungan serat kasar yang lebih tinggi (Hernawan dan Meylani, 2016). Berdasarkan Tabel Komposisi Pangan Indonesia (Kementerian Kesehatan RI, 2017), beras merah mengandung energi 352 kkal, protein 7,3 gram, lemak 0,9 gram, karbohidrat 76,2 gram, dan serat kasar 0,8 gram per 100 gram bahan. Perbedaan komposisi ini tidak terlepas dari keberadaan lapisan kulit ari (perikarp) dan lapisan aleuron yang masih utuh pada gabah beras merah, yang membedakannya secara fundamental dari beras putih giling. Lapisan inilah yang menjadi lokasi terkonsentrasinya senyawa bioaktif sekaligus bagian yang paling pertama berinteraksi dengan agen perlakuan eksternal seperti ozon. Suliartini *et al.*, (2011) melaporkan bahwa pigmen antosianin pada beras merah berperan sebagai antioksidan alami yang mampu menangkal radikal bebas, sementara Shao *et al.* (2017) mengidentifikasi adanya senyawa fenolik dan flavonoid lain yang turut berkontribusi terhadap kapasitas antioksidan total beras merah. Keberadaan komponen bioaktif pada lapisan kulit ari yang masih utuh inilah yang menempatkannya sebagai fraksi yang pertama kali terpapar dan paling berpotensi terpengaruh ketika perlakuan ozon diaplikasikan pada gabah beras merah.

Antosianin merupakan metabolit sekunder golongan flavonoid yang bertanggung jawab atas pigmentasi merah pada beras merah, dengan sianidin-3-glukosida dan peonidin-3-glukosida sebagai komponen utama yang terkonsentrasi

pada perikarp dan aleuron (Hou *et al.*, 2013; Priska *et al.*, 2018). Meskipun memiliki aktivitas antioksidan yang kuat, antosianin bersifat sangat tidak stabil; laju degradasinya meningkat seiring kenaikan suhu dan pH (Loypimai *et al.* 2016), dan kondisi oksidatif secara khusus mempercepat pemucatan warna melalui pembentukan pigmen polimer (Hou *et al.*, 2013). Sifat sensitif ini menjadikan antosianin sebagai parameter utama yang perlu dikaji secara kuantitatif dalam penelitian ini. Senyawa fenolik total pada lapisan aleuron dan perikarp turut memberikan konteks mengapa lapisan tersebut sensitif terhadap ozon, karena senyawa ini juga dilaporkan menunjukkan respons dua arah terhadap paparan oksidatif: pada konsentrasi tertentu, ozon menginduksi stres oksidatif ringan yang justru merangsang peningkatan senyawa fenolik, namun pada konsentrasi berlebih senyawa fenolik terdegradasi secara destruktif (Kaur *et al.*, 2023). Fenomena inilah yang mendasari dugaan bahwa antosianin, sebagai komponen bioaktif utama gabah beras merah, akan menunjukkan pola respons kuantitatif yang bergantung pada keseimbangan laju pembentukan dan laju degradasi akibat variasi konsentrasi ozon yang diaplikasikan.

Gabah beras merah tersusun atas komponen kimia yang kompleks, meliputi pati sebagai komponen terbesar, serta protein, lemak, serat, mineral, dan senyawa bioaktif yang masing-masing memiliki karakteristik interaksi berbeda terhadap agen oksidatif. Fraksi pati menyusun sekitar 80–85% dari total bobot endosperma dan tersusun dari amilosa (struktur tidak bercabang) dan amilopektin (struktur bercabang) yang rasionya menentukan sifat fungsional beras (Septianingrum *et al.*, 2016). Tingginya kandungan amilopektin berkaitan dengan sifat pulen beras, sedangkan amilosa yang lebih tinggi menghasilkan beras dengan tekstur lebih pera dan laju pencernaan yang lebih lambat, sehingga rasio keduanya turut memengaruhi pola perubahan sifat pasta pati yang tercermin pada profil gelatinisasi (RVA) dan struktur kristalin (XRD) akibat perlakuan ozon. Komponen lipid pada lapisan bekatul yang kaya asam lemak tak jenuh merupakan substrat yang rentan terhadap reaksi peroksidasi oksidatif (Zhu, 2018), sementara fraksi protein dapat mengalami modifikasi konformasi akibat oksidasi gugus reaktif oleh ozon (Obadi *et al.*, 2018). Serat pangan pada lapisan kulit ari yang tersusun dari selulosa dan hemiselulosa

juga berpotensi mengalami depolimerisasi parsial akibat oksidasi ozon. Kompleksitas komposisi kimia ini menjadikan gabah beras merah sebagai matriks yang menarik untuk diteliti, di mana setiap komponen dapat memberikan respons yang berbeda-beda terhadap variasi konsentrasi ozon yang diaplikasikan.

Ozon (O_3) adalah molekul triatomik oksigen dengan potensial oksidasi 2,07 volt (Graham, 1997) yang bekerja melalui dua mekanisme utama: reaksi langsung yang selektif terhadap ikatan tidak jenuh dan gugus aromatik, serta reaksi tidak langsung melalui pembentukan radikal hidroksil yang jauh lebih reaktif dan tidak selektif terhadap komponen organik (Kaur *et al.*, 2023; Prabha *et al.*, 2015). Efektivitas dan dampak ozon terhadap komponen bahan pangan sangat dipengaruhi oleh konsentrasi yang digunakan, durasi paparan, serta karakteristik matriks bahan (Brodowska *et al.*, 2018). Mekanisme ganda ini menjelaskan mengapa konsentrasi rendah cenderung hanya memengaruhi komponen permukaan paling reaktif seperti antosianin dan lipid, sementara konsentrasi lebih tinggi berpotensi berpenetrasi lebih dalam dan memengaruhi komponen struktural seperti pati dan protein. Sivaranjani *et al.* (2021) menegaskan bahwa ozon merupakan teknologi non-termal yang efektif untuk modifikasi sifat fungsional sereal, sehingga pemahaman mengenai pengaruh variasi konsentrasinya menjadi penting untuk menjelaskan mekanisme interaksi ozon dengan berbagai komponen kimia gabah beras merah.

Shah *et al.* (2015) menemukan bahwa perlakuan ozon 0,1–0,4 ppm selama 0 – 420 menit menyebabkan perubahan nyata pada parameter warna beras putih, khususnya nilai kecerahan (L^*) dan kekuningan (b^*) ($P < 0,05$); dampak ini menjadi jauh lebih kritis pada beras merah karena warna merah dari antosianin merupakan indikator utama kualitas fungsional dan akan berkorelasi langsung dengan nilai antioksidan. Dari aspek proksimat, ozonisasi menyebabkan perubahan struktur protein yang terdeteksi melalui perubahan intensitas vibrasi gugus fungsi, disertai peningkatan signifikan daya serap air (Obadi *et al.*, 2018), serta berpotensi menginduksi peroksidasi lipid yang ditandai peningkatan nilai asam lemak bebas (Zhu, 2018), yang menegaskan bahwa intensitas oksidasi ozon dapat memengaruhi berbagai komponen kimia gabah secara proporsional terhadap konsentrasi yang

diaplikasikan, termasuk pati dan senyawa bioaktif yang menjadi fokus utama penelitian ini.

Lee *et al.* (2017) menggunakan durasi 15, 30, 45, dan 60 menit pada ozonisasi tepung gandum Korea dan menemukan bahwa perubahan bermakna pada warna, viskositas, dan struktur protein sudah terdeteksi mulai durasi 30 menit. Wen *et al.* (2016) juga menggunakan 30 menit sebagai taraf terpendek dalam ozonisasi biji gandum pada konsentrasi 75 mg/L dan berhasil mendeteksi perubahan terukur pada komponen kimia biji. Durasi ini dipandang cukup untuk menginduksi interaksi ozon dengan komponen kimia pada lapisan terluar gabah tanpa menginduksi oksidasi destruktif yang umumnya terjadi pada paparan lebih dari 60 menit (Prabha *et al.*, 2015; Kaur *et al.*, 2023).

Kandungan pati merupakan parameter kimia kunci yang menentukan sifat fungsional gabah beras merah, dengan rasio amilosa-amilopektin sebagai salah satu faktor yang memengaruhi responsnya terhadap perlakuan ozon. Whaib *et al.* (2022) melaporkan bahwa rasio amilosa/amilopektin beras jasmine Irak tidak berubah secara signifikan setelah perlakuan ozon, yang mengindikasikan bahwa struktur dasar pati dapat tetap terjaga pada kondisi ozonisasi tertentu. Namun, Ramos *et al.* (2024) pada pati quinoa yang diozonisasi melaporkan bahwa kandungan amilosa dan kristalinitas relatif menurun seiring bertambahnya durasi ozonisasi akibat depolimerisasi amilosa. Perbedaan hasil ini mengindikasikan bahwa respons fraksi pati terhadap ozon sangat bergantung pada karakteristik botani bahan, komposisi awal pati, serta intensitas perlakuan yang diterapkan. Oleh karena itu, kajian khusus pada gabah beras merah tetap diperlukan untuk memperoleh data yang representatif dan tidak dapat digeneralisasi langsung dari komoditas lain.

Analisis instrumen seperti Rapid Visco Analyzer (RVA) dan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) menyediakan informasi penting mengenai perubahan sifat fungsional dan struktural komponen gabah akibat perlakuan ozon pada berbagai konsentrasi. Gozé *et al.* (2016) menggunakan RVA untuk mengevaluasi sifat pasta pati gandum setelah ozonisasi dan menemukan perubahan profil viskositas yang mengindikasikan terjadinya oksidasi pada protein dan polisakarida non-pati. Obadi *et al.* (2018) melaporkan penurunan signifikan pada nilai *peak*

viscosity, trough, breakdown, final, dan *setback viscosity* tepung gandum utuh yang diozonisasi, yang mengindikasikan pelemahan struktur granula pati. Sumardiono *et al.* (2021) mendemonstrasikan bahwa spektra FTIR pati yang diozonisasi menunjukkan perubahan intensitas serapan pada bilangan gelombang tertentu dibandingkan pati natif. Rasio absorbansi pada $1047/1022\text{ cm}^{-1}$ dalam spektra FTIR dapat digunakan sebagai indikator perubahan tingkat kristalinitas jarak pendek (*short-range order*) pati akibat oksidasi ozon (Du *et al.*, 2024). Perubahan yang terdeteksi melalui kedua instrumen tersebut berkaitan erat dengan mekanisme oksidasi ozon pada level molekuler, di mana ozonisasi menyebabkan depolimerisasi rantai amilosa dan amilopektin serta pembentukan gugus karbonil dan karboksil baru yang mengubah organisasi struktural lamela pada daerah amorf dan kristalin granula pati. Dampaknya meliputi perubahan viskositas, daya kembang, kapasitas penyerapan air, dan karakteristik gelatinisasi, serta kecenderungan karakteristik beras yang menyerupai proses *aging* seiring peningkatan konsentrasi ozon (Kaur *et al.*, 2023). Kombinasi analisis RVA dan FTIR pada gabah beras merah akan mengungkapkan bagaimana variasi konsentrasi ozon memengaruhi profil gelatinisasi dan modifikasi gugus fungsional komponen-komponen penyusun gabah secara proporsional.

Perlakuan ozon juga berpotensi memengaruhi struktur kristalin dan morfologi permukaan gabah beras merah yang dapat dikarakterisasi melalui analisis X-Ray Diffraction (XRD) dan Scanning Electron Microscopy (SEM). Almeida *et al.* (2025) melaporkan ozonisasi 90 menit meningkatkan kristalinitas relatif pati beras japonica sebesar 11,42%, dan pada durasi lebih panjang granula membentuk aglomerat. Sumardiono *et al.* (2021) menunjukkan pola difraksi XRD pati sagu yang diozonisasi tetap serupa dengan pati natif, mengindikasikan oksidasi terutama terjadi pada fase amorf, sementara SEM mengungkapkan erosi permukaan berupa retakan dan pori-pori pada sebagian granula. Pada konteks gabah beras merah utuh, analisis XRD dan SEM akan memberikan informasi visual dan struktural mengenai sejauh mana ozon berpenetrasi melalui lapisan kulit ari dan memengaruhi struktur kristalin pati pada endosperma, serta apakah terjadi perubahan morfologis pada permukaan gabah akibat variasi konsentrasi ozon yang diaplikasikan.

Berdasarkan telaah terhadap berbagai penelitian di atas, dapat diidentifikasi bahwa mayoritas kajian mengenai aplikasi ozon pada sereal difokuskan pada beras putih, gandum, jagung, dan pati terisolasi, sementara penelitian spesifik pada gabah beras merah (*Oryza sativa* L.) masih sangat terbatas. Padahal, lapisan kulit ari utuh yang kaya antosianin, senyawa fenolik, dan lipid pada beras merah diduga menghasilkan respons berbeda terhadap ozon dibandingkan beras putih giling. Sensitivitas antosianin terhadap kondisi oksidatif sebagaimana dilaporkan oleh Loypimai *et al.* (2016) dan Hou *et al.* (2013) memperkuat dugaan bahwa ozon pada konsentrasi tertentu dapat mendegradasi komponen bioaktif ini secara proporsional. Mengacu pada sensitivitas antosianin terhadap kondisi oksidatif (Loypimai *et al.*, 2016; Hou *et al.*, 2013), variasi konsentrasi ozon diperkirakan akan memberikan pengaruh yang berbeda-beda terhadap karakteristik fisik gabah beras merah meliputi morfologi pati (SEM), struktur kristalin dan amorf (XRD), dan profil gelatinisasi (RVA), serta karakteristik kimianya yang meliputi kadar air, kadar pati, water activity, kadar antosianin, dan gugus fungsional (FTIR). Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi secara komprehensif pola perubahan tersebut guna mengidentifikasi konsentrasi ozon yang optimal, yaitu yang cukup memicu modifikasi terukur tanpa menyebabkan degradasi signifikan pada komponen bioaktif gabah beras merah (*Oryza sativa* L.).

1.6 Hipotesis

Berdasarkan kerangka pemikiran di atas maka diperoleh hipotesis yaitu diduga bahwa konsentrasi ozon berpengaruh terhadap karakteristik fisik dan kimia gabah beras merah.

1.7 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan April 2026 hingga Juli 2026 di Laboratorium Universitas Pasundan, Jl. Dr. Setiabudi No.193, Gegerkalong, Kec. Sukasari, Kota Bandung dan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Jl. Sangkuriang, Dago, Kecamatan Coblong, Kota Bandung.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menguraikan mengenai; (2.1) Beras Merah (*Oryza sativa* L.), (2.2) Gabah, dan (2.3) Ozon.

2.1 Beras Merah (*Oryza sativa* L.)

Beras merah merupakan salah satu varietas tanaman padi budidaya (*Oryza sativa* L.) yang menghasilkan bulir dengan warna merah khas akibat adanya pigmen antosianin yang terkonsentrasi pada lapisan perikarp dan aleuron (Suliartini *et al.*, 2011). Beras merah tergolong ke dalam kelompok beras berwarna (*colored rice*) yang berbeda dari beras putih sosoh karena lapisan bekatul dan aleuronnya tidak dihilangkan secara penuh dalam proses penggilingan, sehingga sebagian besar komponen gizi yang terdapat pada lapisan tersebut masih terjaga (Indrasari *et al.*, 2010).



(Sumber: Faperta UMSU, 2023)

Gambar 1. Beras Merah

Di Indonesia, beras merah banyak ditanam di lahan kering (*gogo*) di berbagai wilayah seperti Sulawesi, Nusa Tenggara, Kalimantan, dan Jawa. Ketertarikan masyarakat terhadap beras merah meningkat seiring dengan berkembangnya kesadaran pola makan sehat, karena beras merah diakui sebagai pangan fungsional yang memiliki kandungan serat pangan, antioksidan, vitamin, dan mineral yang lebih tinggi dibandingkan beras putih giling (Hernawan, E., & Meylani, 2016; Suliartini *et al.*, 2011). Helmyati, S., *et al.* (2022) menyebutkan

bahwa beras merah memiliki potensi sebagai substitusi beras putih yang baik dalam menu diet sehat, khususnya bagi penderita penyakit metabolik.

2.1.1 Taksonomi dan Klasifikasi Beras Merah

Tanaman padi penghasil beras merah secara taksonomi termasuk ke dalam spesies padi budidaya Asia, yaitu *Oryza sativa* L. Genus *Oryza* mencakup sekitar 23 spesies, namun hanya dua yang dibudidayakan secara massal oleh manusia, yaitu *O. sativa* (padi Asia) dan *O. glaberrima* (padi Afrika Barat). Spesies *O. sativa* L. memiliki dua subspecies utama, yaitu *indica* (umumnya berbutir panjang, tidak lengket) dan *japonica* (umumnya berbutir pendek, lebih lengket) (Suryanugraha *et al.*, 2017).

Pada sebagian literatur Indonesia menggunakan nama *Oryza sativa* L. untuk merujuk pada beras merah budidaya. Secara taksonomi, *O. sativa* L. adalah spesies padi liar yang merupakan kemungkinan nenek moyang padi budidaya, bukan padi budidaya itu sendiri. Warna merah pada beras merah merupakan sifat varietas yang dikendalikan oleh gen penghasil pigmen antosianin pada lapisan perikarp dan aleuron, bukan merupakan pembeda tingkat spesies (Sweeney & McCouch, 2007). Oleh karena itu, dalam skripsi ini digunakan nama *Oryza sativa* L. yang lebih tepat secara taksonomi. Klasifikasi ilmiah lengkap disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi Taksonomi Tanaman Padi Beras Merah (*Oryza sativa* L.)

Tingkatan Takson	Klasifikasi
Kingdom	<i>Plantae</i>
Subkingdom	<i>Tracheobionta</i> (Tumbuhan berpembuluh)
Super Divisi	<i>Spermatophyta</i> (Tumbuhan berbiji)
Divisi	<i>Magnoliophyta</i> (Tumbuhan berbunga)
Kelas	<i>Liliopsida</i> (Monokotil)
Sub Kelas	<i>Commelinidae</i>
Ordo	<i>Poales</i>
Famili	<i>Poaceae</i> (suku rumput-rumputan)

Genus	<i>Oryza</i> L.
Spesies	<i>Oryza sativa</i> L.

Sumber: (Makarim & Suhartatik, 2009; Suprihatno *et al.*, 2010; Suryanugraha *et al.*, 2017)

2.1.2 Morfologi Tanaman Padi Beras Merah



(Sumber: KDN Group, 2019)

Gambar 2. Tanaman Padi Beras Merah

Secara morfologi, tanaman padi beras merah (*Oryza sativa* L.) tidak memiliki perbedaan signifikan dari varietas padi budidaya lainnya, kecuali pada warna bulir. Tanaman ini merupakan tanaman semusim berakar serabut dengan tinggi 50–150 cm, tersusun atas bagian vegetatif (akar, batang, daun) dan generatif (malai, bunga, gabah). Pigmen antosianin yang memberi warna merah khas terakumulasi pada lapisan perikarp dan aleuron bulir gabah, yang umumnya dihilangkan dalam proses penyosohan sehingga beras merah yang diproses minimal masih memiliki kandungan nutrisi dan antioksidan lebih tinggi (Indrasari *et al.*, 2010).

2.1.3 Varietas Inpari 24

Varietas padi beras merah yang digunakan dalam penelitian ini adalah Inpari 24. Inpari merupakan singkatan dari Inbrida Padi Sawah Irigasi, yaitu varietas padi inbrida yang dikembangkan khusus untuk ekosistem sawah irigasi. Inpari 24 merupakan varietas unggul baru (VUB) beras merah yang dilepas secara resmi oleh Balai Besar Penelitian Tanaman Padi (BB Padi), Balitbangtan, Kementerian Pertanian Republik Indonesia pada tahun 2012.

Varietas Inpari 24 merupakan hasil persilangan antara Aek Sibundong dengan galur BB Padi BP7078F-MR-9-3. Persilangan ini menghasilkan varietas dengan karakteristik unggul dari sisi mutu fisik beras merah, tekstur nasi yang pulen, serta ketahanan terhadap penyakit hawar daun bakteri (HDB) yang merupakan salah satu penyakit utama pada tanaman padi di Indonesia (Suprihatno *et al.*, 2010). Mawaddah *et al.* (2018) dalam penelitian karakterisasi sifat agronomi padi beras merah menggunakan Inpari 24 sebagai varietas pembanding standar bersama Aek Sibundong, yang mengindikasikan bahwa Inpari 24 merupakan varietas referensi yang diakui dalam penelitian pemuliaan padi beras merah di Indonesia.

Deskripsi lengkap varietas Inpari 24 berdasarkan buku Deskripsi Varietas Unggul Baru Padi yang diterbitkan Balitbangtan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Deskripsi Varietas Padi Beras Merah Inpari 24

Karakter / Sifat	Keterangan
Nomor Seleksi	BP8-1B-14-3-PN-3
Asal Persilangan	Aek Sibundong / BP7078F-MR-9-3
Golongan	Cere (beras merah)
Umur Tanaman	kurang lebih 111 hari setelah semai (hss)
Bentuk Tanaman	Tegak
Tinggi Tanaman	kurang lebih 106 cm
Daun Bendera	Tegak
Warna Gabah	Kuning bersih
Warna Beras	Merah (akibat pigmen antosianin pada lapisan perikarp)
Bentuk Gabah	Sedang (panjang 5,5-6,5 mm, lebar 2,8-3,0 mm)
Kerontokan	Sedang
Tekstur Nasi	Pulen
Kadar Amilosa	kurang lebih 18%
Rata-rata Hasil GKG	6,7 ton/ha

Potensi Hasil GKG	7,7 ton/ha
Ketahanan HDB	Tahan terhadap Hawar Daun Bakteri (HDB) kelompok III, IV, dan VIII
Anjuran Tanam	Sawah irigasi, dataran rendah hingga ketinggian 400 m dpl
Tahun Dilepas	2012
Pemohon	Balai Besar Penelitian Tanaman Padi (BB Padi) - Balitbangtan, Kementan RI

Sumber: (Suprihatno *et al.*, 2010) Deskripsi Varietas Unggul Baru Padi, Balitbangtan - Kementan RI

Beberapa karakteristik Inpari 24 yang relevan dengan penelitian ini perlu diuraikan lebih lanjut. Pertama, kadar amilosa sekitar 18% tergolong dalam kategori beras beramilosa rendah-sedang. Septianingrum *et al.* (2016) menjelaskan bahwa kandungan amilosa berkorelasi negatif dengan indeks glikemik beras; sehingga kadar amilosa Inpari 24 yang relatif rendah menghasilkan nasi yang pulen namun memiliki IG yang sedikit lebih tinggi dibandingkan varietas beras merah beramilosa sedang-tinggi. Meski demikian, kandungan serat dan antosianin pada lapisan bekatul dan perikarp yang masih utuh tetap berkontribusi pada IG keseluruhan yang lebih rendah dari beras putih sosoh (Septianingrum *et al.*, 2016; Suprihatno *et al.*, 2010).

Kedua, rata-rata hasil gabah kering giling (GKG) sebesar 6,7 ton/ha dengan potensi hingga 7,7 ton/ha menjadikan Inpari 24 varietas beras merah dengan produktivitas yang kompetitif. Ketiga, ketahanan terhadap HDB kelompok III, IV, dan VIII merupakan keunggulan agronomis yang penting untuk efisiensi produksi. Keempat, umur panen sekitar 111 hss tergolong agak genjah untuk padi sawah irigasi, sehingga memungkinkan intensitas tanam yang lebih tinggi (Suprihatno *et al.*, 2010). Karakteristik fisikokimia gabah Inpari 24, khususnya kandungan antosianin pada lapisan perikarp, menjadi parameter utama yang akan dikaji responnya terhadap variasi konsentrasi ozon dalam penelitian ini, mengingat komponen tersebut merupakan indikator utama mutu dan nilai fungsional gabah beras merah.

2.1.4 Komposisi Gizi Beras Merah

Beras merah memiliki profil gizi yang lebih komprehensif dibandingkan beras putih giling karena proses pengolahannya yang hanya mengupas sekam tanpa menghilangkan lapisan bekatul dan aleuron. Lapisan tersebut merupakan tempat penyimpanan berbagai komponen bioaktif, serat pangan, vitamin B kompleks, dan mineral (Indrasari *et al.*, 2010; Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2017). Data komposisi gizi beras merah per 100 gram bahan berdasarkan Tabel Komposisi Pangan Indonesia (TKPI) yang diterbitkan Kementerian Kesehatan RI (2017) disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Komposisi Gizi Beras Merah per 100 Gram Bahan Mentah

Komponen Gizi	Jumlah	Satuan
Energi	352	kkal
Protein	7,3	gram
Lemak total	0,9	gram
Karbohidrat total	76,2	gram
Serat kasar	0,8	gram
Kalsium (Ca)	15	mg
Fosfor (P)	257	mg
Zat besi (Fe)	4,2	mg
Vitamin B1 (Tiamin)	0,34	mg
Air	14,6	gram

Sumber: Kementerian Kesehatan RI - Tabel Komposisi Pangan Indonesia/TKPI (2017)

Berdasarkan Tabel 3, beras merah mengandung serat kasar, zat besi, fosfor, dan vitamin B1 yang lebih tinggi dibandingkan beras putih sosoh, karena lapisan bekatul dan aleuronnya masih terjaga (Indrasari *et al.*, 2010). Kandungan-

kandungan ini berperan penting dalam mendukung kesehatan sistem pencernaan, metabolisme, dan fungsi imunitas tubuh (Kementerian Kesehatan RI, 2017).

2.1.5 Antosianin

Komponen fungsional yang paling membedakan beras merah dari beras putih adalah antosianin. Antosianin merupakan senyawa metabolit sekunder golongan flavonoid yang larut dalam air dan bertanggung jawab atas pigmentasi oranye, merah, ungu, biru, hingga hitam pada berbagai jaringan tumbuhan (Priska *et al.*, 2018). Pada beras merah, antosianin terakumulasi secara dominan pada lapisan perikarp dan lapisan aleuron bulir gabah. Jenis antosianin utama yang teridentifikasi adalah sianidin-3-glukosida dan peonidin-3-glukosida, dengan sianidin-3-glukosida sebagai komponen dominan (Hou *et al.*, 2013).

Sulianti *et al.* (2011) dalam pengujian kadar antosianin padi gogo beras merah koleksi plasma nutfah Sulawesi Tenggara melaporkan bahwa antosianin pada beras merah berperan sebagai antioksidan alami yang efektif menangkal radikal bebas, sehingga berpotensi mencegah sejumlah penyakit degeneratif. Kadar antosianin berbeda signifikan antar aksesori yang dikoleksi, yang dipengaruhi oleh faktor genetik varietas maupun kondisi lingkungan tumbuh. Anggraeni *et al.* (2018) dalam penelitian penetapan kadar antosianin total beras merah melaporkan bahwa metode spektrofotometri perbedaan pH merupakan metode akurat untuk kuantifikasi antosianin. Proses penyosohan yang menghilangkan lapisan perikarp dan aleuron menyebabkan hilangnya kandungan antosianin secara substansial (Indrasari *et al.*, 2010).

2.2 Gabah

Gabah merupakan buah tanaman padi (*Oryza sativa* L.) yang telah masak dan terlepas dari malainya. Secara botani, gabah bukan merupakan biji sejati melainkan buah padi yang tertutup oleh lemma dan palea. Buah ini terjadi setelah selesai penyerbukan dan pembuahan, di mana lemma dan palea serta bagian lain membentuk sekam atau kulit gabah (Makarim & Suhartatik, 2009). Gabah merupakan komoditas strategis yang menjadi objek penanganan padi sebelum diproses menjadi beras untuk dikonsumsi maupun disimpan. Mutu gabah sangat

menentukan rendemen dan mutu beras yang dihasilkan, sehingga penanganan gabah yang tepat merupakan kunci keberhasilan rantai pasok padi (Lestari & Kurniawan, 2021).

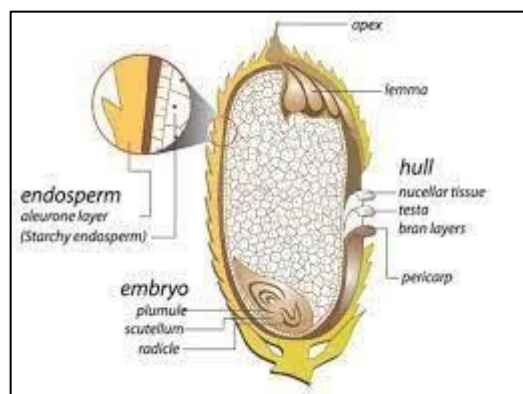


(Sumber: Wikipedia, 2006)

Gambar 3. Gabah Beras Merah

2.2.1 Struktur Anatomi Gabah

Secara anatomi, gabah tersusun atas dua komponen utama yaitu kariopsis padi dan struktur pembungkus (sekam). Kariopsis padi yang sehari-hari dikenal sebagai beras pecah kulit merupakan benih tunggal yang bergabung dengan dinding telur (perikarp) menjadi satu kesatuan. Kariopsis terdiri dari janin (embrio) dan endosperm yang diselimuti lapisan aleuron, kemudian tegmen, dan lapisan terluar yang disebut perikarp. Sekam tersusun dari dua bentuk daun termodifikasi yaitu lemma (sekam kelopak) dan palea (sekam mahkota). Rata-rata bobot sekam mencapai sekitar 20% dari total bobot gabah (Makarim & Suhartatik, 2009).



(Sumber: IRI BOOK, 1965)

Gambar 4. Struktur Anatomi Gabah

Pada gabah beras merah, pigmen antosianin yang memberi warna merah khas terakumulasi secara dominan pada lapisan perikarp dan aleuron. Hal ini menjadi pembeda utama gabah beras merah dari gabah beras putih yang lapisan aleuronnya tidak berpigmen. Proses penyosohan yang menghilangkan lapisan perikarp dan aleuron secara langsung akan menyebabkan hilangnya sebagian besar pigmen antosianin dan komponen bioaktif lainnya (Indrasari *et al.*, 2010).

2.2.2 Karakteristik Fisik Gabah

Karakteristik fisik gabah mencakup sejumlah parameter yang penting dalam menentukan mutu dan kelayakan proses penggilingan. Parameter-parameter tersebut meliputi kadar air, ukuran dan bentuk gabah (panjang, lebar, ketebalan), bobot 1.000 butir, densitas, warna, serta komposisi mutu fisik (gabah hampa, butir rusak, butir mengapur, butir merah, dan kotoran). Dalam pemutuan gabah menurut standar SNI, parameter mutu fisik gabah yang diukur meliputi kadar air, gabah hampa, butir rusak (kuning), butir mengapur (gabah muda), butir merah, dan kotoran/benda asing (Lestari & Kurniawan, 2021).

Kadar air merupakan parameter paling kritis dalam penanganan gabah. Berdasarkan SNI 6128:2015 (Badan Standarisasi Nasional, 2015), kadar air maksimum gabah/beras ditetapkan sebesar 14% (basis basah/b.b.), dan nilai ini menjadi acuan kondisi awal yang perlu dikontrol sebelum aplikasi perlakuan ozon. Kadar air yang melebihi 14% b.b. berisiko memicu pertumbuhan jamur, kontaminasi mikotoksin, dan percepatan respirasi biji yang menurunkan mutu gabah. Sebaliknya, kadar air yang terlalu rendah (<12% b.b.) menyebabkan gabah menjadi rapuh dan mudah retak selama penggilingan, meningkatkan persentase beras patah dan menir (Septianingrum, E., & Kusbiantoro, 2017). Dalam konteks perlakuan ozonisasi, kadar air gabah merupakan variabel yang perlu distandarkan agar setiap perlakuan konsentrasi ozon dapat memberikan respons yang konsisten dan terukur terhadap karakteristik fisik dan kimia gabah beras merah.

Warna gabah beras merah secara visual dapat dikenali dari warna merah pada lapisan perikarp yang kadang terlihat melalui sekam yang tipis atau pada potongan gabah. Dalam konteks penelitian, warna beras merah dapat diukur secara objektif

menggunakan berbagai parameter kolorimetri. Indrasari *et al.* (2010) melaporkan bahwa derajat warna beras merah yang diukur melalui parameter *whiteness* dan *translucency* berkorelasi dengan kandungan antosianin, sehingga warna dapat dijadikan indikator tidak langsung kandungan pigmen. Dalam penelitian ini, stabilitas pigmen antosianin terhadap variasi konsentrasi ozon dikaji secara langsung melalui pengukuran kadar antosianin menggunakan metode spektrofotometri, alih-alih melalui pengukuran warna secara kolorimetri.

2.2.3 Karakteristik Kimia Gabah Beras Merah

Karakteristik kimia gabah beras merah mencakup komponen proksimat (kadar air, abu, protein, lemak, karbohidrat, serat kasar), komponen pati (amilosa dan amilopektin), serta komponen bioaktif (antosianin dan antioksidan). Jumali *et al.* (2020) dalam penelitian pengaruh cara pengeringan gabah terhadap mutu fisik, fisikokimia, dan organoleptik beras varietas unggul padi melaporkan bahwa perlakuan yang diberikan pada gabah secara nyata memengaruhi kadar air dan berbagai parameter fisikokimia beras yang dihasilkan. Hal ini mengindikasikan bahwa komponen kimia gabah, termasuk proksimat dan senyawa bioaktifnya, dapat merespons secara terukur terhadap perlakuan yang diaplikasikan, termasuk paparan agen oksidatif seperti ozon.

Fraksi pati merupakan komponen kimia terbesar gabah beras merah, menyusun sekitar 80-85% dari total bobot endosperm. Pati tersusun dari dua polimer karbohidrat yaitu amilosa (struktur tidak bercabang) dan amilopektin (struktur bercabang). Septianingrum *et al.* (2016) menegaskan bahwa rasio amilosa-amilopektin merupakan faktor dominan yang menentukan tekstur nasi dan nilai indeks glikemik beras; kandungan amilosa yang tinggi berkorelasi dengan IG lebih rendah karena memperlambat hidrolisis pati oleh enzim pencernaan. Gabah beras merah Inpari 24 memiliki kadar amilosa sekitar 18% yang tergolong rendah-sedang sehingga menghasilkan tekstur nasi yang pulen (Suprihatno *et al.*, 2010).

Kandungan antosianin merupakan komponen kimia khas yang membedakan gabah beras merah dari beras putih. Suliartini *et al.* (2011) melaporkan bahwa kandungan antosianin pada padi gogo beras merah bervariasi secara signifikan antar

aksesi tergantung faktor genetik dan lingkungan tumbuh. Anggraeni *et al.* (2018) dalam penetapan kadar antosianin total beras merah menyebutkan bahwa metode spektrofotometri perbedaan pH merupakan metode yang akurat dan tervalidasi untuk kuantifikasi antosianin beras merah. Antosianin bersifat tidak stabil dan rentan terhadap berbagai faktor yang dapat memicu degradasi, termasuk paparan agen oksidator kuat. Septianingrum, E., & Kusbiantoro (2017) menjelaskan bahwa kondisi lingkungan yang memicu reaksi oksidatif akan mempercepat degradasi komponen bioaktif termasuk antosianin pada gabah beras merah. Mengingat ozon merupakan agen oksidatif dengan potensial oksidasi yang sangat tinggi, paparan ozon pada berbagai konsentrasi berpotensi menginduksi perubahan kuantitatif maupun kualitatif pada kandungan antosianin gabah beras merah secara proporsional, menjadikan parameter ini salah satu respons kimia yang paling penting untuk dikaji dalam penelitian ini.

2.2.4 Standar Mutu Gabah Berdasarkan SNI 224:2023

Standar mutu gabah di Indonesia diatur dalam Standar Nasional Indonesia (SNI) yang ditetapkan oleh Badan Standardisasi Nasional (BSN). Standar yang berlaku saat ini adalah SNI 224:2023 tentang Gabah, yang merupakan revisi dari SNI 01-0224-1987. Revisi ini membawa perubahan mendasar pada sistem klasifikasi gabah, di mana SNI 224:2023 mengklasifikasikan gabah berdasarkan tiga dimensi: (1) proses budidaya (organik dan non organik); (2) status penanganan, yaitu Gabah Kering Panen (GKP) dan Gabah Kering Giling (GKG); serta (3) kelas mutu, yaitu Premium, Medium I, dan Medium II (Badan Standarisasi Nasional, 2023).

Gabah Kering Panen (GKP) adalah gabah yang baru dipanen dan belum melalui proses pengeringan lanjutan, dengan kadar air antara 14,01-25,00%. Sementara itu, Gabah Kering Giling (GKG) adalah gabah yang telah dikeringkan dan siap digiling menjadi beras, dengan kadar air maksimum 14,00% (Badan Standarisasi Nasional, 2023). Persyaratan mutu untuk masing-masing status penanganan gabah disajikan pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4. Persyaratan Mutu Gabah Kering Panen (GKP) Menurut SNI 224:2023

Parameter	Premium	Medium I	Medium II
Kadar air (% b.b.) maks.	14,0-25,0	14,0-25,0	25,01-30,0
Gabah hampa (%) maks.	1,0	2,0	3,0
Butir rusak (%) maks.	0,5	1,5	3,0
Benda asing (%) maks.	0,01	0,05	0,10

Sumber: BSN (2023) SNI 224:2023 tentang Gabah

Tabel 5. Persyaratan Mutu Gabah Kering Giling (GKG) Menurut SNI 224:2023

Parameter	Premium	Medium I	Medium II
Kadar air (% b.b.) maks.	14,0	14,0	15,0
Gabah hampa (%) maks.	1,0	2,0	3,0
Butir rusak (%) maks.	0,5	1,5	3,0
Benda asing (%) maks.	0,01	0,05	0,10

Sumber: BSN (2023) SNI 224:2023 tentang Gabah

Berdasarkan SNI 224:2023, gabah yang digunakan dalam penelitian ini diperlakukan sesuai standar Gabah Kering Giling (GKG) kelas Premium dengan kadar air maksimum 14,0% b.b. Parameter mutu yang diukur meliputi kadar air, gabah hampa, butir rusak, dan benda asing (Badan Standarisasi Nasional, 2023).

2.3 Ozon

Ozon (O_3) merupakan alotrop oksigen yang tersusun atas tiga atom oksigen dengan nama IUPAC trioksigen. Secara alamiah, ozon terdapat di lapisan stratosfer dan sebagian kecil dalam troposfer (Tjahjanto *et al.*, 2012). Syafarudin & Novia (2013) menyebutkan bahwa ozon merupakan oksidator kuat yang berbau tajam dan merupakan bentuk tidak stabil dari oksigen. Nama ozon berasal dari kata Yunani “ozein” yang berarti berbau, dan dapat terdeteksi indera penciuman pada

konsentrasi serendah 0,01 ppm (Tjahjanto *et al.*, 2012). Secara fisikokimia, ozon memiliki rumus molekul O_3 dengan massa molar $47,998 \text{ g.mol}^{-1}$, berpenampilan sebagai gas berwarna kebiruan, titik lebur $80,7 \text{ K}$ ($-192,5^\circ\text{C}$), titik didih $161,3 \text{ K}$ ($-111,9^\circ\text{C}$), densitas $2,144 \text{ g.L}^{-1}$ pada 0°C , dan kelarutan dalam air sebesar 0,105 g per 100 mL pada suhu 0°C (Syafarudin & Novia, 2013). Ozon bersifat kurang stabil dibandingkan oksigen karena keberadaan tiga atom oksigen dalam satu molekul yang berjejal serta adanya hamburan muatan elektronik dari masing-masing atom oksigen (Tjahjanto *et al.*, 2012).

Ozon dikenal sebagai oksidator sangat kuat dengan potensial oksidasi 2,07 V, menjadikannya oksidator terkuat kedua setelah fluor (Tjahjanto *et al.*, 2012). Dibandingkan dengan klorin sebagai desinfektan konvensional, ozon memiliki daya bunuh terhadap mikroorganisme yang jauh lebih cepat serta tenaga oksidatif yang lebih tinggi (Syafarudin & Novia, 2013). Ozon dapat digunakan untuk membunuh bakteri (sterilisasi), menghilangkan warna (dekolorisasi), menghilangkan bau (deodorisasi), dan menguraikan senyawa organik (degradasi) (Tjahjanto *et al.*, 2012). Selain itu, ozon setelah bereaksi akan selalu menghasilkan oksigen (O_2), sehingga teknologi ozon sangat ramah lingkungan dan tidak menghasilkan senyawa trihalomethan (THMs) yang bersifat karsinogen seperti desinfektan berbasis klorin (Syafarudin & Novia, 2013).

2.3.1 Pembentukan Ozon

Secara alami, ozon terbentuk di lapisan stratosfer melalui radiasi sinar ultraviolet matahari yang memiliki cukup energi untuk memecah molekul oksigen (O_2) menjadi atom-atom oksigen reaktif. Atom oksigen yang sangat reaktif tersebut kemudian bergabung dengan molekul O_2 lain di sekitarnya sehingga terbentuklah ozon (O_3). Pada lapisan stratosfer, ozon berfungsi sebagai penyaring dan pelindung terhadap radiasi UV matahari pada panjang gelombang 240–340 nm (Syafarudin & Novia, 2013).

Secara buatan, ozon dapat dihasilkan dari oksigen murni maupun udara kering melalui berbagai metode, seperti proses termal, kimia, fotokimia, elektrokimia, serta melalui mekanisme lucutan listrik (Prabha *et al.*, 2015). Pada

proses lucutan listrik, gas oksigen (O_2) dilewatkan pada daerah bertegangan tinggi sehingga molekul oksigen terpecah menjadi atom-atom oksigen reaktif yang berada dalam kondisi plasma. Atom-atom oksigen reaktif tersebut kemudian bergabung dengan molekul O_2 lain membentuk ozon (O_3). Untuk skala besar, produksi ozon menggunakan lucutan listrik merupakan cara yang paling banyak digunakan secara komersial (Tjahjanto *et al.*, 2012).

2.3.2 Ozon Generator dengan Metode Lucutan Plasma

Ozon generator adalah perangkat yang memproduksi ozon secara buatan melalui metode lucutan plasma (*plasma discharge*). Plasma merupakan gas terionisasi yang dikenal sebagai fase materi keempat, dan pada ozon generator untuk keperluan pangan umumnya digunakan plasma non-termal yang dapat beroperasi mendekati suhu ruang sehingga tidak merusak komponen bahan pangan yang sensitif terhadap panas (Tjahjanto *et al.*, 2012).



(Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2026)

Gambar 5. Generator Ozon (*Plasma Chamber*)

Prinsip dasar ozon generator metode lucutan plasma (*plasma discharge*) adalah konversi molekul oksigen (O_2) menjadi ozon (O_3) melalui peristiwa ionisasi gas akibat medan listrik tegangan tinggi. Secara teknis, udara kering atau oksigen

murni dialirkan ke dalam celah sempit (*discharge gap*) di antara dua elektroda yang dilapisi bahan dielektrik (umumnya kaca, keramik, atau alumina). Ketika arus listrik bolak-balik (*AC*) bertegangan tinggi (umumnya 5.000–20.000 V) dialirkan melalui elektroda, terbentuk lucutan plasma yang menyebabkan elektron-elektron bebas bertabrakan dengan molekul O_2 sehingga ikatan $O=O$ terputus dan menghasilkan atom oksigen reaktif ($O\bullet$). Atom oksigen reaktif tersebut kemudian bergabung dengan molekul O_2 yang tidak terdisosiasi di sekitarnya, membentuk ozon (O_3) menurut reaksi: $O\bullet + O_2 \rightarrow O_3$ (Tjahjanto *et al.*, 2012; Syafarudin & Novia, 2013)

Pada sistem *plasma chamber* yang digunakan dalam penelitian ini, konfigurasi yang diterapkan adalah *indirect plasma discharge*, di mana plasma dibangkitkan di dalam ruang elektroda yang terpisah dari ruang sampel. Ozon yang terbentuk di dalam ruang elektroda kemudian dialirkan melalui saluran tertutup ke ruang perlakuan (*treatment chamber*) tempat sampel gabah ditempatkan. Aliran ozon yang masuk ke ruang perlakuan terdistribusi secara merata ke seluruh permukaan massa gabah melalui efek difusi gas dalam ruang tertutup. Konsentrasi ozon yang dihasilkan dapat diatur dengan mengubah parameter operasional seperti tegangan listrik, frekuensi, laju alir gas masukan, dan suhu operasi; semakin tinggi tegangan dan semakin rendah laju alir oksigen, semakin tinggi konsentrasi ozon yang terbentuk (Syafarudin & Novia, 2013). Suhu operasi dijaga mendekati suhu ruang (non-termal) sehingga komponen bahan pangan yang sensitif terhadap panas seperti antosianin dan senyawa fenolik tidak mengalami degradasi termal selama proses ozonisasi berlangsung (Tjahjanto *et al.*, 2012).

Ozon yang dihasilkan merupakan gas yang bersifat tidak stabil dan harus digunakan segera setelah diproduksi. Waktu paruh ozon di udara sekitar 10–16 jam, dan di dalam air hanya sekitar 20 menit, sehingga sistem *plasma chamber* dirancang untuk menghasilkan ozon secara *on-site* dan langsung mengalirkannya ke ruang sampel tanpa penyimpanan (*storage*). Setelah reaksi oksidasi berlangsung, ozon yang tersisa terurai secara spontan menjadi oksigen (O_2), sehingga tidak meninggalkan residu kimia pada produk yang diperlakukan (Tjahjanto *et al.*, 2012; Syafarudin & Novia, 2013).

2.3.3 Keunggulan Metode *Plasma Chamber*

Pemilihan ozon generator berbasis *plasma chamber* (lucutan plasma tidak langsung/*indirect plasma discharge*) dalam penelitian ini didasarkan pada sejumlah pertimbangan ilmiah dan teknis yang relevan dengan karakteristik bahan yang digunakan, yaitu gabah beras merah dalam bentuk padatan kering.

Secara prinsip, teknologi ozonisasi dapat dilakukan melalui beberapa metode utama, antara lain: (1) ozonisasi fase gas menggunakan *corona discharge*/plasma (*dry ozonation*), (2) ozonisasi fase cair dengan pelarutan ozon ke dalam air (*ozonated water*), dan (3) ozonisasi *nanobubble*, yaitu pelarutan ozon ke dalam air dalam bentuk gelembung berukuran nano (< 200 nm) untuk meningkatkan stabilitas dan konsentrasi ozon terlarut (Epelle *et al.*, 2022). Masing-masing metode memiliki karakteristik aplikasi yang berbeda-beda.

Metode ozonisasi berbasis *nanobubble* memiliki keunggulan dalam hal peningkatan kelarutan ozon dalam air dan stabilitas gelembung yang lebih lama dibandingkan gelembung makro atau mikro (Epelle *et al.*, 2022). Namun demikian, metode ini lebih sesuai untuk aplikasi pada bahan pangan yang bersifat cair atau pada produk segar dengan kadar air tinggi (buah dan sayuran), karena memerlukan medium air sebagai penghantar ozon ke permukaan bahan. Penggunaan *nanobubble* pada gabah beras merah yang telah dikondisikan pada kadar air 14% (b.b.) sesuai standar GKG (SNI 224:2023) sangat tidak disarankan, karena penambahan air ke permukaan gabah akan mengubah kadar air bahan secara drastis, merusak kondisi awal yang telah distandarkan, dan berpotensi memicu pertumbuhan jamur serta kontaminasi mikotoksin selama dan setelah perlakuan (Prabha *et al.*, 2015).

Metode ozonisasi fase gas menggunakan *plasma chamber* (lucutan plasma/DBD (*Dielectric Barrier Discharge*)) justru paling sesuai untuk bahan pangan padat bersifat kering seperti gabah beras merah. Pada metode ini, ozon dalam fase gas dialirkan dan terdistribusi secara merata ke seluruh permukaan sampel di dalam ruang tertutup tanpa penambahan air sama sekali (*dry ozonation*), sehingga kadar air bahan tetap terjaga selama proses berlangsung (Prabha *et al.*, 2015). Ozon generator berbasis *corona discharge*/plasma juga merupakan metode produksi ozon yang paling banyak digunakan secara komersial di industri pangan

karena efisiensi energi yang tinggi, kemampuan menghasilkan konsentrasi ozon yang terukur dan terkontrol, serta tidak memerlukan bahan kimia tambahan (IFT, 2015). Selain itu, ozon yang dihasilkan langsung terurai menjadi oksigen (O_2) setelah bereaksi sehingga tidak meninggalkan residu pada produk (Syafarudin & Novia, 2013). Konfigurasi *plasma chamber* secara tidak langsung (*indirect discharge*) yang digunakan dalam penelitian ini secara khusus mampu mendistribusikan ozon secara merata ke seluruh massa gabah di ruang perlakuan tanpa kontak langsung antara elektroda dan sampel, sehingga meminimalkan risiko kerusakan fisik akibat panas lokal (Tjahjanto *et al.*, 2012; Prabha *et al.*, 2015).

Berdasarkan pertimbangan di atas, metode plasma chamber dipilih sebagai teknologi ozonisasi yang paling tepat dan aman untuk mengkaji pengaruh variasi konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisik dan kimia gabah beras merah, mengingat gabah merupakan bahan padat kering yang sensitif terhadap penambahan air dan memerlukan distribusi ozon yang merata dan terkontrol.

2.3.4 Mekanisme Oksidasi Ozon

Proses oksidasi oleh ozon dapat berlangsung melalui dua cara, yaitu reaksi langsung (*direct*) dan reaksi tidak langsung (*indirect*). Oksidasi ozon secara langsung terjadi ketika molekul ozon bereaksi langsung dengan senyawa target, bersifat selektif namun berlangsung relatif lambat karena ozon terutama menyerang ikatan rangkap atau daerah kaya elektron seperti pada gugus aromatik, olefin, dan amina. Dalam penelitian ini menggunakan mekanisme oksidasi secara tidak langsung (*indirect*) yang terjadi akibat ketidakstabilan molekul ozon, di mana atom oksigen ketiganya dapat berinteraksi dengan matriks bahan pangan dan terurai membentuk berbagai radikal bebas. Radikal-radikal yang terbentuk kemudian bereaksi dengan senyawa organik maupun anorganik yang terdapat dalam bahan. Ketika radikal tersebut bereaksi lebih lanjut dengan molekul ozon, hal itu dapat menghasilkan radikal hidroksil tambahan (Prabha *et al.*, 2015).

Konsentrasi ozon yang terlalu pekat atau waktu ozonisasi yang terlalu lama dapat merusak struktur permukaan bahan organik, sehingga penentuan konsentrasi dan durasi yang tepat merupakan faktor kritis dalam setiap aplikasi ozonisasi

(Prabha *et al.*, 2015). Oleh karena itu, variasi konsentrasi ozon merupakan parameter utama yang perlu dikaji dalam penelitian mengenai pengaruh ozonisasi terhadap karakteristik gabah beras merah.

2.3.5 Aplikasi Ozonisasi pada Bahan Pangan

Ozonisasi dipandang sebagai metode sanitasi yang ramah lingkungan karena tidak melibatkan penambahan bahan kimia sintetis, sehingga aman dari sudut pandang ekologi. Sebagai oksidator yang sangat kuat, ozon memiliki aktivitas antibakteri dan antivirus, sehingga penerapannya telah banyak digunakan dalam industri pangan. Teknologi ini dimanfaatkan untuk mengurangi residu pestisida pada produk segar dan biji-bijian, meningkatkan viabilitas serta daya berkecambah benih, memperbaiki sifat fungsional pangan, serta menonaktifkan mikroorganisme patogen dan bakteri penyebab pembusukan. Selain berinteraksi dengan komponen kimia bahan pangan, ozonisasi juga dilaporkan mampu menginaktivasi mikroorganisme patogen, mendegradasi mikotoksin, serta menonaktifkan jamur penghasil toksin, yang mengindikasikan bahwa ozon bekerja secara aktif terhadap berbagai komponen biologis maupun kimiawi dalam matriks bahan (Prabha *et al.*, 2015).

Pemanfaatan teknologi ozon dalam industri pangan telah berkembang sangat pesat sejak awal 1990-an. Berbagai sektor yang memanfaatkan ozon, antara lain: pengolahan air minum, akuakultur, disinfeksi untuk air minum dalam kemasan, sterilisasi bahan makanan mentah, pengawetan bahan makanan, serta pengendalian bau dan warna. Keunggulan utama ozon dibandingkan desinfektan konvensional seperti klorin adalah ozon tidak menimbulkan senyawa samping berbahaya, tidak meninggalkan residu pada produk pangan, dan setelah bereaksi ozon akan terurai menjadi oksigen (O_2) sehingga tidak membahayakan lingkungan (Syafarudin & Novia, 2013).

Ozonisasi pada bahan pangan padat seperti sereal dan biji-bijian dapat dilakukan secara kering (*dry ozonation*), di mana ozon dalam fase gas dialirkan langsung ke dalam massa bahan padatan tanpa penambahan air, sehingga cocok untuk gabah yang tidak boleh terkena air berlebih (Prabha *et al.*, 2015). Perubahan

karakteristik fisik dan kimia bahan pangan akibat perlakuan ozonisasi sangat dipengaruhi oleh konsentrasi ozon yang digunakan, waktu kontak, suhu perlakuan, dan kondisi kelembaban bahan. Oleh karena itu, penelitian mengenai pengaruh variasi konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisik dan kimia gabah beras merah (*Oryza sativa* L.) merupakan kajian yang penting untuk memahami bagaimana setiap komponen penyusun gabah mulai dari pigmen antosianin, fraksi pati, protein, hingga lipid merespons intensitas oksidasi yang berbeda-beda sesuai dengan konsentrasi ozon yang diaplikasikan.

Teknologi ozonisasi menggunakan *plasma chamber* (lucutan plasma/*corona discharge*) telah diterapkan secara luas pada berbagai komoditas pangan, baik padat maupun cair, dengan hasil yang bervariasi tergantung pada jenis bahan, konsentrasi ozon, dan durasi paparan. Pada komoditas sereal, Sivaranjani *et al.* (2021) merangkum berbagai penelitian yang menunjukkan bahwa ozonisasi efektif memodifikasi sifat fungsional sereal termasuk gandum, jagung, dan beras, terutama melalui perubahan pada komponen pati dan protein. Sumardiono *et al.* (2021) mengaplikasikan ozonisasi pada pati sagu dan melaporkan perubahan pada struktur kristalin yang terdeteksi melalui XRD, serta erosi morfologi permukaan granula yang terlihat melalui SEM, mengindikasikan bahwa ozon mampu menembus dan memodifikasi matriks pati padat secara struktural.

Pada biji-bijian kacang-kacangan, penelitian oleh Gomes *et al.* (2023) mengaplikasikan ozon fase gas pada kernel kacang tanah (*peanut kernels*) dan berhasil menurunkan kontaminasi jamur patogen secara signifikan tanpa menyebabkan perubahan mutu fisik biji yang berarti. Studi pada jagung (*corn*) oleh Luo *et al.* (2014) menunjukkan bahwa ozonisasi dengan metode fase gas mampu mendegradasi aflatoksin B1 hingga memenuhi standar keamanan pangan, sambil memberikan dampak minimal terhadap komposisi asam lemak biji. Almeida *et al.* (2025) melaporkan bahwa ozonisasi selama 90 menit pada pati beras japonica menggunakan kombinasi dengan α -amilase meningkatkan kristalinitas relatif pati sebesar 11,42% dan mengubah profil *paste properties* secara signifikan, yang terdeteksi melalui analisis RVA.

Pada produk hortikultura, ozon fase gas dari *plasma chamber* juga telah banyak digunakan untuk memperpanjang umur simpan buah dan sayuran segar. Teknologi plasma *Dielectric Barrier Discharge* (DBD) telah diterapkan pada berbagai produk seperti stroberi, tomat, selada, dan kacang hijau dengan kemampuan inaktivasi mikroba yang setara atau lebih baik dibandingkan sanitasi konvensional berbasis klorin, tanpa meninggalkan residu kimia (Epelle *et al.*, 2022). Penerapan ozon berbasis *plasma chamber* juga telah dilaporkan pada produk susu dan daging untuk pengendalian mikroorganisme patogen, mengindikasikan fleksibilitas dan adaptabilitas teknologi ini lintas komoditas pangan (Sivaranjani *et al.*, 2021). Berbagai kajian tersebut secara keseluruhan mengonfirmasi bahwa teknologi ozonisasi menggunakan *plasma chamber* merupakan pendekatan non-termal yang aplikatif, efisien, dan aman untuk pangan, sehingga penerapannya pada gabah beras merah dalam penelitian ini memiliki dasar ilmiah yang kuat.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menguraikan mengenai; (3.1) Bahan dan Alat, (3.2) Metode Penelitian, (3.3) Prosedur Penelitian, dan (3.4) Jadwal Penelitian.

3.1 Bahan dan Alat

3.1.1 Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah gabah beras merah (*Oryza sativa L.*) varietas Inpari 24 yang didapatkan dari Balai Besar Perakitan dan Modernisasi Pertanian (BRMP) Padi, Desa Sukamandi, Kecamatan Ciasem, Kabupaten Subang, Jawa Barat.

Bahan yang digunakan untuk analisis meliputi Aquadest, HCl pekat, NaOH 30%, Indikator fenolftalein, HCl 9,5 N, Reagen Luff Schoorl, H₂SO₄, KI, Na₂S₂O₃ 0,1 N, Indikator amilum 1%, N-Heksan, HCl 25%, Na₂SO₄, HgO, Selenium, H₂SO₄ pekat, Granula seng, Na₂S₂O₃ 5%, NaOH 0,1 N, H₂SO₄ 0,3 N, NaOH 1,5 N, air panas, aseton, etanol 95%, larutan Iod, asam asetat 0,5 N, Larutan buffer KCl pH 1,0, Larutan buffer natrium asetat pH 4,5, silikon (Si) sebagai bahan kalibrasi alat XRD.

3.1.2 Alat

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah generator ozon (*Plasma Chamber*), *tray*, dan kain saring.

Alat yang digunakan dalam analisis kimia adalah Neraca Analitik (OHAUS Pioneer PA214C), Cawan, Desikator (Schoot Duran), Tang krus (ROFA), Oven (Mettler UN110), Labu Erlenmeyer 500 mL (Pyrex), Gelas ukur 50 mL, 100 mL, 25 mL (Pyrex), Bunsen, Pipet volume 10 mL (Pyrex), Labu takar 500 mL (Iwaki), Buret 50 mL (Pyrex), Statif dan Klem, Refluks (Pyrex), Corong, Hot Plate (Daihan Scientific SMHS-3), Gelas Kimia 200mL (Iwaki), Batang Pengaduk (ROFA), Labu Kjeldahl (Pyrex), Batu Didih (Sipelco), Labu Erlenmeyer 100 mL, 250 mL, 300 mL (Pyrex), Kertas Saring (Whatman No. 42), 23 labu ukur 100 mL (Iwaki), alat Spektrofotometer (Shimadzu 4300 FT-IR), Spektrofotometer UV-Vis, kuvet, mikropipet (Dragon lab), Tabung reaksi (Iwaki) 20 mL, dan pH meter.

Alat yang digunakan dalam analisis fisik adalah X-Ray Diffractometer (Rigaku SmartLab), Scanning Electron Microscopy (SEM) merk Jeol MM 200, dan aw Meter (HD-3A).

3.2 Metode Penelitian

3.2.1 Penelitian Utama

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

4.1.1.1 Rancangan Perlakuan

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

Tabel 6. Rancangan Perlakuan

Perlakuan	Konsentrasi Ozon (ppm)
a1	0
a2	2
a3	4
a4	6
a5	8

4.1.1.2 Rancangan Percobaan

Rancangan percobaan yang digunakan pada penelitian ini adalah Rancangan Acak Kelompok (RAK) pola *factorial one way* sebagai berikut.

Tabel 7. Rancangan Percobaan Faktorial

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

Rancangan percobaan dilakukan dengan lima kali ulangan sehingga diperoleh sebanyak 15 perlakuan percobaan. Adapun variabel yang digunakan adalah konsentrasi ozon (a). Berdasarkan rancangan di atas, dapat dibuat denah (*layout*) percobaan *factorial one way* dengan 3 kali ulangan sebagai berikut.

Tabel 8. Kelompok Ulangan Rancangan Percobaan

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

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

4.1.1.3 Rancangan Analisis

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

Tabel 9. Analisis Variasi Konsentrasi Ozon terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Gabah Beras Merah

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 9, selanjutnya dapat ditentukan daerah penolakan hipotesis, yaitu:

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

4.1.1.4 Rancangan Respon

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

a. Respon Fisik

Respon fisik yang akan dianalisis pada gabah beras merah yaitu:

1) Kristalinitas dan Amorf menggunakan X-Ray Diffraction (XRD)

Analisis Kristalinitas dan Amorf dilakukan menggunakan X-Ray Diffractometer (Rigaku SmartLab) dengan sumber sinar-X Cu ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$). Analisis ini bertujuan mengkarakterisasi struktur kristalin pati tepung gabah beras merah sebelum dan setelah ozonisasi. Ozonisasi dapat mengubah rasio fase kristalin dan amorf, yang tercermin dari

perubahan pola difraksi pada sudut 2θ tertentu. Perubahan kristalinitas berkorelasi dengan sifat fungsional pati (kemampuan gelatinisasi, ketahanan enzim, kualitas pemasakan), dan dapat dikombinasikan dengan data FTIR melalui rasio absorbansi $1047/1022\text{ cm}^{-1}$ untuk menganalisis perubahan struktur jarak pendek (*short-range order*) akibat oksidasi ozon.

2) Morfologi Granula Pati menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM)

Analisis morfologi granula pati dilakukan menggunakan SEM JSM-6510LA dengan perbesaran 1000–5000x. Sampel dilapisi emas dalam kondisi vakum sebelum diamati. Analisis ini bertujuan mengamati morfologi permukaan dan struktur granula pati secara visual pada skala mikro, guna mendeteksi perubahan fisik akibat ozonisasi seperti erosi permukaan, retakan, pori-pori, atau aglomerasi granula. Data SEM mendukung dan mengonfirmasi perubahan struktur yang terdeteksi dari analisis XRD dan FTIR.

3) Profil Gelatinisasi menggunakan Rapid Visco Analyzer (RVA)

Analisis profil gelatinisasi dilakukan menggunakan Rapid Visco Analyzer (RVA). Parameter yang diperoleh meliputi *pasting temperature*, *peak viscosity*, *trough viscosity*, *breakdown viscosity*, *final viscosity*, dan *setback viscosity*. Analisis ini bertujuan mengkarakterisasi profil gelatinisasi pati dan mengevaluasi perubahan sifat viskoelastik akibat modifikasi oksidatif ozon. Penurunan *peak* dan *breakdown viscosity* mengindikasikan melemahnya struktur granula pati, sedangkan perubahan *setback viscosity* berkaitan dengan kemampuan retrogradasi yang memengaruhi tekstur produk akhir berbasis beras merah.

b. Respon Kimia

Respon kimia yang akan dianalisis pada gabah beras merah yaitu:

1) Kadar Air

Analisis kadar air dilakukan menggunakan metode gravimetri (AOAC, 2005) dengan pengeringan pada suhu 105°C hingga berat konstan. Analisis ini bertujuan mengevaluasi apakah ozonisasi menginduksi perubahan kadar air, mengingat kadar air secara langsung memengaruhi reaktivitas permukaan gabah terhadap ozon. Kadar air yang melebihi ambang batas (14% b.b., SNI 224:2023) memicu pertumbuhan jamur dan kontaminasi mikotoksin, sedangkan kadar air terlalu rendah menyebabkan gabah rapuh saat penggilingan.

2) Kadar Pati

Analisis kadar pati dilakukan menggunakan metode Luff Schoorl (AOAC, 1992) melalui hidrolisis HCl pekat dan titrasi $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,1 N. Analisis ini bertujuan mengukur kandungan pati total dan mengevaluasi dampak ozonisasi terhadap integritas struktur pati. Perubahan bermakna pada kadar pati mengindikasikan depolimerisasi rantai pati akibat oksidasi ozon, yang berdampak pada kemampuan pembentukan gel dan profil gelatinisasi. Data ini perlu diinterpretasikan bersama kadar amilosa, XRD, dan RVA.

3) *Water Activity* (a_w)

Analisis *water activity* (a_w) dilakukan menggunakan aw meter dengan prinsip higrometer elektronik, mengacu pada prosedur Afistia (2024). Analisis ini bertujuan mengevaluasi pengaruh ozonisasi terhadap ketersediaan air bebas pada gabah beras merah, yang berperan penting dalam menentukan stabilitas mikrobiologis dan laju reaksi kerusakan bahan pangan selama penyimpanan. Nilai a_w yang tinggi ($>0,70$) meningkatkan risiko pertumbuhan kapang dan aktivitas enzimatis yang dapat menurunkan mutu simpan gabah, sedangkan perubahan a_w akibat ozonisasi perlu diinterpretasikan bersama data kadar air untuk

memastikan konsistensi antara kandungan air total dan ketersediaannya secara biologis bagi mikroorganisme.

4) Kadar Antosianin

Analisis kadar antosianin dilakukan menggunakan metode pH-differential (Fatahillah Pasaribu *et al.*, 2021) berdasarkan perbedaan absorbansi pada buffer KCl pH 1,0 dan buffer natrium asetat pH 4,5, diukur pada λ vis-maks dan 700 nm menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Hasil dinyatakan sebagai ekuivalen sianidin-3-glukosida. Antosianin merupakan komponen bioaktif utama pemberi warna merah sekaligus sumber antioksidan alami beras merah. Ozon berpotensi mendegradasi antosianin melalui oksidasi gugus kromofor secara proporsional terhadap peningkatan konsentrasi ozon, sehingga parameter ini menjadi kunci dalam mengidentifikasi konsentrasi ozon yang optimal.

5) Gugus Fungsi menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Analisis gugus fungsi dilakukan menggunakan spektrofotometer Shimadzu 4300 FT-IR dengan teknik disk KBr pada kisaran bilangan gelombang 4200–400 cm^{-1} . Analisis ini bertujuan mengidentifikasi perubahan struktural akibat modifikasi oksidatif ozon, meliputi perubahan serapan ikatan O-H, C-H, C=O (karbonil), dan C-O-C yang mengindikasikan oksidasi pati; perubahan pita amida I ($\sim 1650 \text{ cm}^{-1}$) dan amida II ($\sim 1540 \text{ cm}^{-1}$) yang mencerminkan modifikasi protein; serta rasio absorbansi 1047/1022 cm^{-1} sebagai indikator kristalinitas jarak pendek. Kombinasi data FTIR dengan XRD, RVA, dan analisis proksimat memberikan pemahaman komprehensif mengenai mekanisme interaksi ozon dengan komponen kimia tepung gabah beras merah.

3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan secara eksperimental dengan tahapan meliputi persiapan bahan baku, proses ozonisasi gabah beras merah, pengecilan ukuran partikel, pengayakan, serta pengujian karakteristik fisik dan kimia. Diagram alir penelitian disajikan pada Gambar 6.

1) Persiapan Bahan Baku

Gabah beras merah Inpari 24 terlebih dahulu dilakukan sortasi dan pembersihan untuk memisahkan bahan dari kotoran serta gabah hampa. Proses ini bertujuan untuk memastikan bahwa bahan baku yang digunakan dalam penelitian berada dalam kondisi bersih dan seragam, sehingga tidak mengganggu hasil analisis pada tahap selanjutnya. Kotoran dan gabah hampa yang terpisah dibuang dan tidak digunakan dalam proses lebih lanjut.

2) Pengkondisian Kadar Air

Kadar air gabah dikondisikan hingga mencapai 14%. Pengkondisian ini bertujuan untuk menyeragamkan kadar air sebelum proses ozonisasi, sehingga penetrasi ozon ke dalam bahan dapat berlangsung secara optimal dan konsisten.

3) Proses Ozonisasi Gabah Beras Merah

Gabah beras merah yang telah bersih kemudian dikenai perlakuan ozonisasi sebagai variabel utama dalam penelitian ini. Ozonisasi dilakukan dengan variasi konsentrasi ozon sebesar 0, 2, 4, 6, dan 8 ppm dengan waktu paparan selama 30 menit untuk setiap perlakuan. Perlakuan konsentrasi 0 ppm berfungsi sebagai kontrol (tanpa ozonisasi). Pada setiap perlakuan, sebanyak 150 gram gabah beras merah ditempatkan secara merata pada tray ozonisasi untuk memastikan paparan ozon berlangsung homogen. Tujuan ozonisasi adalah untuk mengkaji pengaruh konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisik dan kimia tepung beras merah yang dihasilkan.

4) Pengupasan Sekam (*Dehulling*)

Gabah beras merah hasil ozonisasi kemudian dikupas menggunakan alat *huller* (*dehulling*) untuk memisahkan kulit gabah (sekam) dari biji beras merah. Sekam yang terpisah tidak digunakan lebih lanjut. Hasil dari tahap

ini adalah beras merah pecah kulit tanpa sekam yang siap untuk diproses lebih lanjut.

5) Preparasi Sampel melalui Pengecilan Ukuran dan Pengayakan

Beras merah pecah kulit kemudian dilakukan proses pengecilan ukuran menggunakan alat penggiling hingga diperoleh tepung. Tepung selanjutnya diayak menggunakan ayakan 80 mesh untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam.

Proses penggilingan ini dilakukan semata-mata sebagai tahap preparasi sampel untuk memperoleh bahan yang homogen sehingga memudahkan analisis lanjutan. Perlakuan utama penelitian tetap diberikan pada gabah beras merah.

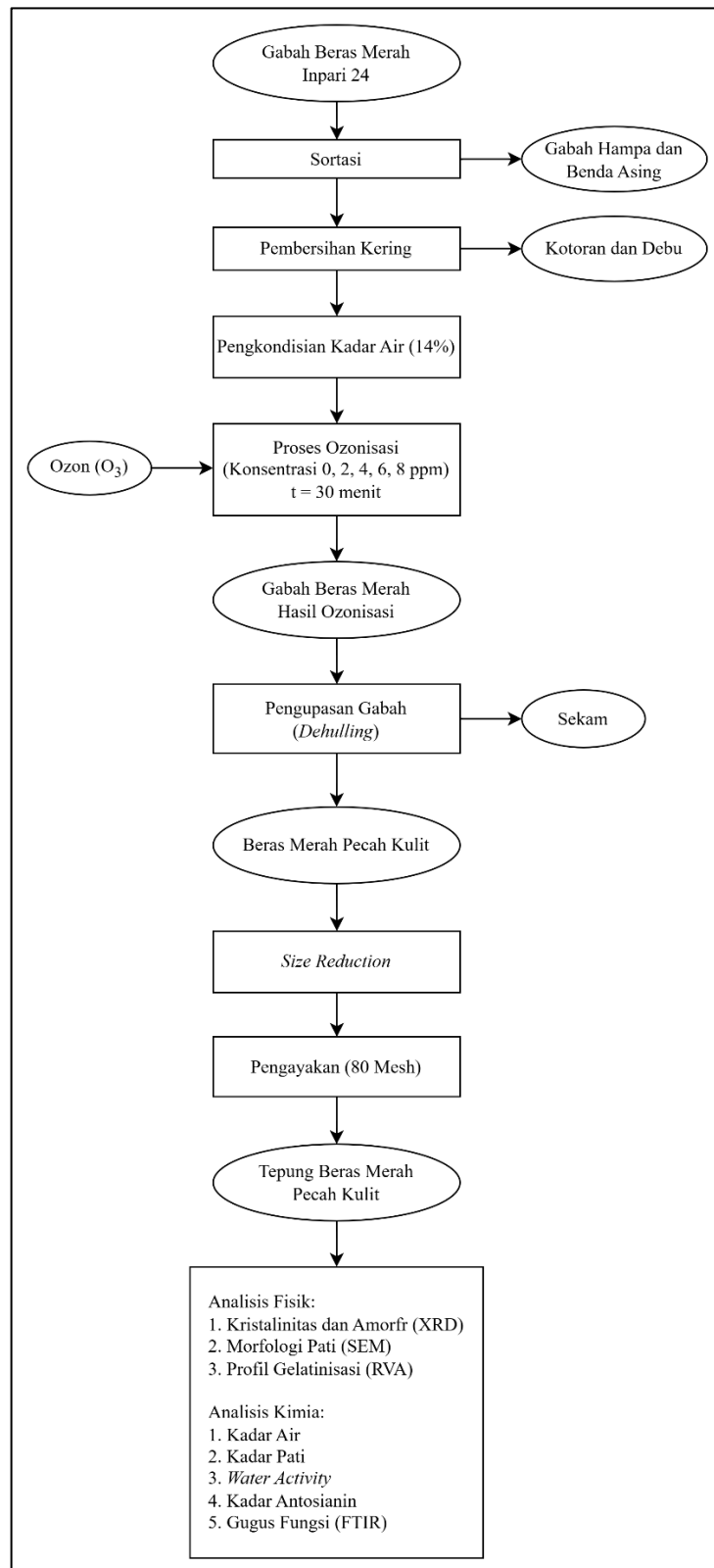
6) Analisis Fisik

Tepung hasil pengayakan digunakan untuk analisis kristalinitas dan amorf menggunakan X-Ray Diffraction (XRD), morfologi granula pati menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM), dan analisis profil gelatinisasi menggunakan Rapid Visco Analyzer (RVA)

7) Analisis Kimia

Analisis kimia dilakukan terhadap tepung beras merah pecah kulit hasil preparasi yang meliputi analisis kadar air, kadar pati, *water activity*, kadar antosianin, dan analisis gugus fungsi menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Seluruh pengujian dilakukan sesuai metode standar yang berlaku sebagaimana tercantum pada lampiran prosedur analisis.



Gambar 6. Diagram Alir Prosedur Penelitian Pengaruh Konsentrasi Ozon terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Gabah Beras Merah (*Oryza sativa* L.)

3.4 Jadwal Penelitian

Tabel 10. Jadwal Penelitian

Kegiatan	Februari 2026	Maret 2026	April 2026	Mei 2026	Juni 2026	Juli 2026
Bimbingan dan Penyusunan Proposal Usulan Penelitian						
Seminar Usulan Penelitian						
Pelaksanaan Penelitian						
Pengolahan Data						
Sidang Tugas Akhir						

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menguraikan mengenai: (4.1) Hasil Penelitian

4.1 Hasil Penelitian

Hasil penelitian ini menyajikan data karakteristik Gabah Beras Merah yang telah di ozonisasi dengan konsentrasi ozon 0 ppm, 2 ppm, 4 ppm, 6 ppm, dan 8 ppm yang dianalisis berdasarkan dua respon utama, yaitu respon kimia dan respon fisika. Respon fisik meliputi analisis kristalinitas dan amorf menggunakan X-Ray Diffraction (XRD), morfologi granula menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM), dan profil gelatinisasi dengan Rapid Visco Analyzer (RVA). Sementara itu, respon kimia meliputi pengujian kadar air, kadar pati, *water activity* (a_w), kadar antosianin, serta analisis gugus fungsi menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Data lengkap hasil pengamatan tersebut diuraikan sebagai berikut.

4.1.1 Respon Fisik

4.1.1.1 Kristalinitas dan Amorf (X-Ray Diffraction)

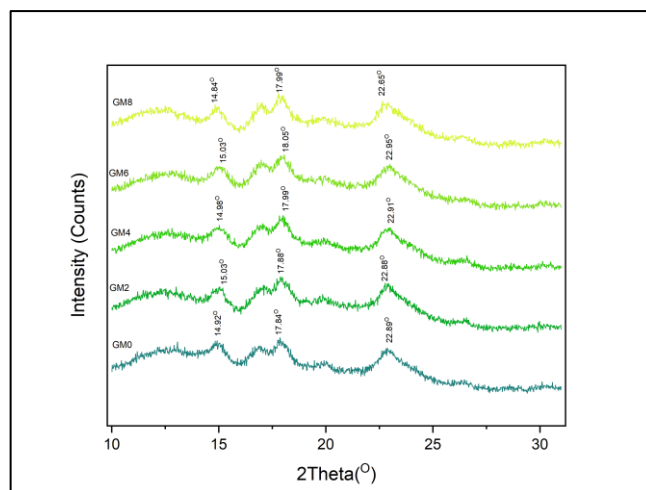
Analisis kristalinitas dan amorf pada gabah beras merah menggunakan X-Ray Diffraction (XRD) merupakan teknik karakterisasi berbasis difraksi sinar-X yang digunakan untuk menentukan struktur kristal dan kristalinitas relatif pati dalam tepung gabah beras merah. Pati sereal tersusun atas fase kristalin yang terdiri dari heliks ganda rantai amilopektin dalam lamela kristalin, dan fase amorf yang terdiri dari rantai amilosa bebas serta titik percabangan amilopektin yang tidak terorganisasi. Rasio kedua fase ini, dinyatakan sebagai kristalinitas relatif (%), merupakan parameter kunci yang menentukan sifat fungsional pati termasuk kemampuan gelatinisasi, ketahanan terhadap enzim pencernaan, dan profil viskositas (Sumardiono *et al.*, 2021; Du *et al.*, 2024). Pati beras umumnya menampilkan pola difraksi tipe-A yang dicirikan oleh puncak difraksi karakteristik pada sudut 2θ sekitar 15° , $17\text{--}18^\circ$, dan 23° pada panjang gelombang Cu-K α $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$, yang mencerminkan organisasi heliks ganda rantai amilopektin dalam sel satuan monoklinik yang khas untuk pati sereal.

Kristalinitas relatif pati berkorelasi dengan berbagai parameter mutu beras. Pati dengan kristalinitas tinggi umumnya lebih tahan terhadap gelatinisasi, memiliki *peak viscosity* yang lebih rendah, dan menunjukkan laju pencernaan enzimatis yang lebih lambat sehingga berimplikasi pada indeks glikemik yang lebih rendah (Du *et al.*, 2024). Almeida *et al.* (2025) melaporkan peningkatan kristalinitas relatif pati beras japonica setelah ozonisasi, sementara Sumardiono *et al.* (2021) menunjukkan pola difraksi XRD pati sagu yang diozonisasi tetap serupa dengan pati natif, mengindikasikan oksidasi terutama terjadi pada fase amorf. Ramos *et al.* (2024) pada pati quinoa melaporkan kristalinitas relatif cenderung menurun seiring bertambahnya durasi ozonisasi akibat depolimerisasi amilosa.

Hasil analisis XRD tepung gabah beras merah pada berbagai konsentrasi ozon disajikan pada Tabel 11, sedangkan pola difraksi seluruh perlakuan ditampilkan pada Gambar 7.

Tabel 11. Posisi Puncak Difraksi, Kristalinitas Relatif, dan Fraksi Amorf Gabah Beras Merah

Sampel	Puncak 2 θ (°) P1	Puncak 2 θ (°) P2	Puncak 2 θ (°) P3	Kristalinitas (%)	Amorf (%)
GM0 (0 ppm)	14,92	17,84	22,89	28,1	71,9
GM2 (2 ppm)	15,03	17,88	22,88	27,2	72,8
GM4 (4 ppm)	14,98	17,99	22,91	27,6	72,4
GM6 (6 ppm)	15,03	18,05	22,95	22,0	78,0
GM8 (8 ppm)	14,84	17,99	22,65	27,7	72,3



Gambar 7. Pola Difraksi Sinar-X (XRD) Gabah Beras Merah pada Berbagai Konsentrasi Ozon

Berdasarkan grafik difraksi pada Gambar 7, seluruh sampel (GM0 hingga GM8) memperlihatkan tiga puncak difraksi karakteristik pada kisaran $2\theta \approx 14,84$ – $15,03^\circ$ (Puncak 1), $17,84$ – $18,05^\circ$ (Puncak 2), dan $22,65$ – $22,95^\circ$ (Puncak 3), yang secara konsisten mengonfirmasi bahwa semua perlakuan mempertahankan pola polimorfik tipe-A yang khas untuk pati beras (*Oryza sativa* L.). Tidak ditemukannya puncak baru maupun perubahan menjadi tipe-B atau tipe-C menunjukkan bahwa ozonisasi pada konsentrasi 0–8 ppm tidak mengubah tipe polimorfik dasar pati gabah beras merah, meskipun terjadi perubahan pada intensitas dan posisi puncak yang mengindikasikan modifikasi pada tingkat struktur halus (*fine structure*) kristal.

Pengamatan terhadap posisi puncak difraksi secara berurutan mengungkap informasi penting mengenai perubahan jarak antar bidang kristal (*d-spacing*). Pada perlakuan kontrol (GM0), puncak-puncak difraksi teramati pada $14,92^\circ$, $17,84^\circ$, dan $22,89^\circ$, merepresentasikan kondisi pati alami tanpa modifikasi dan berada pada kisaran yang dilaporkan untuk pati beras tipe-A dalam literatur. Dari GM0 ke GM2, posisi Puncak 1 bergeser ke sudut sedikit lebih besar ($15,03^\circ$), sedangkan Puncak 2 bergeser kecil dari $17,84^\circ$ ke $17,88^\circ$ dan Puncak 3 relatif stabil ($22,89^\circ \rightarrow 22,88^\circ$). Pergeseran ke sudut yang lebih besar pada Puncak 1 mengindikasikan sedikit penyusutan *d-spacing* yang berkorelasi dengan oksidasi awal pada zona amorf; pengurangan rantai amorf yang lebih pendek dan acak memungkinkan penyusunan ulang heliks yang sedikit lebih kompak (Farizha *et al.*, 2021).

Dari GM2 ke GM4, Puncak 1 bergeser kembali ke $14,98^\circ$ (mendekati nilai kontrol), Puncak 2 bergeser ke $17,99^\circ$, dan Puncak 3 naik tipis ke $22,91^\circ$. Pergeseran Puncak 2 ke sudut lebih besar mengindikasikan modifikasi pada susunan heliks ganda amilopektin akibat oksidasi rantai; penambahan gugus karbonil dan karboksil pada unit glukosil mengubah geometri heliks secara lokal sehingga menghasilkan pergeseran posisi puncak. Dari GM4 ke GM6, terjadi perubahan paling signifikan dalam seri: Puncak 1 bertahan di $15,03^\circ$, sedangkan Puncak 2 bergeser lebih jauh ke $18,05^\circ$ (nilai tertinggi dalam seri) dan Puncak 3 bergeser ke $22,95^\circ$. Pergeseran progresif Puncak 2 ke arah sudut lebih besar dari $17,84^\circ$ (GM0) ke $18,05^\circ$ (GM6) mengindikasikan penyusutan *d-spacing* yang

progresif pada bidang kristal utama pati beras merah, yang dikaitkan dengan oksidasi intensif pada unit glukosil amilopektin yang mengubah parameter sel satuan kristal sehingga radikal hidroksil hasil dekomposisi ozon telah merambah ke zona kristalin dan mengganggu integritas heliks ganda secara substantif (Du *et al.*, 2024; Kaur *et al.*, 2023). Intensitas puncak yang lebih rendah dan lebih landai pada difraktogram GM6 dibandingkan perlakuan lainnya terlihat jelas secara visual pada Gambar 7.

Dari GM6 ke GM8, terjadi pergeseran yang paling menarik: Puncak 1 bergeser ke sudut yang lebih kecil ($14,84^\circ$), Puncak 2 kembali ke $17,99^\circ$ (dari $18,05^\circ$ pada GM6), dan Puncak 3 bergeser ke $22,65^\circ$ nilai terendah dalam seri untuk Puncak 3. Pergeseran ke sudut yang lebih kecil pada Puncak 1 dan Puncak 3 pada GM8 mengindikasikan peningkatan *d-spacing*, yang dapat dikaitkan dengan pembentukan struktur kristalin baru yang berbeda geometrinya dari kristal asli produk re-kristalisasi dari fragmen rantai pendek yang memiliki parameter sel satuan yang sedikit berbeda dari kristal pati alami. Intensitas puncak yang kembali meningkat pada difraktogram GM8 dibandingkan GM6 (Gambar 7) konsisten dengan fenomena re-kristalisasi parsial yang juga teramati sebagai granula sferikal halus pada analisis SEM.

Selain pergeseran posisi puncak, Tabel 11 juga menunjukkan perubahan komposisi kuantitatif antara fase kristalin dan fase amorf pati akibat ozonisasi. Pada kontrol (GM0), kristalinitas relatif tercatat sebesar 28,1% dengan fraksi amorf 71,9%, yang mencerminkan proporsi alami pati beras dengan dominasi fase amorf sebagaimana lazim dijumpai pada pati sereal tipe-A. Dari GM0 ke GM2, kristalinitas menurun menjadi 27,2% (fraksi amorf naik menjadi 72,8%), konsisten dengan oksidasi awal yang terkonsentrasi pada zona amorf yang lebih mudah diakses ozon dibandingkan zona kristalin yang lebih rapat. Dari GM2 ke GM4, kristalinitas justru naik tipis kembali ke 27,6% (amorf turun ke 72,4%), mencerminkan re-asosiasi parsial rantai pendek hasil depolimerisasi zona amorf yang sempat terjadi pada konsentrasi rendah.

Perubahan paling drastis teramati pada GM6, dengan kristalinitas turun tajam ke titik terendah dalam seri sebesar 22,0% dan fraksi amorf naik ke titik

tertinggi sebesar 78,0% selisih 6,0 persen-poin dari kontrol. Penurunan kristalinitas yang signifikan pada konsentrasi ini mengonfirmasi bahwa oksidasi ozon pada dosis 6 ppm telah merambah secara substantif ke zona kristalin dan tidak lagi terbatas pada zona amorf perifer, sehingga proporsi fase amorf meningkat signifikan akibat terganggunya susunan heliks ganda kristalin (Du *et al.*, 2024; Kaur *et al.*, 2023). Menariknya, pada GM8 kristalinitas kembali naik ke 27,7% (fraksi amorf turun ke 72,3%), mendekati nilai pada GM2 dan GM4, yang mengindikasikan bahwa pada dosis tertinggi terjadi reorganisasi parsial fragmen rantai pendek hasil depolimerisasi menjadi struktur kristalin baru, sejalan dengan pergeseran d-spacing yang dibahas pada RVA dan morfologi granula sferikal halus pada SEM.

Secara fungsional, rasio kristalinitas terhadap fraksi amorf berkaitan erat dengan sifat gelatinisasi dan daya cerna pati, karena fase kristalin bersifat lebih resisten terhadap penetrasi air dan enzim dibandingkan fase amorf (Du *et al.*, 2024). Titik kristalinitas terendah pada GM6 (22,0%; amorf 78,0%) konsisten dengan data RVA pada konsentrasi yang sama, yang juga menunjukkan nilai breakdown yang jauh lebih rendah dari kontrol dan setback tertinggi dalam seri, mengindikasikan bahwa granula pati pada konsentrasi ini telah mengalami perubahan struktural signifikan yang tercermin secara konvergen pada kedua teknik analisis. Peningkatan kembali kristalinitas pada GM8 turut memperkuat interpretasi reorganisasi struktural parsial pada dosis tertinggi yang telah dibahas secara komprehensif

Kristalinitas pati tidak menurun secara linear terhadap peningkatan konsentrasi ozon, melainkan membentuk pola yang tidak searah: menurun konsisten hingga titik terendah pada konsentrasi 6 ppm (22,0%), kemudian naik kembali pada 8 ppm (27,7%). Pola ini terjadi karena pada konsentrasi tinggi, ozon tidak lagi hanya menyerang bagian amorf pati yang mudah diakses, tetapi mulai merusak susunan heliks ganda pada bagian kristalin yang seharusnya lebih tahan. Namun, pada dosis tertinggi, fragmen-fragmen pati hasil kerusakan tersebut ternyata mampu tersusun ulang membentuk struktur kristal baru. Akibatnya, pati pada 6 ppm kehilangan sebagian besar ketahanan strukturalnya, sedangkan pada 8

ppm sifat fungsional pati sebagian pulih meskipun tidak kembali seperti kondisi awal.

Pola perubahan kristalinitas relatif pati akibat ozonisasi yang diperoleh pada penelitian ini berbeda dengan pola yang umum dilaporkan pada bahan pati serealisa sejenis dalam bentuk beras pecah kulit, yaitu beras yang telah kehilangan lapisan sekam namun masih memiliki lapisan perikarp dan aleuron. Pada beras pecah kulit, peningkatan konsentrasi ozon cenderung menghasilkan kenaikan kristalinitas secara progresif tanpa titik penurunan tajam di tengah rentang konsentrasi, berbeda dengan pola non-linear yang teramati pada gabah dalam penelitian ini, yaitu penurunan bertahap hingga titik terendah pada 6 ppm yang kemudian diikuti oleh kenaikan kembali pada 8 ppm.

Perbedaan pola tersebut diduga berkaitan erat dengan perbedaan struktur matriks kedua bentuk bahan. Gabah yang digunakan dalam penelitian ini masih memiliki lapisan sekam (lemma dan palea) yang kaya akan senyawa lignin, silika, dan lilin permukaan, yang berfungsi sebagai lapisan pelindung fisik pertama terhadap penetrasi ozon menuju granula pati di lapisan endosperma. Pada konsentrasi ozon rendah hingga menengah (0-4 ppm), sebagian besar ozon yang diaplikasikan diperkirakan lebih dahulu bereaksi dengan komponen non-pati pada lapisan sekam dan perikarp, sehingga hanya sebagian kecil yang mencapai granula pati; kondisi ini konsisten dengan perubahan kristalinitas yang relatif kecil pada rentang konsentrasi tersebut. Pada konsentrasi 6 ppm, kapasitas buffer lapisan sekam dan perikarp diduga telah terlampaui, sehingga ozon dalam jumlah lebih besar mampu menembus hingga ke zona kristalin granula pati dan mengganggu susunan heliks ganda secara signifikan, tercermin dari penurunan kristalinitas paling tajam dalam seri perlakuan. Pada konsentrasi 8 ppm, fragmen rantai pendek hasil depolimerisasi tersebut mengalami reorganisasi parsial membentuk struktur kristalin baru, sehingga kristalinitas kembali meningkat meski tidak pulih sepenuhnya ke kondisi kontrol.

Sebaliknya, pada beras pecah kulit yang telah kehilangan lapisan sekam pelindung, permukaan granula pati, yang hanya dilapisi oleh perikarp dan aleuron yang relatif tipis, lebih terekspos terhadap ozon sejak konsentrasi rendah, tanpa

melalui fase tertunda akibat lapisan sekam. Kondisi ini memungkinkan ozon untuk mendepolimerisasi daerah amorf granula pati secara lebih dini dan bertahap pada setiap peningkatan konsentrasi, sehingga fragmen rantai pendek yang terbentuk memiliki kesempatan lebih awal untuk bereorganisasi menjadi struktur kristalin baru. Hal ini menghasilkan pola kristalinitas yang cenderung meningkat secara progresif seiring peningkatan konsentrasi ozon, tanpa titik penurunan drastis di tengah rentang konsentrasi seperti yang teramati pada gabah.

Perbedaan pola respons ini menegaskan bahwa efektivitas dan mekanisme kerja ozon terhadap struktur kristalin pati sangat bergantung pada karakteristik matriks fisik bahan yang diberi perlakuan, khususnya keberadaan lapisan pelindung alami berupa sekam, sebagaimana ditegaskan oleh Brodowska *et al.* (2018) bahwa efektivitas ozon sangat bergantung pada karakteristik matriks bahan yang spesifik. Pada bahan yang masih memiliki lapisan sekam seperti gabah, respons kristalinitas terhadap ozon bersifat non-linear dengan titik kritis kerusakan struktural yang jelas pada konsentrasi menengah, sedangkan pada bahan yang telah kehilangan lapisan pelindung tersebut seperti beras pecah kulit, respons yang teramati cenderung lebih monoton dan progresif searah dengan peningkatan konsentrasi ozon.

4.1.1.2 Morfologi Granula Pati (Scanning Electron Microscopy)

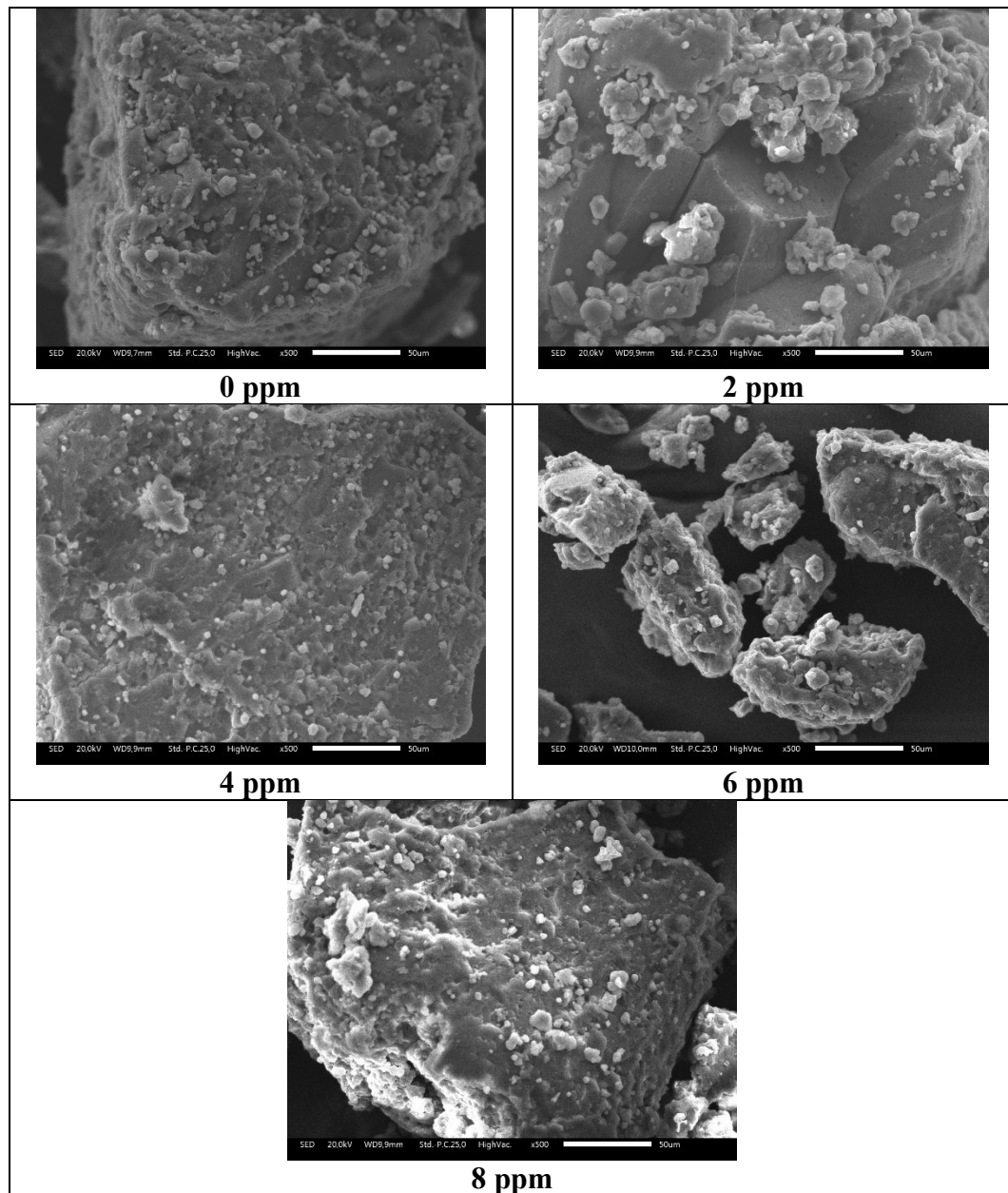
Analisis morfologi granula pati menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) merupakan teknik karakterisasi morfologis berbasis berkas elektron terfokus yang memungkinkan pengamatan visual detail struktur permukaan dan morfologi partikel tepung gabah beras merah pada skala mikrometer hingga sub-mikrometer. Dalam konteks analisis gabah beras merah yang diozonisasi, SEM digunakan untuk mendeteksi perubahan fisik pada permukaan partikel tepung, termasuk erosi permukaan, pembentukan pori-pori atau lekukan, retakan, aglomerasi, maupun re-organisasi granula pati yang mengindikasikan modifikasi struktural akibat oksidasi ozon (Sumardiono *et al.*, 2021; Almeida *et al.*, 2025). Data SEM berfungsi sebagai konfirmasi visual terhadap perubahan struktural yang terdeteksi secara kuantitatif melalui analisis XRD dan perubahan kandungan pati, sehingga ketiga parameter fisik ini saling

melengkapi dalam membangun narasi mekanistik yang komprehensif. Analisis SEM dalam penelitian ini dilakukan pada tepung gabah beras merah utuh, sehingga morfologi yang teramati mencerminkan interaksi kompleks antara komponen pati, protein, serat, dan lipid dari lapisan endosperma, aleuron, dan perikarp.

Perubahan morfologi yang terdeteksi melalui SEM berkorelasi dengan perubahan sifat fungsional yang relevan bagi mutu beras. Erosi permukaan meningkatkan luas permukaan efektif yang dapat diakses enzim pencernaan dan air, mempercepat gelatinisasi dan meningkatkan daya kembang. Pembentukan pori-pori meningkatkan aksesibilitas air ke dalam partikel, menurunkan suhu gelatinisasi, dan mengubah profil viskositas. Sumardiono *et al.* (2021) melaporkan erosi permukaan berupa retakan dan pori-pori pada pati sagu yang diozonisasi, dikonfirmasi melalui penurunan kristalinitas pada XRD. Almeida *et al.* (2025) melaporkan pembentukan aglomerat granula pati beras japonica setelah ozonisasi panjang, berkorelasi dengan peningkatan kristalinitas relatif.

Dalam pengujian SEM ini, alat yang digunakan yaitu Scanning Electron Microscope X-MaxN dengan ukuran *detector* sebesar 20 mm 2 merk Jeol MM 200 yang terdapat di Laboratorium Badan Riset dan Inovasi Nasional Cisit, Bandung.

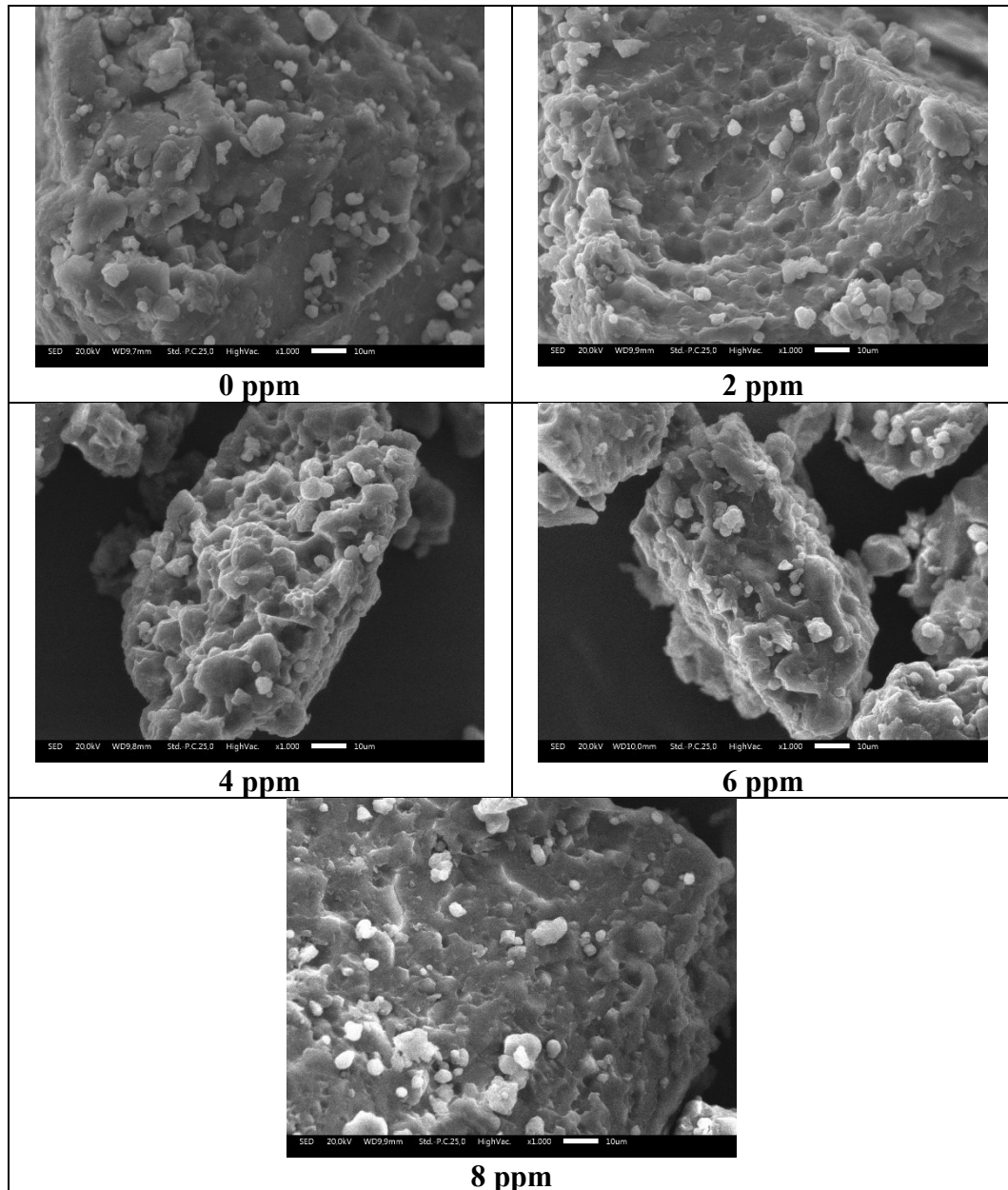
Tabel 12. Hasil Analisis SEM pada Gabah Beras Merah Hasil Ozonisasi Konsentrasi pada Perbesaran 500x



Pengamatan pada perbesaran 500× memperlihatkan perubahan morfologi permukaan gabah beras merah yang progresif seiring peningkatan konsentrasi ozon. Pada kontrol (0 ppm), permukaan fragmen jaringan tampak relatif kompak dan menyatu, dengan granula-granula kecil poligonal yang menempel pada matriks; tekstur kasar alami namun tanpa retakan besar atau fragmentasi signifikan mengindikasikan struktur jaringan yang masih utuh. Pada 2 ppm, permukaan

granula mulai terfragmentasi, dicirikan oleh massa blok besar dengan garis retakan (*fracture line*) yang jelas di bagian tengah permukaan, disertai partikel-partikel kecil yang beraglomerasi di beberapa titik permukaan blok utama pola yang berbeda dari kontrol dan mengindikasikan awal pelemahan matriks pengikat antar-granula. Pada 4 ppm, permukaan menjadi jauh lebih berpori dan homogen dibandingkan 2 ppm, dengan sangat banyak partikel-partikel kecil terang tersebar merata di seluruh bidang pandang serta retakan-retakan halus yang menjalar pada permukaan matriks utama, mengindikasikan fragmentasi yang lebih ekstensif dibandingkan konsentrasi sebelumnya. Perubahan paling mencolok teramati pada 6 ppm, di mana struktur tidak lagi berupa matriks menyatu melainkan terpecah menjadi beberapa fragmen diskret berbentuk memanjang/oval yang saling terpisah dengan rongga gelap di antaranya, masing-masing berukuran puluhan mikron — mengindikasikan tingkat fragmentasi struktural paling ekstensif dibandingkan seluruh taraf konsentrasi lainnya. Pada 8 ppm, morfologi berbalik arah dari 6 ppm: struktur tidak lagi berupa fragmen-fragmen terpisah, melainkan kembali membentuk massa yang lebih padat dan konsolidasi dengan tepi bersudut (*faceted*) yang cukup jelas, mengindikasikan terjadinya proses konsolidasi ulang dibandingkan tahap fragmentasi ekstensif pada 6 ppm.

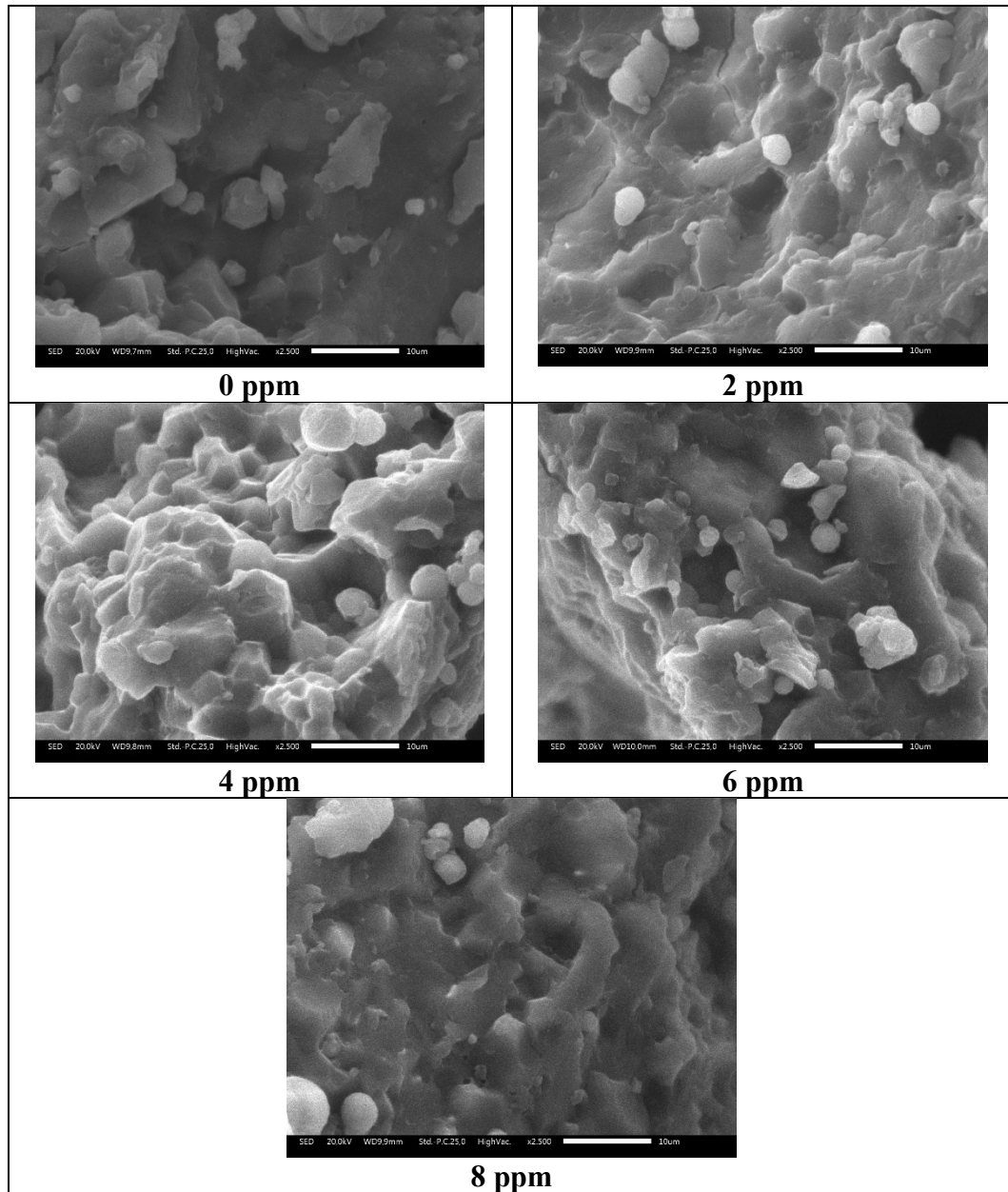
Tabel 13. Hasil Analisis SEM pada Gabah Beras Merah Hasil Ozonisasi Konsentrasi pada Perbesaran 1000x



Pada perbesaran 1000 $\times$, detail perubahan struktural tersebut tervisualisasikan lebih jelas. Pada kontrol, teramati kelompok granula poligonal kecil yang tertanam pada matriks, dengan satu celah halus pada tepi massa matriks utama yang kemungkinan merupakan artefak preparasi sampel atau porositas alami jaringan, bukan indikasi kerusakan oksidatif mengingat sampel ini adalah kontrol tanpa perlakuan ozon. Pada 2 ppm, tampak jelas rongga (*cavity*) besar menyerupai

cekungan dalam pada permukaan, dikelilingi dinding yang kasar dan berpori dengan beberapa partikel kecil terang tersebar di permukaannya, struktur cekungan semacam ini tidak teramati pada kontrol dan mengindikasikan mulai terjadinya pengikisan (*erosion*) pada zona tertentu granula akibat aktivitas oksidatif ozon. Pada 4 ppm, teramati fragmen partikel individual berbentuk memanjang dengan tekstur permukaan yang sangat berpori dan bergelombang menyerupai struktur coral, dipenuhi nodul-nodul kecil dan rongga di hampir seluruh permukaannya; morfologi ini berbeda signifikan dari blok padat yang teramati pada kontrol maupun 2 ppm, mengindikasikan disintegrasi matriks menjadi fragmen-fragmen diskret yang porous. Pada 6 ppm, salah satu fragmen tervisualisasikan lebih detail, memperlihatkan permukaan yang sangat berpori dan tidak rata dengan banyak lekukan dalam serta nodul-nodul kecil menempel tidak merata di permukaannya, tekstur ini menunjukkan tingkat erosi permukaan yang jauh lebih parah dibandingkan 4 ppm. Pada 8 ppm, permukaan justru menunjukkan tekstur granular dengan partikel-partikel kecil poligonal yang menempel padat pada permukaan matriks, membentuk lapisan yang relatif seragam dan lebih rapat dibandingkan tekstur kasar-terkikis pada 6 ppm.

Tabel 14. Hasil Analisis SEM pada Gabah Beras Merah Hasil Ozonisasi Konsentrasi pada Perbesaran 2500x



Pada perbesaran 2500×, granula-granula individual tervisualisasikan paling detail. Pada kontrol, granula menunjukkan morfologi poligonal dengan facet yang cukup jelas, tertanam dalam matriks protein/dinding sel di sekelilingnya, dengan permukaan granula tampak relatif halus tanpa pori atau erosi yang nyata; temuan ini sejalan dengan data XRD yang menunjukkan kristalinitas tertinggi (28,1%) dengan puncak difraksi pada posisi 14,92°, 17,84°, dan 22,89° (Subbab

4.1.1.1), serta data kadar pati tertinggi (65,211%) pada kontrol (Subbab 4.1.1.1). Pada 2 ppm, erosi permukaan tervisualisasikan lebih rinci, memperlihatkan tekstur granula yang jauh lebih kasar dan berpori dibandingkan kontrol, dengan sejumlah lubang/pit kecil tersebar tidak merata serta beberapa retakan halus; partikel-partikel kecil terang yang menempel kemungkinan merupakan fragmen granula yang terlepas akibat proses fragmentasi awal, sejalan dengan data XRD yang menunjukkan pergeseran Puncak 2 ke $17,99^\circ$ dan data kadar pati yang menurun menjadi 63,056% (Subbab 4.1.1.1; 4.1.2.2). Pada 4 ppm, tervisualisasikan kluster granula poligonal hingga sferikal yang saling berdekatan dan membentuk agregat kompak, dengan batas antar-granula yang masih dapat diidentifikasi meski dikelilingi rongga-rongga kecil; beberapa granula tampak menyatu (*coalesced*) satu sama lain membentuk unit yang lebih besar. Kecenderungan aglomerasi granula pada perbesaran tinggi ini konsisten dengan sedikit kenaikan kristalinitas kembali ke 27,6% pada Subbab 4.1.1.1 (dari 27,2% pada 2 ppm), yang mengindikasikan mulai terjadinya reorganisasi/reasosiasi parsial fragmen rantai pati meskipun proses fragmentasi permukaan tetap berlanjut. Pada 6 ppm, tampak jelas permukaan granula yang sangat terkikis dengan rongga-rongga dalam berukuran signifikan dan sedikit partikel kecil bersudut tajam tersisa di permukaan, mengonfirmasi bahwa pada konsentrasi ini integritas granula pati telah mengalami degradasi paling parah dalam seluruh rangkaian perlakuan.

Temuan ini sejalan dengan data XRD yang menunjukkan kristalinitas terendah dalam seri (22,0%; fraksi amorf tertinggi 78,0%) dengan pergeseran Puncak 2 paling jauh ke $18,05^\circ$ (Subbab 4.1.1.1), data kadar pati yang berada pada kelompok terendah secara statistik (62,336%; notasi DMRT "a") (Subbab 4.1.2.2), serta data RVA yang menunjukkan salah satu nilai breakdown terendah (14 cP) dan setback tertinggi (175 cP) dalam seri (Subbab 4.1.1.3), secara konvergen mengonfirmasi bahwa 6 ppm merupakan titik kerusakan struktural paling ekstensif pada gabah beras merah akibat ozonisasi. Pada 8 ppm, tervisualisasikan tekstur permukaan menyerupai sarang lebah (*honeycomb*) dengan rongga-rongga kecil yang tersusun lebih teratur dan rapat, berbeda dari rongga besar tidak beraturan yang mendominasi permukaan pada 6 ppm; pola pori yang lebih halus dan seragam

ini mengindikasikan pembentukan struktur baru hasil reorganisasi fragmen rantai pendek, bukan sekadar sisa kerusakan struktural. Temuan ini sejalan dengan data XRD yang menunjukkan kristalinitas kembali naik menjadi 27,7% (dari titik terendah 22,0% pada 6 ppm) dengan pergeseran *d-spacing* pada Puncak 1 dan Puncak 3 ke sudut yang lebih kecil (Subbab 4.1.1.1); morfologi pori yang lebih teratur ini turut memperkuat interpretasi reorganisasi struktural parsial (bukan pemulihan penuh) yang telah dibahas secara komprehensif pada Subbab 4.1.1.1 dan 4.1.1.3.

Berdasarkan pengamatan komparatif seluruh perlakuan yang dikorelasikan dengan data XRD dan kadar pati, mekanisme perubahan morfologi granula pati akibat ozonisasi pada gabah beras merah beroperasi melalui tiga fase berurutan. Fase erosi awal (0→2 ppm) ditandai oleh serangan ozon pada zona amorf aksesibel di permukaan partikel, menghasilkan pori-pori kecil dan tekstur lebih kasar, berkorelasi dengan penurunan kristalinitas ringan (28,1→27,2%) dan pergeseran puncak kecil. Fase modifikasi intensif (2→6 ppm) ditandai oleh penetrasi ozon yang semakin dalam menyebabkan fusi antar granula (4 ppm) kemudian fragmentasi besar-besaran (6 ppm) saat ozon merambah ke zona kristalin melalui radikal hidroksil, berkorelasi dengan penurunan kristalinitas dramatik (27,6→22,0%) dan pergeseran Puncak 2 terbesar (17,84→18,05°). Fase reorganisasi (6→8 ppm) ditandai oleh depolimerisasi berlebih menghasilkan fragmen rantai pendek yang berasosiasi ulang membentuk granula sferikal baru, berkorelasi dengan kenaikan kristalinitas (22,0→27,7%) dan pergeseran posisi puncak ke sudut lebih kecil yang mencerminkan parameter kristal baru.

Pola erosi morfologis yang teramati pada perlakuan 2–6 ppm konsisten dengan laporan Sumardiono *et al.* (2021) pada pati sagu yang diozonisasi. Fenomena re-aglomerasi dan kemunculan granula sferikal halus pada 8 ppm selaras dengan laporan Almeida *et al.* (2025) mengenai pembentukan aglomerat pada pati beras japonica yang diozonisasi dengan intensitas tinggi. Integrasi data SEM, XRD, dan kadar pati dalam penelitian ini secara keseluruhan mengungkap bahwa ozonisasi gabah beras merah menginduksi modifikasi struktural yang bersifat dosis-dependen dan beroperasi melalui tiga fase yang dapat diidentifikasi

secara konsisten dari tiga teknik analisis yang berbeda. Hal ini memperkuat nilai analitik pendekatan multi-teknik dalam karakterisasi efek ozonisasi pada komoditas gabah beras merah, dan sekaligus menegaskan pernyataan Brodowska *et al.* (2018) bahwa efektivitas ozon sangat bergantung pada karakteristik matriks bahan yang spesifik.

Hasil SEM mengonfirmasi secara visual apa yang ditunjukkan oleh XRD: kerusakan permukaan granula pati meningkat secara bertahap dari kontrol hingga 6 ppm, mulai dari retakan halus, munculnya pori-pori, hingga granula yang terfragmentasi menjadi bagian-bagian terpisah. Pada 8 ppm, permukaan yang semula rusak justru kembali padat dan tersusun rapi menyerupai pola sarang lebah. Artinya, semakin tinggi konsentrasi ozon yang digunakan, semakin besar pula kerusakan fisik granula pati yang terjadi, namun pada dosis tertinggi kerusakan tersebut justru memicu terbentuknya struktur baru, bukan pemulihan menuju kondisi semula.

4.1.1.3 Profil Gelatinisasi (Rapid Visco Analyzer)

Analisis profil gelatinisasi menggunakan Rapid Visco Analyzer (RVA) yang merupakan instrumen viskometer putar (*rotational viscometer*) yang mengukur perubahan viskositas suspensi pati secara dinamis selama siklus pemanasan, penahanan suhu, dan pendinginan terprogram disertai pengadukan (*shear*) konstan. Profil viskositas yang dihasilkan, dikenal sebagai kurva pasting, mencerminkan rangkaian peristiwa fisik yang dialami granula pati: penyerapan air dan pembengkakan granula (*swelling*) saat suhu meningkat, pecahnya granula akibat gaya geser dan panas pada suhu tinggi, serta reasosiasi rantai pati terlepas (khususnya amilosa) selama pendinginan (*retrogradasi*). Ketujuh parameter yang diukur dari kurva pasting RVA masing-masing merepresentasikan tahapan fisik yang berbeda dan bersifat saling melengkapi dalam menggambarkan perilaku fungsional pati secara menyeluruh.

Peak Viscosity (viskositas puncak) adalah nilai viskositas maksimum yang dicapai selama fase pemanasan, saat granula pati mencapai pembengkakan optimum sebelum pecah; parameter ini mencerminkan kapasitas granula menyerap

air dan berkorelasi dengan kandungan amilopektin serta integritas struktural granula. *Trough* atau *Hot Paste Viscosity* (viskositas pasta panas) adalah viskositas minimum yang dicapai setelah viskositas puncak, pada saat granula telah pecah sebagian akibat gaya geser dan panas berkelanjutan pada suhu penahanan; nilai ini mencerminkan ketahanan sisa granula yang belum sepenuhnya hancur. *Breakdown* (nilai pecah) adalah selisih antara viskositas puncak dan *trough*, yang secara kuantitatif menggambarkan derajat kerapuhan granula pati selama pemanasan dan pengadukan; *breakdown* tinggi mengindikasikan granula yang mudah pecah dan pasta yang kurang stabil terhadap panas dan gaya geser.

Final Viscosity (viskositas akhir) adalah viskositas yang terukur pada akhir fase pendinginan, mencerminkan kemampuan pasta pati membentuk struktur gel atau pasta kental melalui reasosiasi rantai pati terlepas, dan sering digunakan sebagai indikator kualitas tekstur produk pati setelah dimasak dan didinginkan. *Setback* (nilai kembali) adalah selisih antara viskositas akhir dan viskositas *trough*, yang mencerminkan derajat retrogradasi jangka pendek akibat reasosiasi rantai amilosa (dan sebagian amilopektin) yang membentuk struktur *double helix* baru selama pendinginan; *setback* tinggi berkaitan dengan tekstur nasi/pasta yang lebih keras dan kecenderungan staling yang lebih besar. *Peak Time* (waktu puncak) adalah waktu yang dibutuhkan untuk mencapai viskositas puncak sejak awal pemanasan, mencerminkan kecepatan relatif proses gelatinisasi dan pembengkakan granula. *Pasting Temperature* (suhu pasting) adalah suhu saat viskositas mulai meningkat secara terdeteksi di atas garis dasar, menandai titik awal gelatinisasi granula pati dan mencerminkan energi aktivasi minimum yang diperlukan untuk memecah ikatan hidrogen intragranula (Sharma *et al.*, 2021; Maqbool *et al.*, 2024).

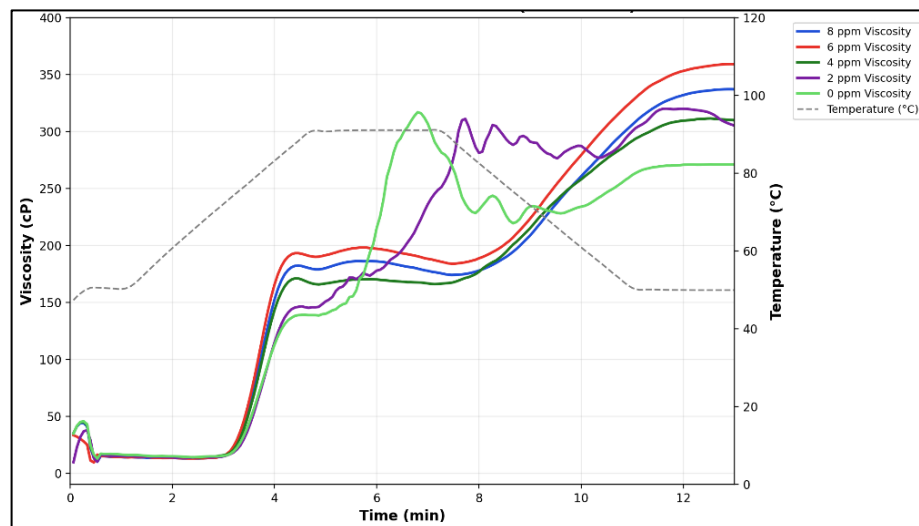
Profil *pasting* RVA merupakan penentu utama kualitas fungsional pati dalam aplikasi pangan, karena secara langsung berkaitan dengan tekstur, daya masak, dan stabilitas produk berbasis pati selama pengolahan maupun penyimpanan. Modifikasi oksidatif oleh ozon telah dilaporkan secara konsisten mengubah profil pasting berbagai jenis pati sereal dan umbi-umbian, namun arah perubahannya (peningkatan atau penurunan viskositas) sangat bergantung pada derajat oksidasi, pH lingkungan reaksi, dan matriks bahan yang diozonisasi.

Pranoto *et al.* (2021) melaporkan bahwa tapioka yang diozonisasi pada kondisi netral menghasilkan peningkatan viskositas dibandingkan pati nativenya, yang dikaitkan dengan pembentukan ikatan silang hemiasetal antar rantai pati terdepolimerisasi pada tingkat oksidasi ringan. Sebaliknya, Sharma *et al.* (2021) dalam ulasan komprehensifnya menegaskan bahwa modifikasi ozon pada tepung sereal umumnya menurunkan viskositas puncak dan meningkatkan nilai breakdown pada dosis oksidasi yang lebih intensif, karena depolimerisasi rantai pati mengurangi kapasitas granula mempertahankan struktur selama pemanasan. Subroto *et al.* (2022) pada pati hanjeli (adlay) yang diozonisasi melaporkan penurunan suhu gelatinisasi serta penurunan *breakdown* dan *setback*, mengindikasikan modifikasi struktural yang mengubah kestabilan granula selama pemanasan dan kecenderungan retrogradasinya. Almeida *et al.* (2025) mengonfirmasi bahwa ozonisasi pati beras japonica menghasilkan perubahan signifikan pada paste properties yang terdeteksi melalui RVA, berkorelasi dengan perubahan struktur molekuler pati.

Hasil analisis RVA tepung gabah beras merah pada berbagai konsentrasi ozon disajikan pada Tabel 17 berikut.

Tabel 15. Profil Gelatinisasi (RVA) Gabah Beras Merah pada Berbagai Konsentrasi Ozon

Konsentrasi Ozon (a)	Peak Visc. (cP)	Trough (cP)	Breakdown (cP)	Final Visc. (cP)	Setback (cP)	Peak Time (menit)	Pasting Temp. (°C)
0 ppm (a1)	317 ^e	216 ^e	101 ^d	271 ^a	55 ^a	6,80 ^d	72,00 ^b
2 ppm (a2)	237 ^d	177 ^c	60 ^c	306 ^b	129 ^b	7,00 ^e	72,75 ^c
4 ppm (a3)	171 ^a	165 ^a	6 ^a	310 ^c	145 ^c	4,40 ^a	72,00 ^b
6 ppm (a4)	198 ^c	184 ^d	14 ^b	359 ^d	175 ^e	5,60 ^c	71,35 ^a
8 ppm (a5)	186 ^b	174 ^b	12 ^b	337 ^c	163 ^d	5,47 ^b	71,35 ^a



Gambar 8. Grafik Profil Gelatinisasi (RVA) Gabah Beras Merah pada Berbagai Konsentrasi Ozon

Peak Viscosity. Nilai viskositas puncak menunjukkan pola non-monoton dengan tren umum menurun dari kontrol yang diselingi pemulihan parsial pada konsentrasi tinggi. Dari 0 ppm ke 2 ppm, viskositas puncak turun tajam dari 317 cP menjadi 237 cP (penurunan 25,2%), konsisten dengan degradasi oksidatif awal granula pati yang mengurangi kapasitas pembengkakan, sebagaimana juga tercermin dari penurunan kadar pati dan perubahan morfologi granula pada SEM 2 ppm (Subbab 4.1.1.2). Dari 2 ppm ke 4 ppm, penurunan berlanjut ke titik terendah dalam seri (171 cP), sejalan dengan morfologi SEM 4 ppm yang menunjukkan hilangnya bentuk poligonal granula individual dan fusi antar granula, yang mengindikasikan kerusakan struktural granula paling ekstensif pada konsentrasi ini sehingga kapasitas menyerap air dan membengkak menurun signifikan. Dari 4 ppm ke 6 ppm, viskositas puncak justru naik kembali menjadi 198 cP; kenaikan ini konsisten dengan mekanisme ikatan silang hemiasetal antar rantai pati terdepolymerisasi yang dilaporkan pada pati tapioka terozonisasi (Pranoto *et al.*, 2021), di mana fragmen rantai pendek hasil depolymerisasi intensif pada 6 ppm (didukung oleh penurunan kristalinitas paling drastis pada XRD, Subbab 4.1.1.1) dapat membentuk ikatan silang baru yang menstabilkan granula tersisa selama pembengkakan. Dari 6 ppm ke 8 ppm, viskositas puncak turun tipis menjadi 186

cP, mengindikasikan keseimbangan antara efek stabilisasi ikatan silang dan degradasi lanjutan pada konsentrasi tertinggi.

Trough (Hot Paste Viscosity). Pola *trough* secara umum mengikuti tren *peak viscosity* dengan magnitudo perubahan yang lebih kecil: menurun dari 216 cP (0 ppm) ke 177 cP (2 ppm) dan 165 cP (4 ppm), kemudian naik kembali ke 184 cP (6 ppm) sebelum turun tipis ke 174 cP (8 ppm). Konsistensi pola *trough* dengan *peak viscosity* mengindikasikan bahwa perubahan pada kedua parameter ini didorong oleh mekanisme struktural yang sama, yaitu keseimbangan antara depolimerisasi (menurunkan viskositas) dan pembentukan ikatan silang pada konsentrasi tinggi (menaikkan kembali viskositas).

Breakdown. Nilai *breakdown* menunjukkan penurunan yang sangat tajam dan konsisten dari kontrol menuju konsentrasi ozon manapun, dari 101 cP (0 ppm) menjadi hanya 60 cP (2 ppm), 6 cP (4 ppm; nilai terendah dalam seri), 14 cP (6 ppm), dan 12 cP (8 ppm). Penurunan *breakdown* yang drastis dan konsisten di seluruh taraf perlakuan ozon mengindikasikan peningkatan stabilitas pasta terhadap panas dan gaya geser dibandingkan pati native, sejalan dengan temuan Subroto *et al.* (2022) pada pati hanjeli terozonisasi yang juga melaporkan penurunan *breakdown*. Nilai *breakdown* yang sangat rendah pada 4 ppm (6 cP) konsisten dengan *peak viscosity* terendah pada konsentrasi yang sama; granula yang telah mengalami kerusakan struktural signifikan pada tahap awal pemanasan tidak lagi memiliki banyak struktur tersisa untuk “pecah” lebih lanjut selama fase penahanan suhu tinggi, sehingga selisih antara *peak* dan *trough* menjadi kecil.

Final Viscosity. Berbeda dengan *peak viscosity* dan *trough*, *final viscosity* menunjukkan tren umum yang meningkat seiring konsentrasi ozon: dari 271 cP (0 ppm) naik menjadi 306 cP (2 ppm), 310 cP (4 ppm), mencapai puncak 359 cP (6 ppm), kemudian turun sedikit ke 337 cP (8 ppm), namun tetap jauh lebih tinggi dari kontrol. Peningkatan *final viscosity* yang konsisten pada seluruh taraf ozon dibandingkan kontrol mengindikasikan bahwa fragmen-fragmen rantai pendek hasil depolimerisasi ozon, meskipun mengurangi viskositas selama fase pemanasan (*peak* dan *trough*), justru memiliki kapasitas reasosiasi yang lebih besar selama fase pendinginan, membentuk jaringan pasta yang lebih kental pada suhu akhir.

Fenomena analog dilaporkan oleh Sandhu *et al.* (dalam Sharma *et al.*, 2021) pada tepung gandum terozonisasi yang menunjukkan peningkatan viskositas akhir.

Setback. Nilai *setback*, yang mencerminkan derajat retrogradasi jangka pendek, menunjukkan pola peningkatan yang sangat konsisten dan merupakan parameter dengan perubahan relatif paling besar dalam penelitian ini: dari 55 cP (0 ppm) meningkat tajam menjadi 129 cP (2 ppm; naik lebih dari dua kali lipat), 145 cP (4 ppm), mencapai puncak 175 cP (6 ppm), kemudian turun sedikit ke 163 cP (8 ppm). Peningkatan *setback* yang besar dan konsisten pada seluruh taraf ozon dibandingkan kontrol memberikan bukti kuat bahwa depolimerisasi rantai pati oleh ozon menghasilkan proporsi rantai pendek (terutama fragmen menyerupai amilosa hasil pemutusan ikatan α -1,4-glikosidik, sebagaimana telah dibahas pada Subbab 4.1.2.2 dan 4.1.2.5) yang secara termodinamika lebih mudah dan lebih cepat berasosiasi ulang membentuk struktur *double helix* selama pendinginan dibandingkan rantai amilopektin bercabang panjang pada pati native. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun ozonisasi menurunkan kadar pati total, produk pati terdepolimerisasi yang tersisa memiliki kecenderungan retrogradasi yang lebih tinggi.

Peak Time. Waktu puncak menunjukkan pola non-monoton: dari 6,80 menit (0 ppm) sedikit meningkat menjadi 7,00 menit (2 ppm), kemudian turun tajam menjadi 4,40 menit (4 ppm; waktu tercepat dalam seri), naik kembali menjadi 5,60 menit (6 ppm), dan sedikit menurun menjadi 5,47 menit (8 ppm). Waktu puncak tercepat pada 4 ppm konsisten dengan tingkat kerusakan granula paling ekstensif pada konsentrasi ini (sebagaimana ditunjukkan oleh peak viscosity dan breakdown terendah); granula yang telah melemah strukturnya mencapai titik pembengkakan maksimum dalam waktu lebih singkat sebelum pecah. Perlambatan kembali waktu puncak pada 6–8 ppm sejalan dengan hipotesis pembentukan ikatan silang parsial yang menstabilkan granula dan memerlukan waktu pemanasan lebih lama untuk mencapai pembengkakan maksimum.

Pasting Temperature. Berbeda dengan keenam parameter RVA lainnya yang menunjukkan perubahan besar akibat perlakuan ozon, suhu *pasting* relatif seragam di seluruh taraf konsentrasi, dengan rentang kurang dari 1,5°C dan tanpa pola

peningkatan maupun penurunan yang konsisten terhadap dosis ozon. Keseragaman ini mengindikasikan bahwa modifikasi oksidatif oleh ozon pada penelitian ini tidak memengaruhi secara signifikan suhu minimum yang diperlukan untuk memulai penyerapan air dan pembengkakan awal granula pati, sejalan dengan tidak adanya pengaruh signifikan ozon terhadap kadar air dan *water activity* gabah pada penelitian ini. Temuan ini mengindikasikan bahwa mekanisme dominan modifikasi ozon beroperasi setelah tahap inisiasi gelatinisasi, yaitu pada tahap pembengkakan lanjut, pecahnya granula, dan reasosiasi rantai pati selama pendinginan, bukan pada energi aktivasi awal pemutusan ikatan hidrogen intragranula. Hal ini berbeda dengan temuan Subroto *et al.* (2022) pada pati hanjeli terozonisasi yang melaporkan penurunan suhu gelatinisasi akibat ozonisasi; perbedaan ini kemungkinan besar disebabkan oleh perbedaan matriks bahan (tepung gabah utuh dengan komponen non-pati protektif vs. pati terisolasi murni), sebagaimana juga didiskusikan pada parameter-parameter RVA lainnya.

Secara keseluruhan, profil RVA gabah beras merah yang diozonisasi dapat dipahami melalui interaksi dua mekanisme struktural yang beroperasi secara simultan namun dengan pengaruh dominan yang berbeda pada tiap parameter. Mekanisme pertama adalah depolimerisasi oksidatif, yaitu pemutusan ikatan α -1,4- dan α -1,6-glikosidik oleh radikal hidroksil hasil dekomposisi ozon (dikonfirmasi oleh penurunan kadar pati pada Subbab 4.1.2.2 dan pergeseran pita C-O-C pada FTIR Subbab 4.1.2.5), yang menurunkan kapasitas granula membengkak dan mempertahankan struktur pada suhu tinggi, tercermin dari penurunan *peak viscosity*, *trough*, dan *breakdown* dibandingkan kontrol. Mekanisme kedua adalah pembentukan ikatan silang hemiasetal antar fragmen rantai pendek hasil depolimerisasi, sebagaimana dilaporkan pada berbagai pati terozonisasi lain (Pranoto *et al.*, 2021), yang menstabilkan granula tersisa dan menjelaskan pemulihan parsial *peak viscosity* pada 6–8 ppm setelah titik terendah di 4 ppm. Kedua mekanisme ini konsisten dengan model tiga fase yang telah diusulkan pada Subbab 4.1.1.2 berdasarkan data SEM (fase erosi awal, fase modifikasi intensif, dan fase reorganisasi), dengan fase reorganisasi pada 6–8 ppm yang secara mekanistik

identik dengan pembentukan ikatan silang yang menjelaskan pemulihan *peak viscosity* pada RVA.

Peningkatan *final viscosity* dan *setback* yang konsisten pada seluruh taraf ozon dibandingkan kontrol, berbeda dari pola non-monoton pada *peak viscosity* dan *trough*, menunjukkan bahwa efek depolimerisasi terhadap kapasitas retrogradasi bersifat kumulatif dan tidak sepenuhnya reversibel oleh mekanisme ikatan silang. Fragmen rantai pendek yang terbentuk melalui pemutusan ikatan glikosidik memiliki mobilitas molekuler lebih tinggi dan energi aktivasi lebih rendah untuk membentuk kembali struktur *double helix* selama pendinginan dibandingkan rantai asli yang lebih panjang, sehingga proporsi fragmen pendek yang lebih tinggi pada dosis ozon lebih besar berkorelasi dengan *setback* yang lebih tinggi pula, kecuali pada transisi 6→8 ppm di mana sedikit penurunan mengindikasikan bahwa pada dosis tertinggi sebagian fragmen telah teroksidasi lebih lanjut menjadi gugus karboksil yang kurang mampu membentuk ikatan hidrogen antar rantai secara efisien (Kaur *et al.*, 2023).

Penurunan *peak viscosity* dan *breakdown* pada penelitian ini secara umum sejalan dengan Sharma *et al.* (2021) yang menyimpulkan bahwa modifikasi ozon pada tepung sereal cenderung menurunkan viskositas puncak akibat depolimerisasi rantai pati, serta dengan Subroto *et al.* (2022) pada pati hanjeli terozonisasi yang melaporkan penurunan *breakdown* dan perubahan suhu gelatinisasi. Namun demikian, pemulihan parsial *peak viscosity* pada konsentrasi 6–8 ppm dalam penelitian ini kontras dengan tren penurunan monoton yang lazim dilaporkan, dan justru lebih sejalan dengan temuan Pranoto *et al.* (2021) pada tapioka terozonisasi yang melaporkan viskositas lebih tinggi dibandingkan pati native akibat ikatan silang hemiasetal pada tingkat oksidasi tertentu. Perbedaan pola respons antar penelitian ini kemungkinan besar disebabkan oleh perbedaan matriks bahan (tepung gabah beras merah utuh dengan komponen non-pati vs. pati terisolasi murni), medium ozonisasi (gas ozon langsung vs. ozonisasi dalam larutan berair), dan rentang konsentrasi/dosis yang diaplikasikan, sebagaimana ditegaskan dalam ulasan komprehensif Maqbool *et al.* (2024) bahwa respons pasting terhadap ozonisasi sangat bergantung pada kondisi spesifik perlakuan dan karakteristik pati

yang dimodifikasi. Peningkatan *final viscosity* dan *setback* yang konsisten pada seluruh taraf perlakuan sejalan dengan prinsip umum yang ditegaskan Almeida *et al.* (2025) bahwa perubahan struktur molekuler pati akibat ozonisasi berkorelasi langsung dengan perubahan paste properties yang terukur melalui RVA.

Secara keseluruhan, integrasi data RVA dengan hasil kadar pati (Subbab 4.1.2.2), XRD (Subbab 4.1.1.1), SEM (Subbab 4.1.1.2), dan FTIR (Subbab 4.1.2.5) membangun narasi mekanistik yang koheren mengenai pengaruh ozonisasi terhadap gabah beras merah: pada konsentrasi rendah-sedang (2–4 ppm), ozon mendominasi melalui depolimerisasi oksidatif yang melemahkan struktur granula, menurunkan kadar pati dan viskositas *pasting*; pada konsentrasi tinggi (6–8 ppm), efek depolimerisasi yang telah melampaui kapasitas buffer komponen perikarp mulai diimbangi oleh pembentukan ikatan silang dan reorganisasi struktural parsial, tercermin secara konvergen pada pemulihan sebagian *peak viscosity* RVA, kenaikan kristalinitas XRD, morfologi re-aglomerasi pada SEM, dan pergeseran posisi puncak FTIR yang kembali mendekati nilai kontrol. Konvergensi bukti dari kelima teknik analisis yang berbeda ini (kadar pati, XRD, SEM, FTIR, dan RVA) memberikan dasar ilmiah yang kuat dan saling menguatkan untuk karakterisasi menyeluruh pengaruh konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisik dan kimia gabah beras merah varietas Inpari 24.

Data RVA menunjukkan dua parameter yang tampaknya serupa justru bergerak ke arah berlawanan. Viskositas puncak dan *breakdown* menurun tajam pada seluruh taraf ozon, menunjukkan bahwa pati menjadi kurang tahan panas dan lebih mudah pecah saat dimasak. Sebaliknya, viskositas akhir dan *setback* justru meningkat konsisten pada seluruh taraf ozon dibanding kontrol, menunjukkan bahwa pati yang sudah pecah tersebut justru lebih mudah mengeras kembali saat suhu diturunkan. Hal ini terjadi karena ozon memecah rantai pati menjadi fragmen-fragmen pendek yang lemah saat dipanaskan, namun fragmen pendek tersebut secara termodinamika lebih mudah menyusun ulang ikatan hidrogen antar rantai saat pendinginan. Konsekuensi praktisnya, produk berbasis gabah beras merah yang telah diozonisasi berpotensi menghasilkan tekstur nasi atau pasta yang lebih keras

dan lebih cepat mengeras (*staling*) dibandingkan produk dari gabah tanpa perlakuan.

4.1.2 Respon Kimia

4.1.2.1 Kadar Air (%)

Kadar air merupakan parameter mutu fisikokimia gabah yang paling mendasar sekaligus kritis, karena menentukan stabilitas penyimpanan, laju reaksi enzimatik dan non-enzimatik, pertumbuhan mikroorganisme, serta mutu penggilingan beras. Kadar air gabah berperan sebagai faktor penentu utama dalam mengontrol aktivitas metabolik sisa jaringan gabah yang masih biologis aktif, termasuk aktivitas amilase, lipase, dan peroksidase yang dapat menurunkan mutu pati dan komponen bioaktif. Pada gabah beras merah, lapisan perikarp dan aleuron yang masih utuh memiliki kapasitas penyerapan air yang lebih tinggi dibanding beras putih giling karena mengandung hemiselulosa, selulosa, dan protein yang bersifat higroskopis (Septianingrum & Kusbiantoro, 2017). Tingginya kadar air mempercepat respirasi butir, pertumbuhan cendawan, dan biosintesis mikotoksin, sementara kadar air yang terlalu rendah menyebabkan gabah rapuh dan mudah retak saat digiling sehingga meningkatkan persentase beras patah dan menir (Jumali *et al.*, 2020).

Berdasarkan Standar Nasional Indonesia SNI 224:2023 tentang Gabah, kadar air gabah kering giling (GKG) kelas Premium dan Medium I dipersyaratkan maksimum 14,0% basis basah (b.b.), sedangkan untuk GKG kelas Medium II maksimum 15,0% b.b. Adapun untuk gabah kering panen (GKP), kadar air berkisar antara 14,01–25,00% untuk kelas Premium dan Medium I (Badan Standarisasi Nasional, 2023). Nilai 14% b.b. merupakan batas kritis yang ditetapkan berdasarkan kajian ilmiah mengenai hubungan antara kadar air dan pertumbuhan kapang perusak biji-bijian. Lestari dan Kurniawan (2021) menegaskan bahwa pengendalian kadar air gabah pada kisaran 12–14% b.b. merupakan praktek penanganan pascapanen yang esensial untuk menjaga rendemen dan mutu beras kepala selama penyimpanan.

Hasil analisis kadar air gabah beras merah pada berbagai konsentrasi ozon disajikan pada Tabel 18 berikut.

Tabel 16. Pengaruh Konsentrasi Ozon terhadap Kadar Air Gabah Beras Merah

Konsentrasi Ozon (a)	Kadar Air (%)
0 ppm (a1)	11,09 ^a ± 0,05
2 ppm (a2)	11,15 ^a ± 0,02
4 ppm (a3)	11,04 ^a ± 0,14
6 ppm (a4)	11,12 ^a ± 0,38
8 ppm (a5)	11,13 ^a ± 0,06

Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon tidak berpengaruh nyata terhadap kadar air gabah beras merah pada taraf kepercayaan 95% (F-hitung 0,242 < F-tabel 3,84; $p > 0,05$). Nilai rata-rata kadar air seluruh perlakuan berkisar antara 11,04% (perlakuan 4 ppm) hingga 11,15% (perlakuan 2 ppm), dengan rentang perbedaan yang sangat sempit (0,107%) dan tidak membentuk pola perubahan yang konsisten seiring peningkatan konsentrasi ozon. Seluruh nilai kadar air berada jauh di bawah batas maksimum SNI 224:2023 untuk GKG sebesar 14%, mengonfirmasi bahwa ozonisasi pada rentang konsentrasi yang diuji tidak menggeser kadar air gabah beras merah secara berarti.

Secara berurutan, perubahan nilai kadar air antar perlakuan dapat diuraikan sebagai berikut. Dari perlakuan 0 ppm ke 2 ppm, terjadi kenaikan kadar air dari 11,09% menjadi 11,15%. Pada konsentrasi rendah, ozon mengoksidasi sebagian gugus hidrofobik pada lapisan lipid perikarp menjadi gugus yang lebih polar sehingga secara teoritis sedikit meningkatkan kapasitas penyerapan uap air di permukaan, namun besaran perubahannya (0,063%) tidak bermakna secara statistik. Dari perlakuan 2 ppm ke 4 ppm, kadar air mengalami penurunan menjadi 11,04%. Fenomena ini kemungkinan berkaitan dengan depolimerisasi parsial rantai polisakarida serat pada lapisan kulit ari oleh ozon yang mengurangi sedikit kapasitas higroskopisitas matriks. Dari perlakuan 4 ppm ke 6 ppm, kadar air kembali meningkat menjadi 11,12%, disertai standar deviasi tertinggi ($\pm 0,379$), yang mencerminkan heterogenitas distribusi ozon dalam plasma chamber pada konsentrasi lebih tinggi (Brodowska *et al.*, 2018). Dari perlakuan 6 ppm ke 8 ppm,

kadar air relatif stabil pada 11,13%, mengkonfirmasi tidak adanya efek dosis-respons yang konsisten pada parameter ini.

Tidak berpengaruh nyata ozon terhadap kadar air gabah beras merah dapat dijelaskan melalui sifat fundamental ozon sebagai teknologi non-termal. Mekanisme kerja ozon bersifat oksidatif-kimiawi pada komponen permukaan bahan tanpa disertai transfer panas yang bermakna, sehingga tidak menginisiasi perpindahan massa uap air dari matriks bahan secara signifikan. Sivaranjani *et al.* (2021) menegaskan bahwa keunggulan utama teknologi ozon dibanding perlakuan termal adalah tidak menimbulkan perubahan bermakna pada kadar air bahan pangan selama ozonisasi berlangsung dalam kondisi suhu dan kelembaban ruang yang terkendali.

Hasil ini sejalan dengan Zhu (2018) yang menyimpulkan tidak ada perubahan signifikan pada kadar air beras yang diozonisasi dalam sistem tertutup, serta Kaur *et al.* (2023) yang menyatakan ozonisasi tidak secara langsung mengubah kadar air biji sereal dalam kondisi terkontrol. Stabilitas kadar air pasca-ozonisasi ini mengkonfirmasi bahwa mekanisme oksidasi ozon pada rentang konsentrasi yang diuji bekerja secara spesifik menyasar komponen kimia tertentu seperti pati dan antosianin, tanpa memengaruhi keseimbangan air dalam matriks gabah secara umum.

Ozon ternyata tidak mengubah kadar air gabah beras merah pada taraf berapa pun yang diuji dalam penelitian ini. Hal ini terjadi karena ozon bekerja sebagai oksidator kimiawi pada permukaan bahan tanpa disertai perpindahan panas yang berarti, sehingga tidak memicu penguapan maupun penyerapan uap air dalam jumlah yang bermakna. Oleh karena itu, ozonisasi dapat diterapkan pada gabah beras merah tanpa mengubah kondisi mutu simpan yang berbasis kadar air.

4.1.2.2 Kadar Pati (%)

Pati merupakan komponen karbohidrat struktural terbesar gabah beras merah yang menyusun sekitar 80–85% bobot endosperma, tersusun atas amilosa (rantai lurus α -1,4-glikosida) dan amilopektin (rantai bercabang α -1,4 dan α -1,6-glikosida). Rasio kedua fraksi ini menentukan sifat fungsional beras dalam proses

pemasakan, tekstur nasi, dan profil pencernaan (Septianingrum *et al.*, 2016). Pada varietas Inpari 24, kadar amilosa sekitar 18% tergolong rendah-sedang sehingga menghasilkan tekstur nasi yang pulen (Suprihatno *et al.*, 2010). Integritas struktur pati gabah berperan dalam mempertahankan stabilitas fisikokimia selama penyimpanan; modifikasi pada rantai pati akibat perlakuan oksidatif dapat mengubah pola gelatinisasi, daya kembang, kelarutan, dan profil viskositas yang berdampak langsung pada kualitas masak beras merah (Kaur *et al.*, 2023).

Kandungan pati total merupakan indikator utama nilai karbohidrat dan kualitas fungsional beras merah sebagai pangan pokok. Zhu (2018) dalam ulasan komprehensifnya menyimpulkan bahwa ozon secara konsisten memodifikasi karakteristik pati sereal melalui oksidasi gugus hidroksil dan pembentukan gugus karbonil serta karboksil baru, yang mengakibatkan perubahan pada indeks serapan air, indeks kelarutan air, dan karakteristik gelatinisasi. Almeida *et al.* (2025) melaporkan bahwa ozonisasi pati beras japonica menghasilkan perubahan signifikan pada struktur molekuler pati yang berkorelasi dengan perubahan *paste properties* yang terdeteksi melalui RVA.

Hasil analisis kadar pati gabah beras merah pada berbagai konsentrasi ozon disajikan pada Tabel 19 berikut.

Tabel 17. Pengaruh Konsentrasi Ozon terhadap Kadar Pati Gabah Beras Merah

Konsentrasi Ozon (a)	Kadar Pati (%)
0 ppm (a1)	65,21 ^c ± 1,05
2 ppm (a2)	63,47 ^{bc} ± 1,32
4 ppm (a3)	63,06 ^{ab} ± 1,08
6 ppm (a4)	62,34 ^a ± 0,57
8 ppm (a5)	61,23 ^a ± 0,74

Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon berpengaruh nyata terhadap kadar pati gabah beras merah (F-hitung 7,255 > F-tabel 3,84; $P \leq 0,05$). Uji lanjut Duncan's Multiple Range Test (DMRT) pada taraf 5% mengungkapkan pola penurunan kadar pati yang bermakna seiring meningkatnya konsentrasi ozon. Perlakuan kontrol (0 ppm) menghasilkan kadar pati tertinggi sebesar 65,211% (notasi c), berbeda nyata dari perlakuan 4 ppm, 6 ppm, dan 8 ppm,

namun tidak berbeda nyata dari 2 ppm (notasi bc). Perlakuan 6 ppm (62,336%; notasi a) dan 8 ppm (61,227%; notasi a) memberikan kadar pati terendah dan tidak berbeda nyata satu sama lain, namun keduanya berbeda nyata dari kontrol. Penurunan kadar pati dari perlakuan kontrol ke perlakuan 8 ppm mencapai 4,0%, menggambarkan efek dosis-respons yang progresif.

Penurunan kadar pati gabah beras merah akibat ozonisasi dipahami melalui mekanisme oksidasi ozon pada molekul pati yang melibatkan dua jalur reaksi. Pada jalur pertama, ozon bereaksi secara langsung dan selektif menyerang ikatan β tidak jenuh dan gugus aromatik yang lebih reaktif. Pada jalur kedua, ozon terdekomposisi menghasilkan radikal hidroksil yang lebih reaktif dan tidak selektif, sehingga mampu menyerang berbagai situs molekul organik termasuk komponen pati (Kaur *et al.*, 2023). Farizha *et al.* (2021) menjelaskan bahwa dalam proses modifikasi oksidasi pati oleh ozon, gugus hidroksil pada posisi C-2, C-3, dan C-6 dari unit glukosil dioksidasi menjadi gugus karboksil dan karbonil, yang selanjutnya menginduksi depolimerisasi melalui pemutusan ikatan α -1,4-glikosidik. Produk depolimerisasi berupa oligosakarida dan gula rantai pendek yang larut dalam air ini tidak lagi terdeteksi sebagai pati dalam analisis metode Luff Schoorl, sehingga nilai kadar pati terukur cenderung menurun secara proporsional seiring peningkatan konsentrasi ozon.

Temuan ini selaras dengan yang dilaporkan oleh Kaur *et al.* (2023), yang dalam ulasan komprehensifnya menyatakan bahwa ozonisasi secara konsisten menginduksi modifikasi struktur pati sereal melalui oksidasi gugus hidroksil dan pemutusan ikatan glikosidik, mengakibatkan penurunan bobot molekul rata-rata rantai pati yang terukur. Zhu (2018) secara spesifik melaporkan bahwa perlakuan ozon pada beras menghasilkan perubahan pada karakteristik pati yang ditandai dengan peningkatan gugus karbonil dan karboksil. Almeida *et al.* (2024) pada pati beras japonica yang diozonisasi melaporkan terjadinya degradasi rantai amilosa dan amilopektin yang dibuktikan melalui *size-exclusion chromatography*, terutama pada fraksi rantai panjang amilopektin dengan derajat polimerisasi (DP) ≥ 37 dan 25–36.

Pola penurunan yang semakin nyata pada konsentrasi 4–8 ppm dan tercapainya kondisi tanpa perbedaan nyata antara 6 ppm dan 8 ppm menggambarkan efek dosis-respons yang khas pada reaksi oksidasi ozon. Pada konsentrasi rendah (2 ppm), ozon bereaksi preferensial dengan komponen yang lebih reaktif pada lapisan terluar gabah seperti lipid tak jenuh dan senyawa fenolik di lapisan perikarp, sehingga penetrasinya ke endosperma yang mengandung pati masih terbatas. Namun pada konsentrasi lebih tinggi (6–8 ppm), kapasitas penangkapan ozon oleh komponen reaktif di lapisan luar telah terlampaui sehingga terjadi penetrasi yang lebih intensif ke matriks pati endosperma (Brodowska *et al.*, 2018; Zhu, 2018). Tidak adanya perbedaan nyata antara 6 dan 8 ppm kemungkinan mencerminkan tercapainya saturasi oksidasi, yaitu kondisi di mana situs-situs gugus hidroksil bebas yang dapat dioksidasi pada rantai pati mendekati jenuh, sehingga penambahan konsentrasi ozon lebih lanjut tidak menghasilkan laju depolimerisasi yang secara statistik berbeda bermakna.

Whaib *et al.* (2022) melaporkan bahwa pada perlakuan ozon 30 mg/L selama 3–5 jam terhadap beras jasmine Irak, rasio amilosa/amilopektin tidak berubah secara signifikan, yang mengindikasikan bahwa pada intensitas ozonisasi tertentu struktur dasar pati dapat tetap terjaga. Perbedaan hasil antara penelitian tersebut dengan temuan dalam penelitian ini diduga disebabkan oleh perbedaan karakteristik botani bahan (gabah beras merah utuh vs. beras giling), metode dan durasi ozonisasi, serta konsentrasi yang digunakan. Hal ini mempertegas pernyataan Brodowska *et al.* (2018) bahwa respons pati terhadap ozon sangat spesifik terhadap matriks bahan dan kondisi ozonisasi, sehingga data dari komoditas lain tidak dapat digeneralisasikan langsung kepada gabah beras merah.

Dari perspektif mutu gizi dan fungsional, penurunan kadar pati sebesar 4,0% pada perlakuan tertinggi (8 ppm) menunjukkan bahwa ozonisasi tidak menyebabkan kerusakan struktural pati yang bersifat masif. Perubahan ini bersifat modifikasi parsial yang berpotensi mengubah profil fungsional pati, seperti peningkatan daya kembang dan kelarutan akibat peningkatan hidrofilisitas gugus karboksil baru yang terbentuk (Farizha *et al.*, 2021; Kaur *et al.*, 2023). Implikasi

lebih lanjut terhadap sifat gelatinisasi dan tekstur produk perlu dikaji melalui analisis RVA dan FTIR sebagai bagian dari variabel penelitian lanjutan.

Berbeda dari kadar air, kadar pati justru menurun secara nyata dan bertahap seiring meningkatnya konsentrasi ozon, dari 65,21% pada kontrol menjadi 61,23% pada 8 ppm. Penurunan ini terjadi karena ozon memutus sebagian rantai pati menjadi molekul gula yang lebih kecil dan larut air, sehingga tidak lagi terhitung sebagai pati dalam pengujian. Meski demikian, besaran penurunan ini (sekitar 4%) tergolong moderat, sehingga ozonisasi pada rentang konsentrasi ini tidak menyebabkan kerusakan pati yang masif, namun tetap berpotensi mengubah sifat fungsional pati seperti daya kembang dan profil gelatinisasinya, sebagaimana dikonfirmasi oleh data RVA.

4.1.2.3 *Water Activity (a_w)*

Water Activity (a_w) merupakan ukuran ketersediaan air bebas dalam bahan pangan yang berperan aktif dalam reaksi kimia, enzimatik, dan pertumbuhan mikroorganisme. Secara definisi, a_w adalah rasio tekanan parsial uap air di atas bahan terhadap tekanan uap air murni pada suhu yang sama, sehingga nilainya berada pada kisaran $0 \leq a_w \leq 1$. Berbeda dari kadar air total yang mengukur seluruh fraksi air tanpa mempertimbangkan ketersediaannya, a_w memberikan informasi yang lebih relevan secara biologis terkait stabilitas pangan karena mencerminkan fraksi air yang benar-benar tersedia untuk reaksi biokimia dan pertumbuhan mikroba (Leviana & Paramita, 2017). Kapang *Aspergillus flavus* dan *A. parasiticus* penghasil aflatoxin umumnya tumbuh optimal pada $a_w > 0,80$, sehingga pengendalian a_w gabah beras merah di bawah nilai ini merupakan strategi kritis dalam teknologi penyimpanan pascapanen.

Nilai a_w gabah yang terlalu tinggi ($> 0,80$) berkaitan erat dengan risiko kontaminasi mikotoksin, penurunan kualitas sensori, dan percepatan reaksi kerusakan oksidatif. Dalam konteks perlakuan ozon, perubahan pada komponen kimia makromolekular (pati, protein, lipid) akibat oksidasi berpotensi mengubah distribusi air terikat-bebas dan dengan demikian menggeser nilai a_w . Sivaranjani *et al.* (2021) menegaskan bahwa stabilitas a_w setelah ozonisasi merupakan keunggulan

teknologi non-termal ini dibandingkan metode perlakuan konvensional yang mengubah profil sorpsi air bahan.

Hasil analisis *water activity* (a_w) gabah beras merah pada berbagai konsentrasi ozon disajikan pada Tabel 20 berikut.

Tabel 18. Pengaruh Konsentrasi Ozon terhadap *Water Activity* (a_w) Gabah Beras Merah

Konsentrasi Ozon (a)	<i>Water Activity</i> (a_w)
0 ppm (a1)	$0,77^a \pm 0,03$
2 ppm (a2)	$0,76^a \pm 0,02$
4 ppm (a3)	$0,76^a \pm 0,02$
6 ppm (a4)	$0,75^a \pm 0,02$
8 ppm (a5)	$0,74^a \pm 0,02$

Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon tidak berpengaruh nyata terhadap *water activity* (a_w) gabah beras merah (F-hitung 0,447 < F-tabel 3,84; $p > 0,05$). Nilai rata-rata a_w berkisar antara 0,744 (8 ppm) hingga 0,766 (kontrol). Meskipun secara numerik terdapat kecenderungan penurunan nilai a_w seiring peningkatan konsentrasi ozon, perbedaan tersebut tidak mencapai signifikansi statistik.

Secara berurutan, dari perlakuan 0 ppm ke 2 ppm, nilai a_w turun sangat kecil dari 0,766 menjadi 0,765 (selisih 0,001), menunjukkan modifikasi gugus kimia oleh ozon belum cukup untuk menggeser distribusi air bebas-terikat secara terukur. Dari perlakuan 2 ppm ke 4 ppm, terjadi penurunan a_w menjadi 0,756 (selisih 0,009); pembentukan gugus karbonil dan karboksil yang bersifat hidrofilik pada rantai pati (sebagaimana tercermin dari penurunan kadar pati pada Tabel 19) secara teoritis meningkatkan kapasitas pengikatan air terikat sehingga fraksi air bebas berkurang. Dari perlakuan 4 ppm ke 6 ppm, nilai a_w turun tipis menjadi 0,754 (selisih 0,002), kemudian dari 6 ppm ke 8 ppm turun lebih jelas menjadi 0,744 (selisih 0,010).

Kecenderungan penurunan pada konsentrasi 6–8 ppm berkorelasi dengan oksidasi parsial komponen lipid tak jenuh lapisan perikarp yang menghasilkan produk oksidasi lebih polar berafinitas tinggi terhadap molekul air, namun karena proporsi lipid dalam bobot total gabah relatif kecil, dampaknya tidak cukup signifikan secara statistik (Zhu, 2018).

Tidak berpengaruh nyata ozon terhadap a_w berkaitan mekanistik dengan tidak berpengaruh nyata ozon terhadap kadar air total (Subbab 4.1.2.1). Pada bahan pangan padat dengan kisaran a_w menengah (0,60–0,80), perubahan kecil pada kadar air total memiliki dampak relatif kecil terhadap pergeseran a_w karena sebagian besar air terikat pada polimer biologis melalui ikatan hidrogen yang kuat (Leviana & Paramita, 2017). Pada rentang konsentrasi 0–8 ppm, derajat modifikasi gugus yang terjadi tampaknya belum mencukupi untuk menghasilkan pergeseran hidrofilisitas matriks gabah yang cukup besar guna mengubah distribusi air bebas terikat secara statistik. Seluruh nilai a_w (0,744–0,766) berada di bawah batas kritis 0,80 yang merupakan ambang minimum pertumbuhan sebagian besar kapang perusak sereal (Leviana & Paramita, 2017), namun nilai tersebut tergolong relatif tinggi dan mendekati ambang kritis tersebut, sehingga risiko pertumbuhan kapang xerofilik pada gabah beras merah tidak sepenuhnya dapat diabaikan terlepas dari perlakuan ozon yang diberikan.

Tidak berubahnya a_w secara nyata akibat perlakuan ozon menunjukkan bahwa mekanisme oksidasi ozon pada rentang konsentrasi yang diuji tidak cukup kuat untuk menggeser kesetimbangan sorpsi uap air dalam matriks gabah secara terukur. Stabilitas a_w ini selaras dengan karakteristik fundamental ozon sebagai teknologi non-termal yang bekerja secara spesifik pada komponen kimia tertentu seperti pati dan antosianin, tanpa mengubah keseimbangan air bahan secara substansial (Sivaranjani et al., 2021). Meski demikian, nilai a_w yang relatif tinggi pada seluruh perlakuan (termasuk kontrol) tetap perlu menjadi perhatian tersendiri, terlepas dari ada atau tidaknya perlakuan ozon.

Sejalan dengan kadar air, nilai *water activity* juga tidak berbeda nyata akibat ozonisasi pada seluruh taraf konsentrasi (berkisar 0,744–0,766). Nilai ini tergolong relatif tinggi dan mendekati ambang kritis pertumbuhan kapang (a_w 0,80), sehingga meskipun ozon tidak mengubah nilai tersebut secara nyata, kondisi a_w gabah tetap perlu diwaspadai terlepas dari perlakuan ozon yang diberikan.

4.1.2.4 Kadar Antosianin

Antosianin merupakan pigmen flavonoid larut air yang bertanggung jawab atas warna merah hingga ungu pada perikarp gabah beras merah varietas Inpari 24, dengan sianidin-3-glukosida (cyanidin-3-glucoside) sebagai komponen dominan pada sebagian besar kultivar padi berpigmen. Secara struktural, antosianin tersusun atas kerangka flavilium (2-fenilbenzopirilium) yang terikat pada gugus gula, dan memiliki sistem ikatan rangkap terkonjugasi yang menjadikannya sangat reaktif terhadap oksidasi, perubahan pH, panas, cahaya, dan enzim oksidatif. Selain berperan sebagai penentu warna yang menjadi daya tarik konsumen produk pangan fungsional, antosianin memiliki aktivitas antioksidan tinggi melalui mekanisme donor elektron/hidrogen yang menetralkan radikal bebas, sehingga kadar antosianin sering digunakan sebagai indikator nilai fungsional dan nutrisi beras berpigmen (Li & Ahammed, 2023).

Kadar antosianin merupakan parameter mutu fungsional yang menentukan nilai jual dan daya tarik beras merah sebagai pangan fungsional kaya antioksidan. Berbeda dengan pati yang bersifat struktural, antosianin tergolong metabolit sekunder yang labil dan sangat sensitif terhadap kondisi oksidatif. Ozon sebagai oksidator kuat (potensial redoks 2,07 V) dapat menyerang langsung ikatan rangkap terkonjugasi pada cincin flavilium antosianin sehingga menyebabkan pemudaran warna dan degradasi struktural menjadi produk tidak berwarna (Li & Ahammed, 2023). Karena antosianin tidak memiliki fungsi struktural dalam menjaga integritas granula pati, responsnya terhadap ozon murni bersifat degradatif dan tidak melibatkan mekanisme kompensasi struktural sebagaimana yang teramati pada kristalinitas pati (Subbab 4.1.1.1).

Hasil analisis kadar antosianin gabah beras merah pada berbagai konsentrasi ozon disajikan pada Tabel 21 berikut.

Tabel 19. Pengaruh Konsentrasi Ozon terhadap Kadar Antosianin Gabah Beras Merah

Konsentrasi Ozon (a)	Kadar Antosianin (%)
0 ppm (a1)	44,37 ^d ± 1,16
2 ppm (a2)	39,47 ^c ± 2,46
4 ppm (a3)	37,66 ^c ± 1,27
6 ppm (a4)	33,28 ^b ± 0,40
8 ppm (a5)	27,25 ^a ± 0,06

Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon berpengaruh nyata terhadap kadar antosianin gabah beras merah (F -hitung 60,719 > F -tabel 3,84; $p < 0,05$), sedangkan faktor kelompok (ulangan) tidak berpengaruh nyata (F -hitung 0,412 < F -tabel 4,46), yang mengonfirmasi bahwa rancangan acak kelompok yang digunakan telah mengendalikan keragaman lingkungan secara memadai sehingga perbedaan yang teramati murni disebabkan oleh perlakuan konsentrasi ozon. Kadar antosianin menurun secara konsisten seiring peningkatan konsentrasi ozon, dari 44,37% pada kontrol menjadi 27,25% pada 8 ppm. Notasi DMRT menunjukkan bahwa taraf 0 ppm (notasi d), 6 ppm (notasi b), dan 8 ppm (notasi a) masing-masing berbeda nyata satu sama lain maupun dari taraf lainnya, sedangkan taraf 2 ppm dan 4 ppm membentuk satu kelompok yang tidak berbeda nyata satu sama lain (notasi c), mengindikasikan bahwa penurunan kadar antosianin bersifat nyata pada hampir seluruh peningkatan dosis, kecuali pada rentang 2–4 ppm.

Secara berurutan, dari perlakuan 0 ppm ke 2 ppm, kadar antosianin menurun nyata dari 44,37% menjadi 39,47% (penurunan 11,0%), konsisten dengan tingginya reaktivitas cincin flavilium antosianin terhadap serangan awal ozon dan radikal hidroksil hasil dekomposisinya (Li & Ahammed, 2023). Dari perlakuan 2 ppm ke 4 ppm, kadar antosianin turun tipis menjadi 37,66% (penurunan 4,6%); penurunan ini merupakan satu-satunya transisi yang tidak berbeda nyata secara statistik, sehingga 2 ppm dan 4 ppm tergolong dalam satu kelompok taraf yang setara (notasi c). Dari perlakuan 4 ppm ke 6 ppm, kadar antosianin kembali turun nyata menjadi 33,28% (penurunan 11,6%; notasi b). Dari 6 ppm ke 8 ppm, kadar antosianin turun nyata lebih lanjut menjadi 27,25% (penurunan 18,1%; notasi a), merupakan penurunan

relatif terbesar sekaligus taraf konsentrasi dengan kadar antosianin terendah dalam seluruh seri. Total penurunan dari kontrol hingga 8 ppm mencapai 38,6%.

Pola yang menonjol dari data ini adalah bahwa penurunan kadar antosianin bersifat nyata secara statistik pada hampir setiap peningkatan dosis ozon, dengan satu-satunya pengecualian pada rentang 2–4 ppm yang tidak berbeda nyata. Selain itu, penurunan justru semakin besar secara numerik pada dosis yang lebih tinggi, dengan transisi dari 6 ppm ke 8 ppm menghasilkan penurunan relatif terbesar (18,1%) sekaligus merupakan perubahan taraf yang signifikan (dari notasi b ke notasi a). Pola ini berbeda dari kinetika degradasi order-satu yang lazimnya menghasilkan penurunan proporsional yang melambat seiring berkurangnya konsentrasi antosianin yang tersisa; sebaliknya, laju degradasi pada penelitian ini justru meningkat pada dosis tinggi, mengindikasikan bahwa ozon secara progresif menembus fraksi antosianin yang semakin dalam dan semakin terlindungi pada jaringan perikarp dan aleuron seiring bertambahnya dosis.

Pola penurunan monoton kadar antosianin yang teramati pada seluruh rentang konsentrasi ozon dapat dijelaskan melalui mekanisme tunggal yang konsisten, yaitu degradasi oksidatif langsung terhadap kromofor antosianin. Ozon dan radikal hidroksil turunannya menyerang ikatan rangkap terkonjugasi pada cincin flavilium, menyebabkan pembukaan cincin (ring-opening) dan pembentukan produk tidak berwarna seperti asam benzoat dan aldehid fenolik (Li & Ahammed, 2023). Berbeda dengan pati yang responsnya terhadap ozon melibatkan keseimbangan antara depolimerisasi dan pembentukan ikatan silang (Subbab 4.1.1.3), antosianin sebagai molekul kecil non-polimerik tidak memiliki mekanisme reorganisasi struktural yang dapat memulihkan kromofornya setelah teroksidasi, sehingga responsnya terhadap ozon bersifat searah (irreversibel) dan berbanding lurus dengan derajat oksidasi yang diterima.

Pola penurunan yang hampir seluruhnya signifikan pada setiap taraf peningkatan dosis, kecuali pada rentang 2–4 ppm, mengindikasikan bahwa fraksi antosianin gabah beras merah tidak terbagi menjadi dua kelompok aksesibilitas yang jelas terpisah, melainkan terdistribusi lebih kontinu dalam hal kerentanannya terhadap oksidasi ozon. Plateau singkat yang teramati pada 2–4 ppm diduga

mencerminkan periode transisi saat fraksi antosianin yang paling mudah diakses pada lapisan terluar perikarp mulai habis teroksidasi, sebelum oksidasi berlanjut menembus fraksi yang berturut-turut semakin dalam dan semakin terlindungi pada dosis 6 dan 8 ppm. Percepatan laju penurunan pada dosis tertinggi (6→8 ppm menghasilkan penurunan terbesar dalam seri) mengindikasikan bahwa pada tahap ini ozon mulai menjangkau fraksi antosianin yang paling terlindungi, sekaligus berpotensi mendegradasi produk antara hasil oksidasi awal yang sebelumnya belum sepenuhnya terurai.

Pola penurunan monoton kadar antosianin akibat ozonisasi dalam penelitian ini sejalan dengan temuan yang konsisten pada berbagai matriks pangan kaya antosianin yang diozonisasi secara langsung, seperti jus anggur dan jus blackberry (Tiwari *et al.*, 2009), yang keduanya melaporkan penurunan kadar antosianin yang signifikan akibat oksidasi langsung terhadap struktur flavonoid oleh ozon. Li dan Ahammed (2023) dalam ulasannya juga menegaskan bahwa cincin flavilium antosianin merupakan target oksidasi yang sangat reaktif sehingga degradasinya akibat paparan oksidator seperti ozon umumnya bersifat dosis-dependen dan konsisten arahnya, sebagaimana ditemukan dalam penelitian ini. Menariknya, pola ini berbeda dari laporan Lee *et al.* (2025) yang justru menemukan peningkatan kadar antosianin pada tanaman padi hidup yang mengalami stres ozon di lapangan melalui jalur biosintesis kompensatoris. Perbedaan ini kemungkinan besar disebabkan oleh perbedaan mendasar antara sistem yang diamati: tanaman padi hidup pada fase pertumbuhan vegetatif/generatif memiliki jaringan fotosintetik aktif dengan kapasitas biosintesis flavonoid melalui jalur fenilpropanoid yang responsif terhadap stres, sedangkan gabah pascapanen yang telah dikeringkan dalam penelitian ini merupakan jaringan dorman dengan aktivitas metabolik yang jauh lebih terbatas, sehingga jalur kompensasi biosintesis yang dapat mengimbangi degradasi oksidatif tidak tersedia atau sangat minim, menyebabkan efek degradatif ozon mendominasi secara searah tanpa pemulihan.

Besaran penurunan total kadar antosianin dalam penelitian ini (38,6%) tergolong lebih moderat dibandingkan derajat degradasi yang kerap dilaporkan pada matriks pangan cair kaya antosianin yang diozonisasi secara langsung, seperti

jus anggur dan jus blackberry (Tiwari *et al.*, 2009). Perbedaan ini diduga disebabkan oleh perlindungan fisik yang diberikan oleh struktur gabah utuh, yaitu lapisan sekam, perikarp, dan aleuron yang membungkus endosperma, dibandingkan bahan yang telah dihaluskan atau diekstraksi sebelum diozonisasi, sehingga penetrasi ozon ke jaringan bagian dalam tempat antosianin terkonsentrasi menjadi lebih terbatas dan berlangsung secara bertahap. Perbandingan pola respons antosianin dengan parameter lain yang telah dibahas turut menggarisbawahi bahwa ozonisasi gabah beras merah menghasilkan efek yang bergantung pada tingkat organisasi molekuler senyawa yang terpapar: antosianin sebagai metabolit sekunder non-polimerik menunjukkan penurunan kumulatif dan searah tanpa pemulihan, sejalan dengan kadar pati yang juga menurun secara progresif (Subbab 4.1.2.2), sedangkan kristalinitas relatif (XRD, Subbab 4.1.1.1) yang mencerminkan organisasi supramolekular rantai pati justru menunjukkan pemulihan parsial pada 8 ppm setelah mencapai titik terendah di 6 ppm.

Dari seluruh parameter yang diuji, antosianin menunjukkan respons paling drastis: kadarnya menurun nyata dan konsisten pada hampir seluruh taraf konsentrasi ozon, dari 44,37% pada kontrol menjadi 27,25% pada 8 ppm penurunan total sebesar 38,6%. Hal ini terjadi karena ozon menyerang langsung struktur cincin flavilium yang menjadi sumber warna sekaligus aktivitas antioksidan antosianin, dan berbeda dari pati, antosianin tidak memiliki mekanisme untuk memulihkan strukturnya setelah teroksidasi. Akibatnya, semakin tinggi konsentrasi ozon yang digunakan, semakin besar pula nilai fungsional dan antioksidan gabah beras merah yang hilang, menjadikan kadar antosianin sebagai parameter paling kritis dan paling menentukan dalam penetapan konsentrasi ozon yang aman digunakan.

4.1.2.5 Gugus Fungsi (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

Analisis gugus fungsi pada gabah beras merah menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) merupakan teknik karakterisasi berbasis spektroskopi inframerah yang digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi kimia dalam suatu bahan melalui pola absorpsi energi foton inframerah oleh ikatan kimia spesifik. Setiap ikatan kimia memiliki frekuensi getaran karakteristik yang

unik, sehingga pola serapan pada spektrum FTIR dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan secara semi-kuantitatif memantau perubahan gugus fungsi yang terjadi akibat perlakuan kimia, fisik, maupun biologis terhadap suatu bahan (Sumardiono *et al.*, 2021). Dalam konteks ozonisasi gabah beras merah, analisis FTIR sangat relevan karena memungkinkan deteksi langsung terbentuknya gugus-gugus fungsi baru hasil oksidasi khususnya gugus karbonil (C=O) dan karboksil serta pemantauan perubahan pada gugus metilen (C-H) yang merupakan penanda aktivitas oksidasi lipid, dan gugus glikosidik (C-O-C) yang merupakan ikatan struktural utama rantai pati sereal (Kaur *et al.*, 2023; Du *et al.*, 2024).

Gugus-gugus fungsi utama yang relevan dalam analisis FTIR gabah beras merah meliputi: (1) regangan O-H dan N-H pada bilangan gelombang 3200–3600 cm^{-1} yang berkaitan dengan gugus hidroksil bebas air, pati, dan protein; (2) regangan C-H alifatik pada sekitar 2800–2900 cm^{-1} yang mencerminkan ikatan C-H pada rantai lipid dan polimer karbohidrat; (3) regangan C=O pada kisaran 1700–1800 cm^{-1} yang merupakan penanda utama gugus karbonil hasil oksidasi; dan (4) regangan C-O-C pada kisaran 800–1000 cm^{-1} yang mencerminkan integritas ikatan glikosidik pada rantai pati (Farizha *et al.*, 2021; Obadi *et al.*, 2018).

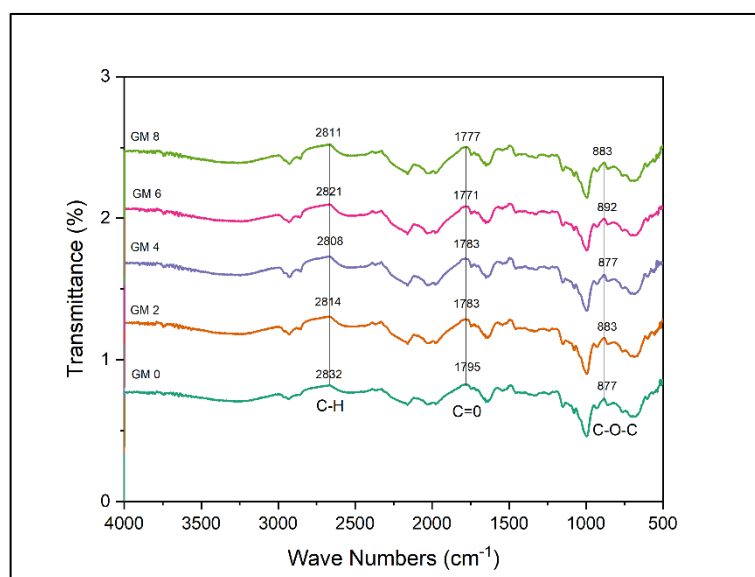
Pembentukan gugus karbonil (C=O) pada kisaran 1700–1800 cm^{-1} merupakan penanda langsung terjadinya oksidasi rantai pati oleh ozon. Zhu (2018) dan Farizha *et al.* (2021) menjelaskan bahwa oksidasi gugus hidroksil (-OH) pada posisi C-2, C-3, dan C-6 unit glukosil rantai amilosa dan amilopektin oleh ozon menghasilkan gugus aldehid dan keton (C=O) yang berada pada kisaran serapan 1700–1800 cm^{-1} . Selanjutnya, oksidasi lanjut gugus aldehid menghasilkan gugus karboksil (-COOH) pada kisaran 1720–1740 cm^{-1} . Kaur *et al.* (2023) menegaskan bahwa peningkatan absorbansi pada kisaran C=O merupakan penanda kuantitatif derajat modifikasi oksidatif pati yang berkorelasi positif dengan dosis ozon yang diterima matriks bahan. Perubahan pada gugus C-O-C (sekitar 800–1000 cm^{-1}) memberikan informasi tentang integritas ikatan glikosidik; penurunan intensitas serapan C-O-C mengindikasikan pemutusan ikatan α -1,4 dan α -1,6-glikosidik yang menyusun struktur amilosa dan amilopektin, konsisten dengan penurunan kadar pati yang terdeteksi melalui analisis kimia (Du *et al.*, 2024). Adapun pergeseran dan

perubahan intensitas pada pita C-H ($\sim 2800\text{--}2900\text{ cm}^{-1}$) dapat mengindikasikan oksidasi lipid pada lapisan perikarp dan aleuron, di mana pembentukan produk oksidasi lipid primer (hidroperoksida) kemudian sekunder (aldehid, keton rantai panjang) mengubah lingkungan kimia gugus metilen alifatik (Brodowska *et al.*, 2018).

Hasil analisis FTIR tepung gabah beras merah pada berbagai konsentrasi ozon mengungkap tiga pita serapan utama yang mengalami perubahan signifikan, yaitu pita C-H sekitar $2800\text{--}2832\text{ cm}^{-1}$, pita C=O sekitar $1771\text{--}1795\text{ cm}^{-1}$, dan pita C-O-C sekitar $877\text{--}892\text{ cm}^{-1}$. Data posisi puncak serapan seluruh perlakuan disajikan pada Tabel 22 berikut.

Tabel 20. Posisi Puncak Serapan FTIR Gabah Beras Merah pada Berbagai Konsentrasi Ozon

Konsentrasi Ozon (a)	C-H (cm^{-1})	C=O (cm^{-1})	C-O-C (cm^{-1})
0 ppm (a1)	2832	1795	877
2 ppm (a2)	2814	1783	883
4 ppm (a3)	2808	1783	877
6 ppm (a4)	2821	1771	892
8 ppm (a5)	2811	1777	883



Gambar 9. Grafik FTIR Gabah Beras Merah pada Berbagai Konsentrasi Ozon

Pita Serapan C-H (~2800–2832 cm⁻¹)

Pita serapan pada kisaran 2800–2832 cm⁻¹ merepresentasikan regangan simetris dan asimetris ikatan C-H pada gugus metilen (-CH₂-) alifatik yang dominan berasal dari komponen lipid rantai panjang di lapisan perikarp dan aleuron, serta kontribusi kecil dari rantai glukosil pati. Pada kontrol (GM0), pita C-H teramati pada bilangan gelombang tertinggi yaitu 2832 cm⁻¹, yang mencerminkan kondisi lipid yang belum teroksidasi dengan panjang rantai alifatik utuh.

Dari perlakuan 0 ppm ke 2 ppm, posisi puncak C-H bergeser ke bilangan gelombang yang lebih rendah dari 2832 cm⁻¹ menjadi 2814 cm⁻¹ (selisih 18 cm⁻¹). Pergeseran ke bilangan gelombang lebih rendah (redshift) pada pita C-H mengindikasikan perubahan lingkungan elektronik gugus metilen akibat oksidasi lipid awal; terbentuknya produk oksidasi primer lipid (hidroperoksida) pada posisi α terhadap gugus C-H mengubah konstanta gaya ikatan dan menurunkan frekuensi getaran karakteristiknya (Brodowska *et al.*, 2018). Hal ini konsisten dengan mekanisme bahwa pada konsentrasi rendah (2 ppm), ozon bereaksi preferensial dengan ikatan rangkap pada lipid tak jenuh di lapisan perikarp sebelum berpenetrasi ke komponen pati endosperma.

Dari perlakuan 2 ppm ke 4 ppm, posisi puncak C-H bergeser lebih jauh ke 2808 cm⁻¹ — nilai terendah dalam seri. Penurunan lebih lanjut ini mengindikasikan oksidasi lipid yang semakin intensif pada konsentrasi 4 ppm, dengan akumulasi produk oksidasi lipid sekunder yang semakin mengubah lingkungan elektronik gugus metilen. Dari perlakuan 4 ppm ke 6 ppm, posisi puncak C-H kembali naik menjadi 2821 cm⁻¹. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui mekanisme kompetitif: pada konsentrasi 6 ppm yang intensif, ozon telah mengonsumsi sebagian besar substrat lipid tak jenuh yang reaktif di lapisan perikarp sehingga produk oksidasi lipid sekunder yang terakumulasi (aldehid, keton rantai pendek, asam lemak) memiliki karakter alifatik yang berbeda dari lipid asalnya. Berkurangnya kontribusi hidroperoksida dan meningkatnya kontribusi produk oksidasi sekunder rantai pendek menggeser posisi puncak C-H ke bilangan gelombang yang lebih tinggi dibanding 4 ppm. Dari perlakuan 6 ppm ke 8 ppm, posisi C-H sedikit turun kembali

ke 2811 cm^{-1} , mengindikasikan oksidasi lanjutan yang lebih merata pada komponen lipid yang tersisa.

Pita Serapan C=O ($\sim 1771\text{--}1795\text{ cm}^{-1}$)

Pita serapan pada kisaran $1771\text{--}1795\text{ cm}^{-1}$ merupakan penanda paling langsung dan diagnostik dari proses oksidasi yang diinduksi ozon pada komponen organik gabah beras merah. Pita ini mencerminkan regangan gugus karbonil (C=O) yang mencakup aldehid, keton, dan lakton yang terbentuk sebagai produk oksidasi dari gugus hidroksil rantai pati maupun dari oksidasi lipid sekunder. Pergeseran posisi dan perubahan karakter puncak C=O secara berurutan memberikan informasi yang sangat berharga tentang derajat dan jenis oksidasi yang terjadi.

Pada kontrol (GM0), pita C=O teramati pada bilangan gelombang tertinggi yaitu 1795 cm^{-1} . Posisi yang relatif tinggi ini (mendekati kisaran lakton, $1735\text{--}1800\text{ cm}^{-1}$) mengindikasikan bahwa gugus C=O yang terdeteksi pada kondisi alami gabah beras merah berasal dari komponen laktonik alami seperti lipid teroksidasi alami dalam jumlah kecil atau komponen fenolik dari lapisan aleuron, bukan dari oksidasi ozon.

Dari perlakuan 0 ppm ke 2 ppm, posisi puncak C=O bergeser ke bilangan gelombang lebih rendah dari 1795 cm^{-1} menjadi 1783 cm^{-1} (selisih 12 cm^{-1}). Pergeseran ke bilangan gelombang yang lebih rendah (redshift) pada pita C=O mengindikasikan perubahan jenis gugus karbonil yang dominan: dari gugus laktonik (1795 cm^{-1}) menjadi gugus aldehid/keton alifatik yang lebih terkonjugasi atau berada dalam lingkungan polar yang lebih kuat ($\sim 1780\text{--}1790\text{ cm}^{-1}$). Hal ini konsisten dengan pembentukan gugus karbonil pada rantai pati (keton dan aldehid pada posisi C-2, C-3, dan C-6 unit glukosil) yang ditambahkan kepada gugus karbonil lipid yang sudah ada, menggeser posisi puncak gabungan ke arah yang lebih rendah (Farizha *et al.*, 2021; Kaur *et al.*, 2023).

Dari perlakuan 2 ppm ke 4 ppm, posisi puncak C=O tetap stabil pada 1783 cm^{-1} , mengindikasikan bahwa pada konsentrasi 4 ppm, komposisi relatif jenis gugus karbonil yang terbentuk tidak berbeda signifikan dari perlakuan 2 ppm meskipun intensitasnya mungkin berbeda. Hal ini konsisten dengan pola kadar pati

yang juga menunjukkan penurunan gradual pada transisi 2→4 ppm, mengindikasikan laju pembentukan gugus C=O baru yang relatif konstan pada rentang konsentrasi ini.

Perubahan paling signifikan terjadi dari perlakuan 4 ppm ke 6 ppm, di mana posisi puncak C=O bergeser paling jauh ke 1771 cm^{-1} — nilai terendah dalam seluruh seri (selisih 24 cm^{-1} dari kontrol). Pergeseran substansial ini mengindikasikan akumulasi gugus karbonil yang lebih terkonjugasi atau dalam lingkungan elektronik yang lebih polar, yang konsisten dengan pembentukan gugus karboksil (-COOH) dalam jumlah yang lebih signifikan pada 6 ppm (karboksil umumnya menyerap pada $1710\text{--}1725\text{ cm}^{-1}$ namun dalam matriks padat dapat bergeser ke bilangan gelombang yang lebih tinggi). Du *et al.* (2024) menjelaskan bahwa oksidasi pati yang lebih intensif menghasilkan campuran gugus aldehid, keton, dan karboksil yang secara kooperatif menghasilkan pita C=O yang lebih lebar dan bergeser ke bilangan gelombang lebih rendah. Pergeseran ini berkorelasi langsung dengan penurunan kristalinitas paling drastis (22,0%) dan kadar pati yang telah berbeda nyata dari kontrol (62,336%; notasi a, tidak berbeda nyata dari 8 ppm yang merupakan titik terendah numerik) pada 6 ppm, serta morfologi SEM yang menunjukkan fragmentasi paling intensif, mengkonfirmasi bahwa 6 ppm merupakan titik oksidasi paling intensif dalam seri perlakuan ini.

Dari perlakuan 6 ppm ke 8 ppm, posisi puncak C=O sedikit naik kembali ke 1777 cm^{-1} . Kenaikan posisi puncak ini dapat dikaitkan dengan perubahan komposisi gugus karbonil akibat re-organisasi struktural yang terjadi pada 8 ppm: sebagian gugus karbonil reaktif (aldehid) mungkin telah teroksidasi lebih lanjut menjadi gugus karboksil stabil, atau berpartisipasi dalam reaksi kondensasi selama re-kristalisasi parsial, sehingga menggeser komposisi gugus C=O yang tersisa ke arah jenis yang lebih tinggi bilangan gelombangnya. Hal ini konsisten dengan kenaikan kristalinitas pada XRD dan morfologi re-aglomerasi pada SEM 8 ppm yang mengindikasikan re-organisasi struktural rantai pati.

Pita Serapan C-O-C (~877–892 cm^{-1})

Pita serapan pada kisaran 877–892 cm^{-1} merepresentasikan regangan gugus C-O-C yang mencerminkan ikatan glikosidik α -1,4 dan α -1,6 yang menyusun struktur rantai amilosa dan amilopektin pati beras merah. Perubahan posisi dan intensitas pita C-O-C memberikan informasi tentang integritas ikatan glikosidik struktural pati yang secara langsung berkaitan dengan panjang rantai dan derajat polimerisasi pati.

Pada kontrol (GM0), pita C-O-C teramati pada 877 cm^{-1} , yang merupakan posisi khas untuk ikatan glikosidik α -1,4 pada rantai amilosa dan amilopektin pati sereal. Dari perlakuan 0 ppm ke 2 ppm, posisi puncak C-O-C bergeser ke bilangan gelombang lebih tinggi menjadi 883 cm^{-1} . Pergeseran ke bilangan gelombang lebih tinggi (blueshift) pada pita C-O-C dapat mengindikasikan perubahan sudut atau panjang ikatan C-O-C akibat oksidasi awal gugus hidroksil di sekitar posisi glikosidik, yang mengubah lingkungan elektronik gugus C-O-C tanpa memutusnya secara langsung (Sumardiono *et al.*, 2021).

Dari perlakuan 2 ppm ke 4 ppm, posisi puncak C-O-C kembali ke 877 cm^{-1} , sama dengan kontrol. Hal ini mengindikasikan bahwa pada 4 ppm, perubahan yang terjadi pada lingkungan gugus glikosidik bersifat lebih terdistribusi dan kompleks sehingga posisi puncak gabungan kembali ke nilai referensi, meskipun modifikasi pada komponen lain (C-H dan C=O) terus berlangsung.

Dari perlakuan 4 ppm ke 6 ppm, terjadi pergeseran paling signifikan pada pita C-O-C ke bilangan gelombang tertinggi dalam seri yaitu 892 cm^{-1} (selisih 15 cm^{-1} dari kontrol). Pergeseran blueshift yang paling besar ini pada konsentrasi 6 ppm mengindikasikan perubahan paling intensif pada lingkungan ikatan glikosidik. Beberapa mekanisme dapat menjelaskan fenomena ini: pertama, pemutusan parsial ikatan glikosidik oleh radikal hidroksil menghasilkan fragmen rantai dengan ujung pereduksi baru yang memiliki karakter C-O berbeda; kedua, pembentukan gugus karboksil pada posisi C-6 yang berdekatan dengan ikatan glikosidik mengubah distribusi elektron di sekitar C-O-C; ketiga, pembebasan granula pati individual dari matriks sel (terlihat pada SEM 6 ppm) mengekspos lebih banyak permukaan glikosidik ke lingkungan yang berbeda (Du *et al.*, 2024; Kaur *et al.*, 2023).

Pergeseran terbesar pada C-O-C di 6 ppm ini sangat konsisten dengan penurunan kristalinitas paling drastis pada XRD, fragmentasi morfologi paling intens pada SEM, dan penurunan kadar pati yang paling signifikan, mengkonfirmasi 6 ppm sebagai titik oksidasi maksimal dalam seri perlakuan.

Dari perlakuan 6 ppm ke 8 ppm, posisi puncak C-O-C kembali ke 883 cm^{-1} . Kembalinya posisi puncak C-O-C ke nilai yang lebih rendah (mendekati GM2) konsisten dengan re-organisasi struktural pada 8 ppm: pembentukan ikatan glikosidik baru selama re-kristalisasi parsial menghasilkan lingkungan ikatan C-O-C yang lebih teratur dan bergeser kembali ke posisi yang lebih mendekati referensi, konsisten dengan kenaikan kristalinitas pada XRD dan re-aglomerasi pada SEM yang teramati pada perlakuan 8 ppm.

Integrasi data ketiga pita serapan FTIR (C-H, C=O, C-O-C) mengungkap gambaran mekanistik yang koheren mengenai urutan dan prioritas reaksi ozon pada matriks gabah beras merah. Secara hierarkis, reaksi ozon berlangsung dalam urutan reaktivitas: komponen lipid tak jenuh di lapisan perikarp (terdeteksi melalui pergeseran C-H sejak 2 ppm) → oksidasi gugus hidroksil rantai pati membentuk gugus C=O (terdeteksi sejak 2 ppm, paling intensif pada 6 ppm) → gangguan pada ikatan glikosidik C-O-C (paling signifikan pada 6 ppm). Urutan ini konsisten dengan model penetrasi bertahap ozon dari lapisan terluar (perikarp kaya lipid) menuju inti endosperma (kaya pati) sesuai peningkatan konsentrasi ozon yang diterapkan. Pada konsentrasi 6 ppm, ketiga gugus fungsi menunjukkan perubahan posisi puncak yang paling jauh dari kontrol secara simultan, mengkonfirmasi bahwa 6 ppm merupakan konsentrasi kritis di mana oksidasi ozon telah melampaui kapasitas buffer komponen perikarp dan aleuron serta mencapai intensitas penuh pada level pati endosperma. Pada 8 ppm, pergeseran parsial kembali pada C=O dan C-O-C mengindikasikan dimulainya fase re-organisasi yang juga teramati pada XRD dan SEM, di mana produk oksidasi berinteraksi dan berasosiasi ulang dalam matriks yang lebih terbuka akibat fragmentasi pada 6 ppm.

Pola pergeseran pita C=O ke bilangan gelombang lebih rendah seiring peningkatan konsentrasi ozon konsisten dengan temuan Sumardiono *et al.* (2021) yang melaporkan peningkatan gugus karbonil dan karboksil pada pati sagu yang

diozonisasi melalui analisis FTIR. Kaur *et al.* (2023) dalam ulasan komprehensifnya mengkonfirmasi bahwa pembentukan gugus C=O yang terdeteksi melalui FTIR merupakan penanda universal oksidasi pati oleh ozon pada berbagai sereal. Du *et al.* (2024) pada pati beras waxy yang diozonisasi melaporkan perubahan serupa pada pita C=O dan C-O-C yang berkorelasi dengan modifikasi pasta dan sifat termal pati. Obadi *et al.* (2018) pada tepung gandum utuh yang diozonisasi melaporkan perubahan pada pita C-H yang dikaitkan dengan oksidasi lipid, yang konsisten dengan pola pergeseran C-H yang teramati dalam penelitian ini. Perbedaan yang mungkin ada antara penelitian ini dan studi pada pati terisolasi adalah bahwa dalam tepung gabah beras merah utuh, kehadiran komponen non-pati (protein, serat, fenolik, lipid dari aleuron dan perikarp) menghasilkan spektrum FTIR yang lebih kompleks dan pola pergeseran yang lebih terdifusi dibanding pati terisolasi murni. Hal ini menjelaskan mengapa pergeseran posisi puncak yang teramati bersifat lebih gradual dan tidak selalu linier, karena mencerminkan respons terintegrasi dari berbagai komponen kimia yang hadir bersama dalam matriks tepung gabah beras merah (Brodowska *et al.*, 2018).

Secara keseluruhan, data FTIR dalam penelitian ini memberikan bukti spektroskopik langsung yang mengkonfirmasi mekanisme oksidasi ozon pada matriks gabah beras merah yang disimpulkan dari data XRD, SEM, dan kadar pati: dimulai dari oksidasi lipid di lapisan perikarp pada konsentrasi rendah, berlanjut ke modifikasi rantai pati melalui pembentukan gugus karbonil pada konsentrasi sedang, dan mencapai intensitas penuh termasuk gangguan ikatan glikosidik pada konsentrasi 6 ppm, diikuti re-organisasi struktural parsial pada 8 ppm. Konvergensi bukti dari empat teknik analisis yang berbeda (kadar pati, XRD, SEM, dan FTIR) ini membangun dasar ilmiah yang kuat untuk karakterisasi pengaruh ozonisasi terhadap struktur kimia dan fisik gabah beras merah.

Data FTIR memberikan bukti pendukung bagi temuan XRD, SEM, dan kadar pati: perubahan gugus fungsi menunjukkan bahwa ozon pertama-tama menyerang komponen lemak pada lapisan luar gabah, kemudian merambah ke gugus hidroksil pati membentuk gugus karbonil baru, dan pada konsentrasi 6 ppm bahkan mengganggu ikatan penyusun rantai pati itu sendiri. Pada 8 ppm, sebagian

perubahan tersebut kembali mendekati kondisi awal, memperkuat dugaan bahwa terjadi penyusunan ulang struktur pada dosis tertinggi. Temuan ini menegaskan bahwa ozon bekerja secara bertahap, merambah dari lapisan terluar gabah menuju bagian dalamnya seiring meningkatnya konsentrasi yang diaplikasikan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini menguraikan mengenai; (5.1) Kesimpulan dan (5.2) Saran.

5.1 Kesimpulan

1. Hipotesis yang menduga bahwa konsentrasi ozon berpengaruh terhadap karakteristik fisik dan kimia gabah beras merah diterima sebagian, yaitu konsentrasi ozon berpengaruh nyata terhadap enam dari delapan parameter yang diamati (kadar pati, kadar antosianin, kristalinitas dan amorf/XRD, morfologi granula pati/SEM, profil gelatinisasi/RVA, dan gugus fungsi/FTIR), namun tidak berpengaruh nyata terhadap kadar air maupun *water activity* (a_w) pada seluruh taraf yang diuji.
2. Pengaruh ozon terhadap parameter fisik pati bersifat tidak linear, dengan kerusakan struktural paling ekstensif pada 6 ppm dan reorganisasi parsial pada 8 ppm.
3. Kadar antosianin menurun secara konsisten tanpa pemulihan pada seluruh taraf konsentrasi yang diuji.

5.2 Saran

1. Melibatkan analisis tambahan seperti distribusi berat molekul atau derajat polimerisasi pati untuk memperkuat pemahaman mekanistik mengenai fase reorganisasi struktural pati pada konsentrasi ozon tinggi.
2. Melakukan uji aplikatif pada skala pengolahan pangan, seperti pemasakan nasi atau pembuatan produk turunan berbasis beras merah, untuk mengonfirmasi dampak nyata perubahan profil gelatinisasi terhadap tekstur dan penerimaan konsumen.
3. Melakukan kajian keamanan pangan terkait kemungkinan residu atau produk oksidasi yang terbentuk akibat perlakuan ozon pada konsentrasi tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Almeida, R. L. J., Santos, N. C., Monteiro, S. S., Monteiro, S. S., Feitoza, J. V. F., de Almeida Mota, M. M., da Silva Eduardo, R., Sampaio, P. M., da Costa, G. A., de Bittencourt Pasquali, M. A., de Almeida Silva, R., Moreira, F. I. N., de Oliveira, L. M., dos Santos Pereira, T., de Queiroga, A. X. M., & Ribeiro, C. A. C. (2025). Synergistic Effect of Ozone Treatment with α -amylase on The Modification of Microstructure and Paste Properties of Japonica Rice Starch. *Food Chemistry*, 465, 142145. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142145>
- 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), 11–16. <https://doi.org/10.26874/jkk.v1i1.11>
- Anggraini, T., Dewi, Y. K., & Sayuti, K. (2017). Karakteristik *Sponge Cake* Berbahan Dasar Tepung Beras Merah, Hitam, dan Putih dari Beberapa Daerah di Sumatera Barat. *Jurnal Litbang Industri*, 7(2), 123. <https://doi.org/10.24960/jli.v7i2.3378.123-136>
- AOAC. (1992). *AOAC: Official Methods of Analysis (Volume 1) (Vol. 1, Issue Volume 1)*.
- AOAC. (2005). *Official Methods of Analysis, (18th)*. AOAC International, Gaithersburg, MD.
- Badan Pusat Statistik. (2025). *Statistik Indonesia 2025*. Jakarta Pusat: Badan Pusat Statistik.
- Badan Pusat Statistik. (2026). *Berita Resmi Statistik: Luas Panen dan Produksi Padi di Indonesia 2025 (Angka Tetap)*. Jakarta Pusat: Badan Pusat Statistik.
- Badan Standarisasi Nasional. (2015). *Beras: SNI 6128:2015*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Badan Standarisasi Nasional. (2023). *Gabah: SNI 224:2023*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Brodowska, A. J., Nowak, A., & Śmigielski, K. (2018). Ozone in The Food Industry: Principles of Ozone Treatment, Mechanisms of Action, and Applications: An Overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(13), 2176–2201. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1308313>
- 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(60), 101701. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101701>
- Epelle, E. I., Macfarlane, A., Cusack, M., Burns, A., Mackay, W., Collier, P., Leibovici, D., & Bhattacharyya, S. (2022). Ozone application in Different Industries: A Review of Recent Developments. *Chemical Engineering Journal*, 450, 138003.
- Farizha, I., Nurdjanah, S., Hidayati, S., & Nurainy, F. (2021). Tinjauan aplikasi teknologi ozon dalam pengolahan dan pengawetan produk pangan. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*, 32(2), 127–138.
- Fatahillah Pasaribu, S., Wiboworini, B., & Retna Kartikasari, L. (2021). Analysis of Anthocyanins and Flavonoids in Germinated Black Rice Extract. *Jurnal Dunia Gizi*, 4(1), 8–14. <https://ejournal.helvetia.ac.id/jdg>
- Gaspersz, V. (1995). *Teknik Analisa Dalam Penelitian Percobaan* (Edisi Pert). Penerbit Tarsito.
- 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>
- Graham, D. M. (1997). *Use of Ozone for Food Processing: 51(6)*. Food Technology.
- Hernawan, E., & Meylani, V. (2016). Analisis Karakteristik Fisikokimia Beras Putih, Beras Merah dan Beras Hitam (*Oryza sativa* L., *Oryza nivara* dan *Oryza sativa* L. indica). *Jurnal Kesehatan Bakti Tunas Husada*, 15(1), 79–91.
- Hou, Z., Qin, P., Zhang, Y., Cui, S., & Ren, G. (2013). Identification of Anthocyanins Isolated from Black Rice (*Oryza sativa* L.) and Their Degradation Kinetics. *Food Research International*, 50(2), 691–697. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.07.037>
- Indrasari, S. D., Wibowo, P., & Purwani, E. Y. (2010). Evaluasi Mutu Fisik, Mutu Giling, dan Kandungan Antosianin Kultivar Beras Merah. *Jurnal Penelitian Pertanian Tanaman Pangan*, 29(1).
- IFT. (2015). Ozone Processing of Foods and Beverages. *Food Technology Magazine*, November 2015. <https://www.ift.org>
- IRRI. (1996). *Strandard Evaluation System for Rice* (Edition 4). IRRI.
- Jumali, J., Handoko, D. D., & Indrasari, S. D. (2020). Pengaruh Cara Pengeringan Gabah terhadap Mutu Fisik, Fisikokimia, dan Organoleptik Beras Varietas Unggul Padi. *Jurnal Penelitian Pertanian Tanaman Pangan*, 4(2), 97. <https://doi.org/10.21082/jpptp.v4n2.2020.p97-103>
- Kaur, K., Kaur, P., Kumar, S., Zalpouri, R., & Singh, M. (2023a). 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>
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2017). *Tabel Komposisi Pangan Indonesia (TKPI) 2017*.
- Laboratorium X-Ray, D. (2020). *Standard Operating Procedure X-Ray Diffractometer (SOP) Rev 1.0*.
- Lee, H.-S., Jo, S.-H., Kim, J.-H., Yang, S.-Y., Baek, J.-K., Song, Y.-S., Chung, N.-J., Kim, H.-Y., & Shon, J. (2025). Impact of heat and ozone stress on rice growth and productivity: Interactive and mitigating effects. *Science of the Total Environment*.
- Lee, M. J., Kim, M. J., Kwak, H. S., Lim, S.-T., & Kim, S. S. (2017). Effects of Ozone Treatment on Physicochemical Properties of Korean Wheat Flour. *Food Science and Biotechnology*, 26(2), 435–440. <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0059-5>
- Lestari, S., & Kurniawan, F. (2021b). Pemutuan Fisik Gabah dan Beras Menurut Standar Nasional Indonesia (SNI). *Agriprima : Journal of Applied Agricultural Sciences*, 5(2), 159–168. <https://doi.org/10.25047/agriprima.v5i2.438>
- Leviana, W., & Paramita, V. (2017). Pengaruh suhu terhadap kadar air dan aktivitas air dalam bahan pangan dengan kadar air yang berbeda. *Inovasi Teknik Kimia*, 2(2), 34–38.
- Li, Z., & Ahammed, G. J. (2023). Plant stress response and adaptation via anthocyanins: A review. *Plant Stress*, 10, 100230. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100230>
- Loypimai, P., Moongngarm, A., & Chottanom, P. (2016). Thermal and pH Degradation Kinetics of Anthocyanins in Natural Food Colorant Prepared from Black Rice Bran. *Journal of Food Science and Technology*, 53(1), 461–470. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2002-1>
- Makarim, A. K., & Suhartatik, E. (2009). Morfologi dan Fisiologi Tanaman Padi. *Sukamandi-Subang Balai Besar Penelitian Tanaman Padi, Balitbangtan, Kementerian Pertanian RI*.
- 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*, 9, 100334. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100334>
- Mawaddah, Purwoko, B. S., Dewi, I. S., & Wurnas, D. (2018). Karakterisasi Sifat Agronomi Tanaman Padi Beras Merah Dihaploid Berpotensi Hasil Tinggi Diperoleh melalui Kultur Antera Antera. *Jurnal Agronomi Indonesia (Indonesian Journal of Agronomy)*, 46(2), 126. <https://doi.org/10.24831/jai.v46i2.16249>

- Mukaromah, U., Susilowati, A., & Widyastuti, S. (2022). Pengaruh kadar air gabah terhadap rendemen dan mutu beras giling pada berbagai varietas padi. *Jurnal Pengolahan Hasil Pertanian Indonesia*, 25(1), 45–52.
- Helmyati, S. et al. (2022). *Substitution of local Indonesian varieties of brown rice on anthropometry and blood glucose level improvement in type 2 DM patients: A pilot project*.
- Obadi, M., Zhu, K. X., Peng, W., Sulieman, A. A., Mohammed, K., & Zhou, H. M. (2018). Effects of Ozone Treatment on The Physicochemical and Functional Properties of Whole Grain Flour. *Journal of Cereal Science*, 81, 127–132. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.04.008>
- 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>
- Pranoto, Y., Paramita, B. L., Cahyanto, M. N., & Benjakul, S. (2021). Properties of ozone-oxidized tapioca starch and its use in coating of fried peanuts. *Molecules*, 26(20), 6281. <https://doi.org/10.3390/molecules26206281>
- Prasetyaningrum, A., Bramantiya, M., Meidianto, A., Saputra, P., Qonita, F. D., & Ardiana, N. S. (2017). Prototype Penyimpanan Buah dan Sayur Menggunakan Ozon dan Metode Evaporative Cooling sebagai Sistem Pendingin. 6(1), 31–35.
- Priska, M., Peni, N., Carvallo, L., & Ngapa, Y. D. (2018). Antosianin dan Pemanfaatannya. *Indonesian E-Journal of Applied Chemistry*, 47(11), 3193–3199.
- Ramos, G. V. C., Branco, I. G., da Matta Junior, M. D., Ferreira, J. A., Ditchfield, C., Sobral, P. J. do A., & 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>
- Rapid Visco Analyzer (RVA)*. (1994). Manual Book.
- Rohmah, M., Saragih, B., Utami, R. R., Sari, K., & Rahmadi, A. (2022). Struktur Kristal, Morfologi, Gugus Fungsi, Proksimat, Polifenol, Flavonoid, Tannin dan Aktivitas Antioksidan dari Bubuk Daun Mekai (*Pycnarrhena tumefacta* Miers). *Jurnal Industri Hasil Perkebunan*, 17(2), 68. <https://doi.org/10.33104/jihp.v17i2.7808>
- Rusmono, M., & Aminudin. (2022). Machine Configuration Pattern and Milling Yield in Small Rice Milling Business (PPK): A Case Study in West Java Province. *Jurnal Pangan*, 31(3), 217–232.
- Septianingrum, E., & Kusbiantoro, B. (2017). *Upaya Memperpanjang Umur Simpan (Shelf Life) Gabah atau Beras Melalui Pengendalian terhadap Faktor-Faktor Penyimpanan dan Metode Penyimpanannya. Dalam: Padi: Inovasi*

Teknologi Produksi. Sukamandi: Balai Besar Penelitian Tanaman Padi. 329–348.

- Septianingrum, E., Liyanan, & Kusbiantoro, B. (2016). Review Indeks Glikemik Beras: Faktor-Faktor yang Mempengaruhi dan Keterkaitannya terhadap Kesehatan Tubuh Rice Glycemic Index: The Factors Affecting and The Impact on Human Health. *Jurnal Kesehatan, 1*, 1–9.
- 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*(3), 1525–1533. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1111-y>
- Shao, Y., Fang, C., Zhang, H., Shi, Y., Hu, Z., & Zhu, Z. (2017). Variation of Phenolics, Tocols, Antioxidant Activities, and Soluble Sugar Compositions in Red and Black Rice (*Oryza sativa* L.) During Boiling. *Cereal Chemistry, 94*(5), 811–819. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-04-17-0076-R>
- Sharma, R., Singh, A., & Sharma, S. (2021). Influence of ozonation on cereal flour functionality and dough characteristics: A review. *Ozone: Science & Engineering, 43*(6), 613–636. <https://doi.org/10.1080/01919512.2021.1898337>
- Sivaranjani, S., Prasath, V. A., Pandiselvam, R., Kothakota, A., & Mousavi Khaneghah, A. (2021). Recent Advances in Applications of Ozone in The Cereal Industry. *Lwt, 146*(March), 111412. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111412>
- 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>
- Sudarmadji, S., B, H., & Suhardi. (1997). *Prosedur Analisa untuk Bahan Makanan dan Pertanian*. Liberty.
- Suliartini, N. W. S., Sadimantara, G. R., Wijayanto, T., & Muhidin. (2011). Pengujian Kadar Antosianin Padi Gogo Beras Merah Hasil Koleksi Plasma Nutfah Sulawesi tenggara. *Crop Agro, 4*(2), 43–48.
- 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>
- Suprihatno, Bambang., Daradjat, A., Satoto, SE, B., Setyono, A., Indrasari, S. D., Wardana, I. P., & Sembiring, H. (2010). *Deskripsi Varietas Padi*. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Balai Besar Penelitian Tanaman Padi.

- Suryanugraha, W. A., Supriyanta, S., & Kristamtini, K. (2017). Keragaan Sepuluh Kultivar Padi Lokal (*Oryza sativa* L.) Daerah Istimewa Yogyakarta. *Vegetalika*, 6(4), 55. <https://doi.org/10.22146/veg.30917>
- Sweeney, M., & McCouch, S. (2007). The Complex History of the Domestication of Rice. *Annals of Botany*, 100(5), 951–957. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm128>
- Syafarudin, A., & Novia. (2013). Produksi Ozon dengan Bahan Baku Oksigen menggunakan Alat Ozon Generator. In *Jurnal Teknik Kimia* (Vol. 19, Number 2).
- Syafutri, M. I., Syaiful, F., Lidiasari, E., & Pusvita, D. (2020). Pengaruh Lama dan Suhu Pengeringan Terhadap Karakteristik. *Agrosainstek*, 4(2), 103–111.
- Tiwari, B. K., O'Donnell, C. P., Patras, A., Brunton, N., & Cullen, P. J. (2009). Anthocyanins and color degradation in ozonated grape juice. *Food and Chemical Toxicology*, 47(11), 2824–2829. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2009.09.004>
- 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.2008.10.002>
- Tjahjanto, R. T., Wardhani, S., & Anggraini, U. (2012). *Studi Sintesis Ozon Dengan Metode Lucutan Plasma*. 1(April), 1–2.
- Wen, Q., Zhang, C., Li, H., Pei, F., Bao, J., & Zhang, Y. (2016). Effect of Ozone Treatment on Deoxynivalenol and Wheat Quality. *PLoS ONE*, 10(12), e0145361. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0145361>
- Whaib, E. S., & Mousa, M. A. (2022). The Impact of Ozone Gas Treatment on The Amylose/Amylopectin Ratio in Iraqi Jasmine Rice Grains. *Eurasian Chemical Communications*, 4(9), 870–876. <https://doi.org/10.22034/ecc.2022.337823.1408>
- Yamashita, C., Moraes, I. C. F., Haminiuk, C. W. I., Branco, C. C. Z., Ferreira, A. G., Negreiros, A. T., Mayer, C. R. M., & Branco, I. G. (2026). Complexation of anthocyanin-rich blackberry extract with ozonated sodium alginate: Structural, rheological, and color insights. *Journal of Food Science*, 91(2), e70869. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70869>
- Yasmin, Y., Purwanto, E. H., & Erika, C. (2023). Studi Tentang Perubahan Warna Selama Proses Pengolahan Biji Kakao Menjadi Coklat Batang Jenis Dark Chocolate (Study of Color Changes during the Processing of Cocoa Beans into Dark Chocolate Bars). *JFP Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*, 8(4), 501–506. www.jim.unsyiah.ac.id/JFP
- Zhu, F. (2018). Effect of Ozone Treatment on The Quality of Grain Products. *Food Chemistry*, 264, 358–366. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.047>

LAMPIRAN

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

Sampel yang digunakan adalah bubuk ekstrak kulit manggis. Kaca arloji dimasukkan terlebih dahulu ke dalam oven bersuhu 105°C selama 30 menit, kemudian dibiarkan di luar selama 5 menit, setelah itu dimasukkan ke dalam desikator selama 10 menit. Proses tersebut kemudian diulangi beberapa kali hingga berat tetap konstan untuk menentukan kadar air menggunakan metode gravimetri. Selanjutnya sampel ekstrak kulit manggis yang ditimbang berat gramnya, dimasukkan ke dalam kaca arloji dengan berat konstan, dan dimasukan ke dalam oven pada suhu 105°C selama 2 jam. Setelah itu dimasukkan ke dalam desikator selama 5-10 menit. Beratnya kemudian dihitung dan proses diulangi sampai beratnya tetap konstan.

Kadar air dapat dihitung dengan rumus berikut:

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

Keterangan :

W0 = Berat cawan kosong konstan

W1 = Berat cawan konstan + sampel

W2 = Berat cawan dan sampel konstan

Lampiran 2. Prosedur Analisis Kadar Pati Metode Luff Schoorl (AOAC, 1992)

Sampel sebanyak 0,5 gram ditimbang dan dimasukan kedalam erlenmeyer 500 mL, lalu ditambahkan dengan 200 mL aquadest dan 15 mL HCl pekat. Lalu panaskan selama 2,5 jam (jaga volume tetap 200 mL dengan penambahan aquadest). Setelah dipanaskan kemudian dinginkan di air mengalir tambahkan indikator phenoftalin dan NaOH 30% hingga warna merah muda (jika berlebihan NaOH dinetralkan dengan HCl 9,5 N. Kemudian pindahkan dalam labu takar 500 ml dan tanda bataskan dengan aquadest (larutan sampel C). Dari larutan sampel C dipipet sebanyak 10 ml masukkan dalam erlenmeyer, ditambahkan 15 ml aquadest

dan 10 ml reagen Luff Schoorl. Direfluks selama 15 menit, lalu dinginkan di air mengalir. Setelah dingin tambahkan 15 ml H₂SO₄ dan 1 gram KI. Kemudian dititrasi dengan Na₂S₂O₃ 0,1 N hingga warna kuning mentah (pucat) atau kuning jerami kemudian tambakan 1 ml amylum 1 % homogenkan dan dititrasi kembali menggunakan Na₂S₂O₃ 0,1 N hingga titik akhir titrasi larutan biru hilang atau berwarna putih.

Kadar pati dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$\text{ml Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = \frac{(Vb - Vs)[L] \times N \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}{0,1}$$

$$\text{Kadar Pati (\%)} = \frac{(\text{mg gula (tabel)}) \times FP \times 0,9}{W_s \times 1000} \times 100$$

Lampiran 3. Prosedur Analisis Nilai *Water Activity* (a_w) (Afistia, 2024)

Analisis ini menggunakan alat yang dinamakan *water activity meter*. Prinsip dari alat ini adalah menghitung tekanan uap air dari bahan dibagi dengan air murni pada suhu yang sama. Sebanyak 1 gram sampel tepung beras hitam pecah kulit ditempatkan dalam wadah uji dan ditunggu 5 menit. Secara otomatis alat tersebut akan menghitung nilai a_w tepung beras hitam pecah kulit. Proses pengukuran selesai setelah angka keluar yang menyatakan nilai a_w pada tepung beras hitam pecah kulit.

Lampiran 4. Prosedur Analisis Antosianin menggunakan Metode pH Differential (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 (± 25 °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

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 pHmeter 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).

$$A = (A_{\lambda vis-maks} - A_{700})_{pH1,0} - (A_{\lambda vis-maks} - A_{700})_{pH4,5}$$

Keterangan:

$$A = \text{Absorban}$$

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

A = Absorban

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

FP = Faktor pengenceran

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

b = Tebal kuvet = 1

1000 = Faktor konversi untuk perhitungan dalam mg/L sampel

Lampiran 5. Prosedur Analisis Profil Gelatinisasi menggunakan Rapid Visco Analyzer (RVA) (Rapid Visco Analyzer (RVA), 1994)

Sebanyak 3 gram tepung dilarutkan pada 25 mL aquadest dan diaduk hingga homogen. Selanjutnya sampel dimasukkan kedalam RVA setelah proses pada RVA selesai, kurva amilografi dari sampel akan muncul di layar monitor. Pada kurva amilografi yang muncul di layar monitor, dapat diketahui nilai *pasting temperature* (TP), *peak viscosity* (PV), *minimum viscosity* (MV), *final viscosity* (FV), dan *time to peak* (Ptime). Pengukuran profil gelatinisasi dengan RVA menggunakan rentang suhu 50-95°C, kecepatan pengadukan 160 rpm selama 13 menit. Proses analisis menggunakan RVA yaitu pada menit ke-0 suhu yang diberikan pada sampel 50°C dengan kecepatan 960 rpm selama 10 detik. Selanjutnya kecepatan putar diturunkan menjadi 160 rpm hingga akhir proses. Pada waktu 4 menit 42 detik suhu dinaikkan menjadi 95°C hingga menit ke-11. Kemudian suhu diturunkan kembali menjadi 50°C selama 2 menit.

Lampiran 6. Prosedur Analisis Gugus Fungsi menggunakan Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy (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 7. Prosedur Analisis Kristalinitas dan Amorf menggunakan X-Ray Diffractometer (XRD) (Laboratorium X-Ray, 2020)

Menyiapkan sampel yang akan dianalisis, kemudian merekatkannya pada kaca dan memasang pada tempatnya berupa lempeng tipis berbentuk persegi panjang (sampel *holder*) dengan lilin perekat. Memasang sampel yang telah disimpan pada sampel holder kemudian meletakkannya pada sampel stand dibagian goniometer. Memasukkannya 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. 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. 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 data diperoleh analisis kualitatif dengan menggunakan search match analysis, yaitu membandingkan data yang diperoleh dengan data standar (Power Diffraction File database = database PDF).

Lampiran 8. Prosedur Analisis Morfologi Granula Pati menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) (Rohmah *et al.*, 2022)

Scanning Electron Microscopy (SEM) dilakukan untuk analisis mikroskopis produk. Sampel ditempelkan pada *sample holder* aluminium lalu 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 9. Perhitungan Kebutuhan Sampel

Tabel 21. Perhitungan Kebutuhan Sampel

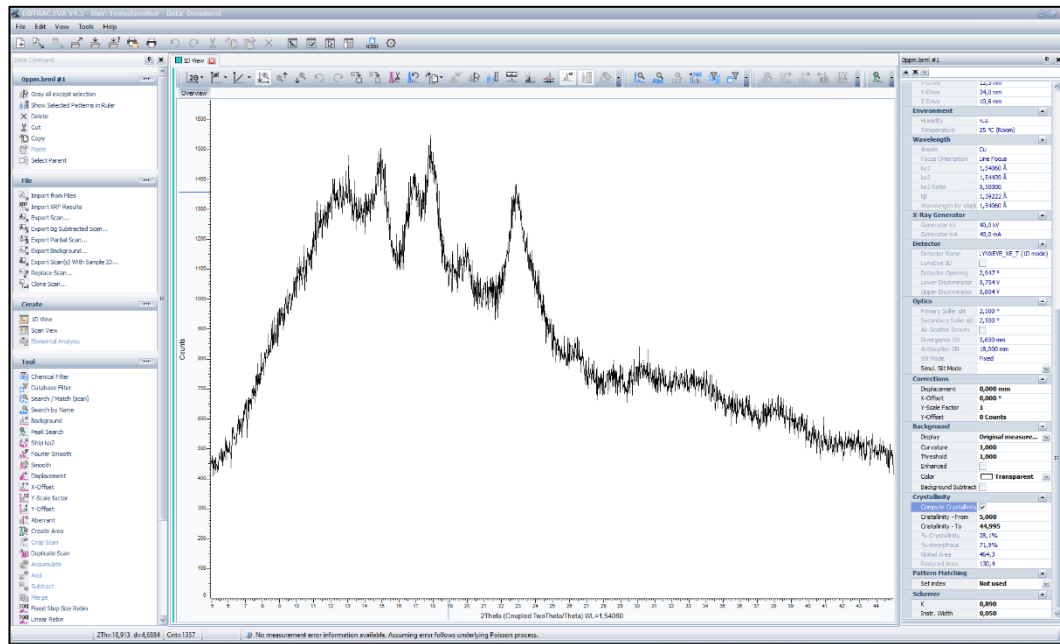
No.	Analisis	Bahan	Kebutuhan	Jumlah (gram)
1.	Kadar Air	Gabah Beras Merah	1 gram x 15 sampel	15
2.	Kadar Pati	Gabah Beras Merah	1 gram x 15 sampel	15
3.	Kadar Antosianin	Gabah Beras Merah	5 gram x 15 sampel	75
4.	<i>Water Activity</i> (a_w)	Gabah Beras Merah	2 gram x 15 sampel	30
5.	Profil Gelatinisasi (RVA)	Gabah Beras Merah	4 gram x 15 sampel	60
6.	Gugus Fungsi (FTIR)	Gabah Beras Merah	1 gram x 5 sampel	5
7.	Kristalinitas dan Amorf (XRD)	Gabah Beras Merah	1 gram x 5 sampel	5
8.	Morfologi Granula Pati (SEM)	Gabah Beras Merah	1 gram x 5 sampel	5
Total				210

Lampiran 10. Kebutuhan Bahan Penelitian

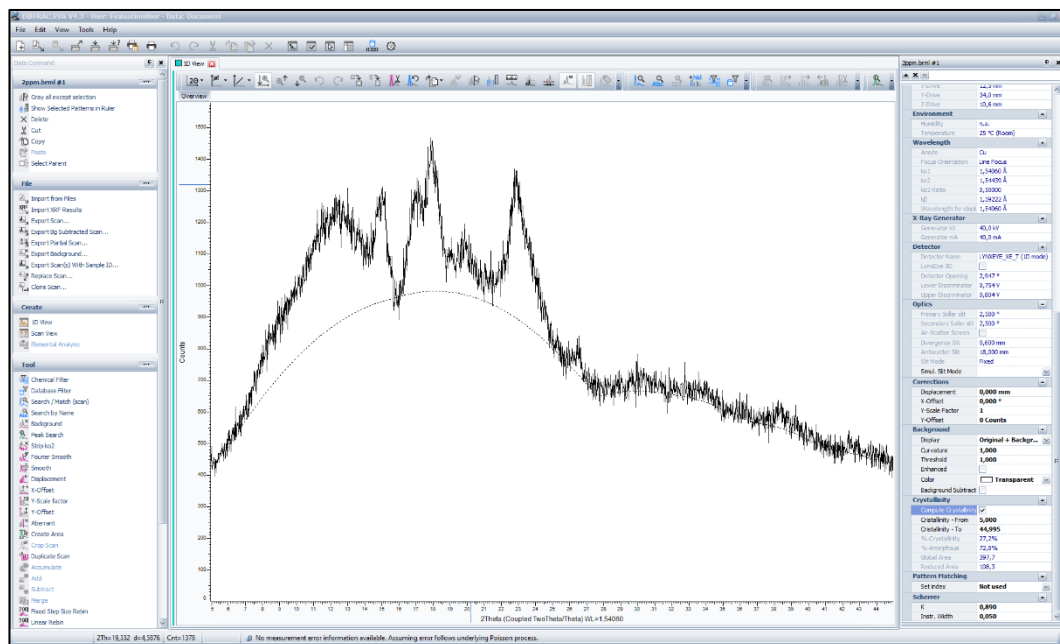
Tabel 22. Kebutuhan Bahan Penelitian

No.	Nama Bahan	Harga	Keterangan	Jumlah	Total
1.	Gabah Beras Merah	Rp15.000	kg	1	Rp15.000
Total					Rp15.000

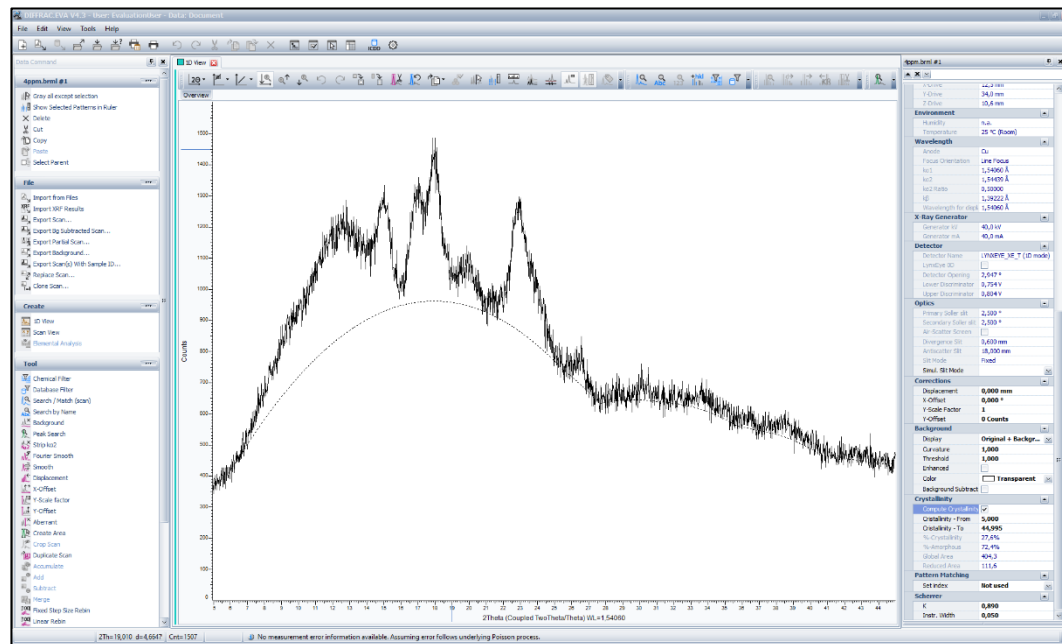
Lampiran 11. Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf (XRD) pada Berbagai Konsentrasi Ozon



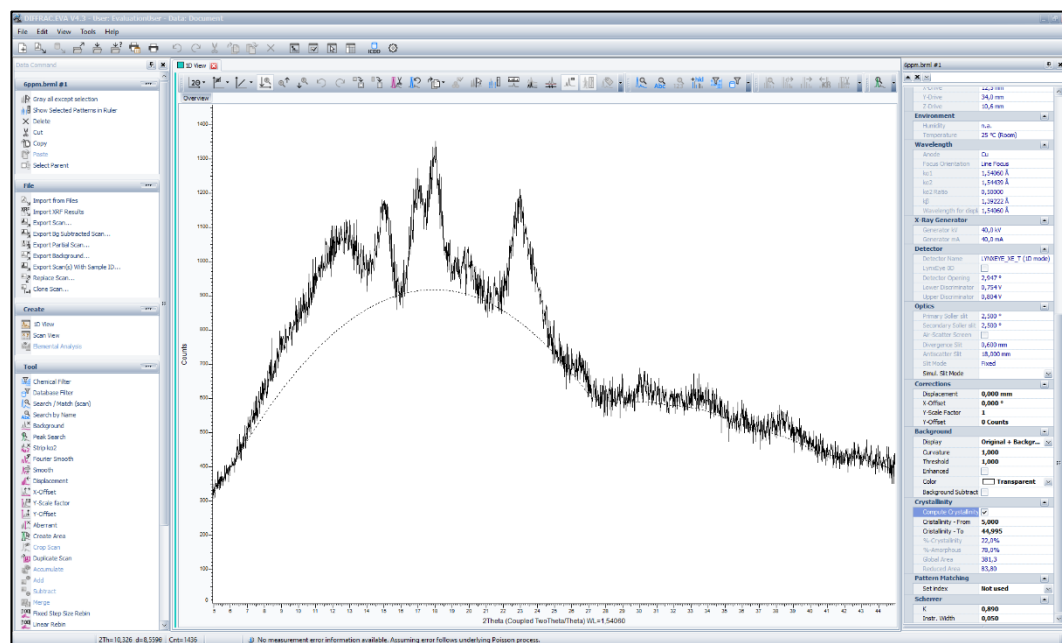
Gambar 10. Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf (XRD) Gabah Beras Merah pada Konsentrasi 0 ppm (a1)



Gambar 11. Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf (XRD) Gabah Beras Merah pada Konsentrasi 2 ppm (a2)



Gambar 12. Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf (XRD) Gabah Beras Merah pada Konsentrasi 4 ppm (a3)



Gambar 13. Grafik Analisis Kristalinitas dan Amorf (XRD) Gabah Beras Merah pada Konsentrasi 6 ppm (a4)

Lampiran 12. Hasil Analisis Kadar Air

Tabel 23. Hasil Analisis Respon Kimia Kadar Air

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	11,04	11,07	11,14	33,26	11,09	0,05
2 ppm (a2)	11,12	11,17	11,16	33,44	11,15	0,02
4 ppm (a3)	10,89	11,07	11,17	33,12	11,04	0,14
6 ppm (a4)	10,71	11,18	11,47	33,36	11,12	0,38
8 ppm (a5)	11,06	11,18	11,16	33,39	11,13	0,06
Jumlah	54,83	55,66	56,09	166,57		
Rata-Rata	10,97	11,13	11,22			

Perhitungan ANAVA Kadar Air:

$$\begin{aligned}
 FK &= \frac{(Total)^2}{\sum Ulangan \times \sum Sampel} \\
 &= \frac{(166,57)^2}{5 \times 3} \\
 &= 1849,674
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKK &= \frac{(\sum K1)^2 + (\sum K2)^2 + (\sum K3)^2}{\sum Sampel} - FK \\
 &= \frac{(54,83)^2 + (55,66)^2 + (56,09)^2}{5} - 1849,674 \\
 &= 0,164291
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKP &= \frac{(\sum a1)^2 + (\sum a2)^2 + (\sum a3)^2 + (\sum a4)^2 + (\sum a5)^2}{\sum Ulangan} - FK \\
 &= \frac{(33,26)^2 + (33,44)^2 + (33,12)^2 + (33,36)^2 + (33,39)^2}{3} - 1849,674 \\
 &= 0,021494
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKT &= ((n_1)^2 + (n_2)^2 + \dots + (n_n)^2) - FK \\
 &= ((11,04)^2 + (11,07)^2 + \dots + (11,16)^2) - 1849,674 \\
 &= 0,363298
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKG &= JKT - JKP - JKK \\
 &= 0,363298 - 0,021494 - 0,164291 \\
 &= 0,177512
 \end{aligned}$$

Tabel 24. Analisis Variasi (ANAVA) Kadar Air

Sumber Variasi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F Tabel 5%	Notasi
Kelompok	2	0,164291	0,082146	3,702 ^{tn}	4,46	tn
Perlakuan	4	0,021494	0,005374	0,242 ^{tn}	3,84	tn
Galat	8	0,177512	0,022189			
Total	14	0,363298				

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel ANAVA analisis respon kimia kadar air diketahui bahwa nilai F Hitung untuk faktor perlakuan (konsentrasi ozon) sebesar $0,242 < F \text{ Tabel}$ pada taraf 5% sebesar 3,84 dan nilai F Hitung untuk faktor kelompok sebesar $3,702 < \text{dari } F \text{ Tabel}$ pada taraf 5% sebesar 4,46. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon maupun faktor kelompok tidak memberikan pengaruh nyata terhadap respon kimia kadar air gabah beras merah. Oleh karena itu, tidak perlu dilakukan uji lanjut Duncan.

Lampiran 13. Hasil Analisis Kadar Pati

Tabel 25. Data Hasil Analisis Kadar Pati

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	65,34	64,10	66,19	195,63	65,21	1,05
2 ppm (a2)	64,23	64,23	61,95	190,41	63,47	1,32
4 ppm (a3)	64,17	62,99	62,01	189,17	63,06	1,08
6 ppm (a4)	62,07	62,99	61,95	187,01	62,34	0,57
8 ppm (a5)	62,07	60,90	60,71	183,68	61,23	0,74
Jumlah	317,88	315,22	312,80	945,90		
Rata-Rata	63,58	63,04	62,56			

Perhitungan ANAVA Kadar Pati:

$$\begin{aligned}
 FK &= \frac{(Total)^2}{\sum Ulangan \times \sum Sampel} \\
 &= \frac{(945,90)^2}{5 \times 3} \\
 &= 59648,058
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKK &= \frac{(\sum K1)^2 + (\sum K2)^2 + (\sum K3)^2}{\sum Sampel} - FK \\
 &= \frac{(317,88)^2 + (315,22)^2 + (312,80)^2}{5} - 59648,058 \\
 &= 2,578839
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKP &= \frac{(\sum a1)^2 + (\sum a2)^2 + (\sum a3)^2 + (\sum a4)^2 + (\sum a5)^2}{\sum Ulangan} - FK \\
 &= \frac{(195,63)^2 + (190,41)^2 + (189,17)^2 + (187,01)^2 + (183,68)^2}{3} - 59648,058 \\
 &= 26,041626
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKT &= ((n_1)^2 + (n_2)^2 + \dots + (n_n)^2) - FK \\
 &= ((65,34)^2 + (64,10)^2 + \dots + (60,71)^2) - 59648,058 \\
 &= 35,798973
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKG &= JKT - JKP - JKK \\
 &= 35,798973 - 26,041626 - 2,578839 \\
 &= 7,178508
 \end{aligned}$$

Tabel 26. Analisis Variasi (ANAVA) Kadar Pati

Sumber Variasi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F Tabel 5%	Notasi
Kelompok	2	2,578839	1,289420	1,437 ^{tn}	4,46	tn
Perlakuan	4	26,041626	6,510406	7,255 [*]	3,84	*
Galat	8	7,178508	0,897313			
Total	14	35,798973				

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel ANAVA analisis kadar pati diketahui bahwa nilai F Hitung untuk faktor perlakuan (konsentrasi ozon) sebesar $7,255 > F$ Tabel pada taraf 5% sebesar 3,84, sedangkan nilai F Hitung untuk faktor kelompok sebesar $1,437 <$ dari F Tabel pada taraf 5% sebesar 4,46. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon memberikan pengaruh nyata terhadap respon kimia kadar pati gabah beras merah sedangkan faktor kelompok tidak berpengaruh nyata terhadap respon kimia kadar pati gabah beras merah. Oleh karena itu, perlu dilakukan uji lanjut Duncan.

$$S_y = \sqrt{\frac{KTG}{r}} = \sqrt{\frac{0,897}{3}} = 0,547$$

Tabel 27. Hasil Uji Lanjut Duncan Kadar Pati

SSR 5%	LSR%	Rata-Rata	Kode Perlakuan	Perlakuan					Tarf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	61,23	a5	-					a
3,26	1,78291	62,34	a4	1,11 ^{tn}	-				a
3,39	1,85401	63,06	a3	1,83 ^{tn}	0,72 ^{tn}	-			ab
3,47	1,89776	63,47	a2	2,24 [*]	1,13 ^{tn}	0,41 ^{tn}	-		bc
3,52	1,92510	65,21	a1	3,98 [*]	2,88 [*]	2,16 [*]	1,74 ^{tn}	-	c

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan:

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

Lampiran 14. Hasil Analisis *Water Activity* (a_w)

Tabel 28. Data Hasil Analisis *Water Activity* (a_w)

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a_1)	0,77	0,74	0,79	2,30	0,77	0,03
2 ppm (a_2)	0,77	0,78	0,74	2,29	0,76	0,02
4 ppm (a_3)	0,76	0,73	0,78	2,27	0,76	0,02
6 ppm (a_4)	0,75	0,78	0,74	2,26	0,75	0,02
8 ppm (a_5)	0,75	0,73	0,76	2,23	0,74	0,02
Jumlah	3,79	3,76	3,80	11,35		
Rata-Rata	0,76	0,75	0,76			

Perhitungan ANAVA *Water Activity* (a_w):

$$\begin{aligned}
 FK &= \frac{(Total)^2}{\sum Ulangan \times \sum Sampel} \\
 &= \frac{(11,35)^2}{5 \times 3} \\
 &= 8,592707
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKK &= \frac{(\sum K1)^2 + (\sum K2)^2 + (\sum K3)^2}{\sum Sampel} - FK \\
 &= \frac{(3,79)^2 + (3,76)^2 + (3,80)^2}{5} - 8,592707 \\
 &= 0,000216
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKP &= \frac{(\sum a1)^2 + (\sum a2)^2 + (\sum a3)^2 + (\sum a4)^2 + (\sum a5)^2}{\sum Ulangan} - FK \\
 &= \frac{(2,30)^2 + (2,29)^2 + (2,27)^2 + (2,26)^2 + (2,23)^2}{3} - 8,592707 \\
 &= 0,000987
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKT &= ((n_1)^2 + (n_2)^2 + \dots + (n_n)^2) - FK \\
 &= ((0,77)^2 + (0,74)^2 + \dots + (0,76)^2) - 8,592707 \\
 &= 0,005618
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKG &= JKT - JKP - JKK \\
 &= 0,005618 - 0,000987 - 0,000216 \\
 &= 0,004415
 \end{aligned}$$

Tabel 29. Analisis Variasi (ANAVA) *Water Activity* (a_w)

Sumber Variasi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F Tabel 5%	Notasi
Kelompok	2	0,000216	0,000108	0,196 ^{tn}	4,46	tn
Perlakuan	4	0,000987	0,000247	0,447 ^{tn}	3,84	tn
Galat	8	0,004415	0,000552			
Total	14	0,005618				

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel ANAVA analisis respon kimia *water activity* (a_w) diketahui bahwa nilai F Hitung untuk faktor perlakuan (konsentrasi ozon) sebesar $0,447 < F$ Tabel pada taraf 5% sebesar 3,84 dan nilai F Hitung untuk faktor kelompok sebesar $0,196 < F$ Tabel pada taraf 5% sebesar 4,46. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon maupun faktor kelompok tidak memberikan pengaruh nyata terhadap respon *water activity* (a_w) gabah beras merah. Oleh karena itu, tidak perlu dilakukan uji lanjut Duncan.

Lampiran 15. Hasil Analisis Kadar Antosianin

Tabel 30. Data Hasil Analisis Kadar Antosianin

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	43,15	44,52	45,45	133,12	44,37	1,16
2 ppm (a2)	42,28	37,77	38,34	118,40	39,47	2,46
4 ppm (a3)	38,24	38,54	36,20	112,98	37,66	1,27
6 ppm (a4)	33,23	33,70	32,90	99,83	33,28	0,40
8 ppm (a5)	27,32	27,22	27,22	81,76	27,25	0,06
Jumlah	184,22	181,75	180,11	546,09		
Rata-Rata	36,84	36,35	36,02			

Perhitungan ANAVA Kadar Antosianin:

$$\begin{aligned}
 FK &= \frac{(Total)^2}{\sum Ulangan \times \sum Sampel} \\
 &= \frac{(546,09)^2}{5 \times 3} \\
 &= 19880,729
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKK &= \frac{(\sum K1)^2 + (\sum K2)^2 + (\sum K3)^2}{\sum Sampel} - FK \\
 &= \frac{(184,22)^2 + (181,75)^2 + (180,11)^2}{5} - 19880,729 \\
 &= 1,710
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKP &= \frac{(\sum a1)^2 + (\sum a2)^2 + (\sum a3)^2 + (\sum a4)^2 + (\sum a5)^2}{\sum Ulangan} - FK \\
 &= \frac{(133,12)^2 + (118,40)^2 + (112,98)^2 + (99,83)^2 + (81,76)^2}{3} - 19880,729 \\
 &= 504,052
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKT &= ((n_1)^2 + (n_2)^2 + \dots + (n_n)^2) - FK \\
 &= ((43,15)^2 + (44,52)^2 + \dots + (27,22)^2) - 19880,729 \\
 &= 552,366
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKG &= JKT - JKP - JKK \\
 &= 552,366 - 504,052 - 1,710 \\
 &= 16,603
 \end{aligned}$$

Tabel 31. Analisis Variasi (ANAVA) Kadar Antosianin

Sumber Variasi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F Tabel 5%	Notasi
Kelompok	2	1,711	0,855	0,412 ^{tn}	4,46	tn
Perlakuan	4	504,052	126,013	60,719*	3,84	*
Galat	8	16,603	2,075			
Total	14	522,366				

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel ANAVA analisis kadar antosianin diketahui bahwa nilai F Hitung untuk faktor perlakuan (konsentrasi ozon) sebesar $60,719 > F$ Tabel pada taraf 5% sebesar 3,84, sedangkan nilai F Hitung untuk faktor kelompok sebesar $0,412 <$ dari F Tabel pada taraf 5% sebesar 4,46. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon memberikan pengaruh nyata terhadap respon kimia kadar antosianin gabah beras merah sedangkan faktor kelompok tidak berpengaruh nyata terhadap respon kimia kadar antosianin gabah beras merah. Oleh karena itu, perlu dilakukan uji lanjut Duncan.

$$S_y = \sqrt{\frac{KTG}{r}} = \sqrt{\frac{2,075}{3}} = 0,832$$

Tabel 32. Uji Lanjut Duncan Kadar Antosianin

SSR 5%	LSR%	Rata-Rata	Kode Perlakuan	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	27,25	a5	-					a
3,26	2,71	33,28	a4	6,02*	-				b
3,39	2,82	37,66	a3	10,41*	4,39*	-			c
3,47	2,89	39,47	a2	12,21*	6,19*	1,80 ^{tn}	-		c
3,52	2,93	44,37	a1	17,12*	11,10*	6,71*	4,91*	-	d

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan:

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

Lampiran 16. Hasil Analisis Profil Gelatinisasi (RVA)

Tabel 33. Data Hasil Analisis *Peak Viscosity* Profil Gelatinisasi (RVA)

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	313	321	317	951	317	4
2 ppm (a2)	234	240	237	711	237	3
4 ppm (a3)	169	173	171	513	171	2
6 ppm (a4)	196	200	198	594	198	2
8 ppm (a5)	184	187	187	558	186	2
Jumlah	1096	1121	1110	3327		
Rata-Rata	219	224	222			

Tabel 34. Analisis Variasi (ANAVA) *Peak Viscosity* Profil Gelatinisasi (RVA)

Sumber Variasi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F Tabel 5%	Notasi
Kelompok	2	62,8	31,4	27,30*	4,46	*
Perlakuan	4	41168,4	10292,1	8949,65*	3,84	*
Galat	8	9,2	1,15			
Total	14	41240,4				

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel ANAVA analisis *peak viscosity* diketahui bahwa nilai F Hitung untuk faktor perlakuan (konsentrasi ozon) sebesar $8949,65 > F$ Tabel pada taraf 5% sebesar 3,84, sedangkan nilai F Hitung untuk faktor kelompok sebesar $27,30 > F$ Tabel pada taraf 5% sebesar 4,46. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon memberikan pengaruh nyata terhadap respon fisik *peak viscosity* gabah beras merah dan faktor kelompok juga berpengaruh nyata terhadap respon fisik *peak viscosity* gabah beras merah. Oleh karena itu, perlu dilakukan uji lanjut Duncan.

Tabel 35. Uji Lanjut Duncan Analisis *Peak Viscosity* Profil Gelatinisasi (RVA)

SSR 5%	LSR%	Rata-Rata	Kode Perlakuan	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	513	a3	-					a
3,26	2,02	558	a5	45*	-				b
3,39	2,10	594	a4	81*	36*	-			c
3,47	2,15	711	a2	198*	153*	117*	-		d
3,52	2,18	951	a1	438*	393*	357*	240*	-	e

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan:

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

Tabel 36. Data Hasil Analisis *Through Viscosity* Profil Gelatinisasi (RVA)

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	214	218	216	648	216	2
2 ppm (a2)	175	179	177	531	177	2
4 ppm (a3)	165	166	164	495	165	1
6 ppm (a4)	183	186	183	552	184	2
8 ppm (a5)	174	175	173	522	174	1
Jumlah	911	924	913	2748		
Rata-Rata	182	185	183			

Tabel 37. Analisis Variasi (ANAVA) *Through Viscosity* Profil Gelatinisasi (RVA)

Sumber Variasi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F Tabel 5%	Notasi
Kelompok	2	19,6	9,8	12,25*	4,46	*
Perlakuan	4	4592,4	1148,1	1435,12*	3,84	*
Galat	8	6,4	0,8			
Total	14	4618,4				

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel ANAVA analisis *trough viscosity* diketahui bahwa nilai F Hitung untuk faktor perlakuan (konsentrasi ozon) sebesar $1435,13 > F$ Tabel pada taraf 5% sebesar 3,84, sedangkan nilai F Hitung untuk faktor kelompok sebesar $12,25 > F$ Tabel pada taraf 5% sebesar 4,46. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon memberikan pengaruh nyata terhadap respon fisik *trough viscosity* gabah beras merah dan faktor kelompok juga berpengaruh nyata terhadap respon fisik *trough viscosity* gabah beras merah. Oleh karena itu, perlu dilakukan uji lanjut Duncan.

Tabel 38. Uji Lanjut Duncan Analisis *Through Viscosity* Profil Gelatinisasi (RVA)

SSR 5%	LSR%	Rata-Rata	Kode Perlakuan	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	165	a3	-					a
3,26	1,68	174	a5	9*	-				b
3,39	1,75	177	a2	12*	3*	-			c
3,47	1,79	184	a4	19*	10*	7*	-		d
3,52	1,82	216	a1	51*	42*	39*	32*	-	e

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan:

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

Tabel 39. Data Hasil Analisis *Breakdown* Profil Gelatinisasi (RVA)

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	99	103	101	303	101	2
2 ppm (a2)	59	61	60	180	60	1
4 ppm (a3)	6	7	5	18	6	1
6 ppm (a4)	15	14	13	42	14	1
8 ppm (a5)	13	12	11	36	12	1
Jumlah	192	197	190	579		
Rata-Rata	38	39	38			

Tabel 40. Analisis Variasi (ANAVA) *Breakdown* Profil Gelatinisasi (RVA)

Sumber Variasi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F Tabel 5%	Notasi
Kelompok	2	5,2	2,6	1,93 ^{tn}	4,46	tn
Perlakuan	4	20181,6	5045,4	3737,33*	3,84	*
Galat	8	10,8	1,35			
Total	14	20197,6				

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel ANAVA analisis *breakdown* diketahui bahwa nilai F Hitung untuk faktor perlakuan (konsentrasi ozon) sebesar $3737,33 > F$ Tabel pada taraf 5% sebesar 3,84, sedangkan nilai F Hitung untuk faktor kelompok sebesar $1,93 < F$ Tabel pada taraf 5% sebesar 4,46. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon memberikan pengaruh nyata terhadap respon fisik *breakdown* gabah beras merah sedangkan faktor kelompok tidak berpengaruh nyata terhadap respon fisik *breakdown* gabah beras merah. Oleh karena itu, perlu dilakukan uji lanjut Duncan.

Tabel 41. Uji Lanjut Duncan Analisis *Breakdown* Profil Gelatinisasi (RVA)

SSR 5%	LSR%	Rata-Rata	Kode Perlakuan	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	6	a3	-					a
3,26	2,19	12	a5	6*	-				b
3,39	2,27	14	a4	8*	2 ^{tn}	-			b
3,47	2,33	60	a2	54*	48*	46*	-		c
3,52	2,36	101	a1	95*	89*	87*	41*	-	d

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan:

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

Tabel 42. Data Hasil Analisis *Final Viscosity* Profil Gelatinisasi (RVA)

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	268	273	272	813	271	3
2 ppm (a2)	303	308	307	918	306	3
4 ppm (a3)	308	311	311	930	310	2
6 ppm (a4)	359	362	356	1077	359	3
8 ppm (a5)	338	339	334	1011	337	3
Jumlah	1576	1593	1580	4749		
Rata-Rata	315	319	316			

Tabel 43. Analisis Variasi (ANAVA) *Final Viscosity* Profil Gelatinisasi (RVA)

Sumber Variasi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F Tabel 5%	Notasi
Kelompok	2	31,6	15,8	3,67 ^{tn}	4,46	tn
Perlakuan	4	13347,6	3336,9	776,02*	3,84	*
Galat	8	34,4	4,3			
Total	14	13413,6				

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel ANAVA analisis *final viscosity* diketahui bahwa nilai F Hitung untuk faktor perlakuan (konsentrasi ozon) sebesar $776,02 > F$ Tabel pada taraf 5% sebesar 3,84, sedangkan nilai F Hitung untuk faktor kelompok sebesar $3,67 <$ dari F Tabel pada taraf 5% sebesar 4,46. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon memberikan pengaruh nyata terhadap respon fisik *final viscosity* gabah beras merah sedangkan faktor kelompok tidak berpengaruh nyata terhadap respon fisik *final viscosity* gabah beras merah. Oleh karena itu, perlu dilakukan uji lanjut Duncan.

Tabel 44. Uji Lanjut Duncan Analisis *Final Viscosity* Profil Gelatinisasi (RVA)

SSR 5%	LSR%	Rata-Rata	Kode Perlakuan	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	271	a1	-					a
3,26	3,90	306	a2	35*	-				b
3,39	4,06	310	a3	39*	4 ^{tn}	-			b
3,47	4,15	337	a5	66*	31*	27*	-		c
3,52	4,21	359	a4	88*	53*	49*	22*	-	d

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan:

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

Tabel 45. Data Hasil Analisis *Setback* Profil Gelatinisasi (RVA)

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	54	55	56	165	55	1
2 ppm (a2)	128	129	130	387	129	1
4 ppm (a3)	146	145	144	435	145	1
6 ppm (a4)	176	176	173	525	175	2
8 ppm (a5)	164	164	161	489	163	2
Jumlah	668	669	664	2001		
Rata-Rata	134	134	133			

Tabel 46. Analisis Variasi (ANAVA) *Setback* Profil Gelatinisasi (RVA)

Sumber Variasi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F Tabel 5%	Notasi
Kelompok	2	2,8	1,4	0,737 ^{tn}	4,46	tn
Perlakuan	4	26721,6	6680,4	3516*	3,84	*
Galat	8	15,2	1,9			
Total	14	26739,6				

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel ANAVA analisis *setback* diketahui bahwa nilai F Hitung untuk faktor perlakuan (konsentrasi ozon) sebesar 3516,00 > F Tabel pada taraf 5% sebesar 3,84, sedangkan nilai F Hitung untuk faktor kelompok sebesar 0,74 < dari F Tabel pada taraf 5% sebesar 4,46. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon memberikan pengaruh nyata terhadap respon fisik *setback* gabah beras merah sedangkan faktor kelompok tidak berpengaruh nyata terhadap respon fisik *setback* gabah beras merah. Oleh karena itu, perlu dilakukan uji lanjut Duncan.

Tabel 47. Uji Lanjut Duncan Analisis *Setback* Profil Gelatinisasi (RVA)

SSR 5%	LSR%	Rata-Rata	Kode Perlakuan	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	55	a1	-					a
3,26	2,59	129	a2	74*	-				b
3,39	2,70	145	a3	90*	16*	-			c
3,47	2,76	163	a5	108*	34*	18*	-		d
3,52	2,80	175	a4	120*	46*	30*	12*	-	e

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan:

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

Tabel 48. Data Hasil Analisis *Peak Time* Profil Gelatinisasi (RVA)

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	6,70	6,90	6,80	20,40	6,80	0,10
2 ppm (a2)	6,90	7,10	7,00	21,00	7,00	0,10
4 ppm (a3)	4,30	4,50	4,40	13,20	4,40	0,10
6 ppm (a4)	5,50	5,70	5,60	16,80	5,60	0,10
8 ppm (a5)	5,45	5,50	5,46	16,41	5,47	0,03
Jumlah	28,85	29,70	29,26	87,81		
Rata-Rata	5,77	5,94	5,85			

Tabel 49. Analisis Variasi (ANAVA) *Peak Time* Profil Gelatinisasi (RVA)

Sumber Variasi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F Tabel 5%	Notasi
Kelompok	2	0,1	0,03614	31,702*	4,46	*
Perlakuan	4	13,6	3,40074	2983*	3,84	*
Galat	8	0,0	0,00114			
Total	14	13,7				

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel ANAVA analisis *peak time* diketahui bahwa nilai F Hitung untuk faktor perlakuan (konsentrasi ozon) sebesar 2983,11 > F Tabel pada taraf 5% sebesar 3,84, sedangkan nilai F Hitung untuk faktor kelompok sebesar 31,70 > F Tabel pada taraf 5% sebesar 4,46. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon memberikan pengaruh nyata terhadap respon fisik *peak time* gabah beras merah dan faktor kelompok juga berpengaruh nyata terhadap respon fisik *peak time* gabah beras merah. Oleh karena itu, perlu dilakukan uji lanjut Duncan.

Tabel 50. Uji Lanjut Duncan Analisis *Peak Time* Profil Gelatinisasi (RVA)

SSR 5%	LSR%	Rata-Rata	Kode Perlakuan	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	4,40	a3	-					a
3,26	0,06	5,47	a5	1,07*	-				b
3,39	0,07	5,60	a4	1,20*	0,13*	-			c
3,47	0,07	6,80	a1	2,40*	1,33*	1,20*	-		d
3,52	0,07	7,00	a2	2,60*	1,53*	1,40*	0,20*	-	e

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan:

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

Tabel 51. Data Hasil Analisis *Pasting Temperature* Profil Gelatinisasi (RVA)

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	71,70	72,30	72,00	216,00	72,00	0,30
2 ppm (a2)	72,50	72,90	72,85	218,25	72,75	0,22
4 ppm (a3)	71,80	72,20	72,00	216,00	72,00	0,20
6 ppm (a4)	71,50	71,40	71,15	214,05	71,35	0,18
8 ppm (a5)	71,35	71,50	71,20	214,05	71,35	0,15
Jumlah	358,85	360,30	359,20	1078,35		
Rata-Rata	71,77	72,06	71,84			

Tabel 52. Analisis Variasi (ANAVA) *Pasting Temperature* Profil Gelatinisasi (RVA)

Sumber Variasi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F Tabel 5%	Notasi
Kelompok	2	0,2	0,1145	3,881 ^{tn}	4,46	tn
Perlakuan	4	4,0	1,01025	34 [*]	3,84	*
Galat	8	0,2	0,0295			
Total	14	4,5				

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel ANAVA analisis *pasting temperature* diketahui bahwa nilai F Hitung untuk faktor perlakuan (konsentrasi ozon) sebesar $34,25 > F$ Tabel pada taraf 5% sebesar 3,84, sedangkan nilai F Hitung untuk faktor kelompok sebesar $3,88 <$ dari F Tabel pada taraf 5% sebesar 4,46. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon memberikan pengaruh nyata terhadap respon fisik *pasting temperature* gabah beras merah sedangkan faktor kelompok tidak berpengaruh nyata terhadap respon fisik *pasting temperature* gabah beras merah. Oleh karena itu, perlu dilakukan uji lanjut Duncan.

Tabel 53. Uji Lanjut Duncan Analisis *Pasting Temperature* Profil Gelatinisasi (RVA)

SSR 5%	LSR%	Rata-Rata	Kode Perlakuan	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	71,35	a4	-					a
3,26	0,32	71,35	a5	0,00 ^{tn}	-				a
3,39	0,34	72,00	a1	0,65*	0,65*	-			b
3,47	0,34	72,00	a3	0,65*	0,65*	0,00 ^{tn}	-		b
3,52	0,35	72,75	a2	1,40*	1,40*	0,75*	0,75*	-	c

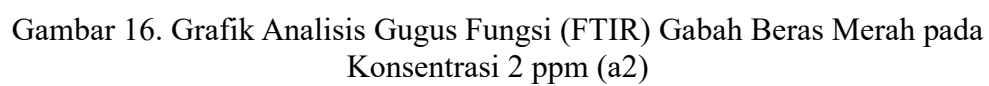
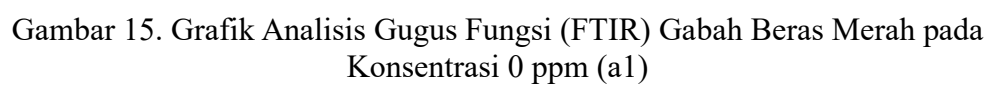
Keterangan:

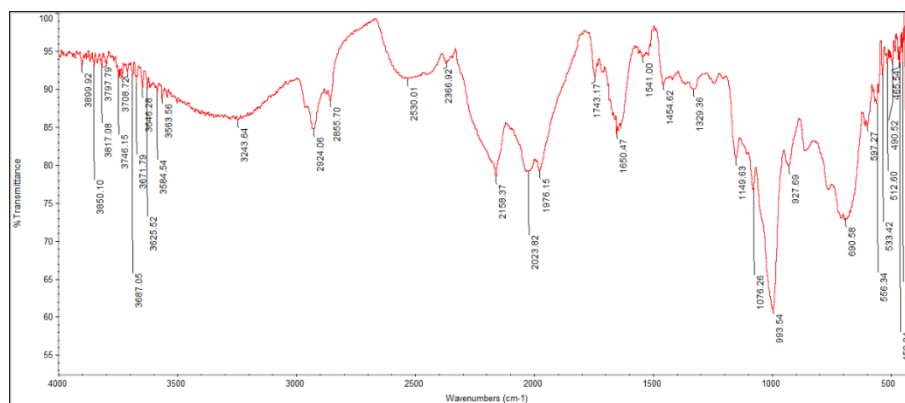
tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

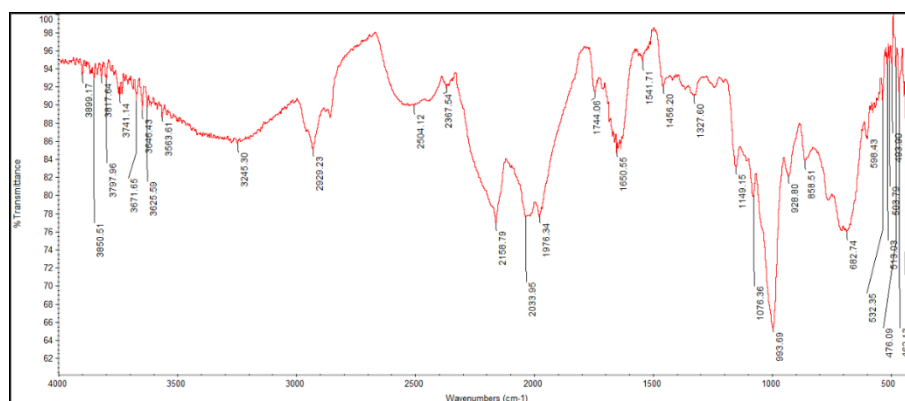
Kesimpulan:

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

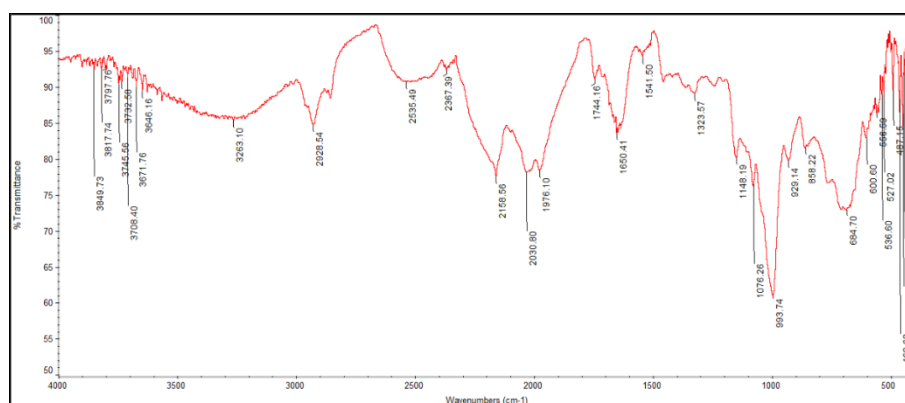




Gambar 17. Grafik Analisis Gugus Fungsi (FTIR) Gabah Beras Merah pada Konsentrasi 4 ppm (a3)



Gambar 18. Grafik Analisis Gugus Fungsi (FTIR) Gabah Beras Merah pada Konsentrasi 6 ppm (a4)



Gambar 19. Grafik Analisis Gugus Fungsi (FTIR) Gabah Beras Merah pada Konsentrasi 8 ppm (a5)

Lampiran 18. Dokumentasi Penelitian



Gambar 20. Dokumentasi Proses Ozonisasi Gabah Beras Merah



Gambar 21. Dokumentasi Proses Preparasi Sampel Gabah Beras Merah



Gambar 22. Dokumentasi Analisis Kadar Air Metode Gravimetri



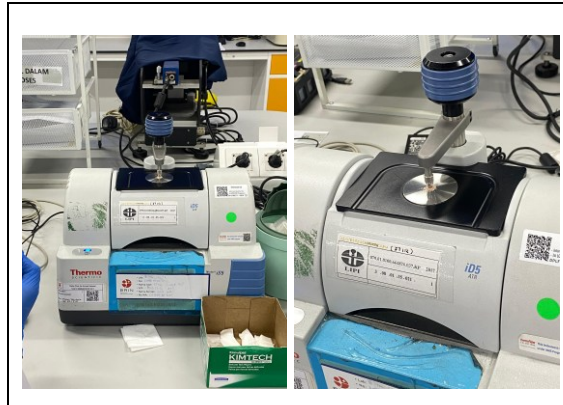
Gambar 23. Dokumentasi Analisis Kadar Pati Metode Luff Schoorl



Gambar 24. Dokumentasi Analisis Morfologi Granula Pati (SEM)



Gambar 25. Dokumentasi Analisis Kristalinitas dan Amorf (XRD)



Gambar 26. Dokumentasi Analisis Profil Gelatinisasi (FTIR)



Gambar 27. Dokumentasi Analisis *Water Activity* (a_w)



Gambar 28. Dokumentasi Analisis Kadar Antosianin Metode pH Differential