

**PENGARUH KONSENTRASI OZON TERHADAP
KARAKTERISTIK FISIK DAN KIMIA BERAS HITAM (*Oryza
sativa L.*) PECAH KULIT**

TUGAS AKHIR

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

**Oleh :
Riafany Agustin
NPM : 223020007**



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

ABSTRAK

PENGARUH KONSENTRASI OZON TERHADAP KARAKTERISTIK FISIK DAN KIMIA BERAS HITAM (*Oryza sativa L.*) PECAH KULIT

Oleh :

Riafany Agustin

NPM : 223020007

(Program Studi Teknologi Pangan)

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisik dan kimia beras hitam pecah kulit. Penelitian menggunakan Rancangan Acak Kelompok (RAK) satu faktor dengan lima taraf konsentrasi ozon (0, 2, 4, 6, dan 8 ppm) serta tiga kali ulangan. Kadar air, kadar pati, aktivitas air (*Aw*), dan kadar antosianin dianalisis secara statistik menggunakan ANAVA yang dilanjutkan dengan uji Duncan pada taraf nyata 5%, sedangkan profil gelatinisasi dan struktur pati dikarakterisasi menggunakan *Rapid Visco Analyzer (RVA)*, *X-Ray Diffraction (XRD)*, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)*, dan *Scanning Electron Microscopy (SEM)*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi ozon berpengaruh nyata terhadap kadar pati, kadar antosianin, dan seluruh parameter profil gelatinisasi, sedangkan kadar air dan aktivitas air tidak berbeda nyata antar perlakuan. Karakterisasi menggunakan SEM, XRD, dan FTIR menunjukkan bahwa ozon memodifikasi struktur pati yang ditandai dengan perubahan morfologi granula menjadi lebih berpori, peningkatan derajat kristalinitas relatif, serta pergeseran pita serapan tanpa terbentuk gugus fungsi baru sebagai akibat proses oksidasi. Berdasarkan hasil analisis RVA, perlakuan ozon konsentrasi 6 ppm menunjukkan karakteristik pasting yang lebih baik dibandingkan perlakuan lainnya. Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon berpengaruh terhadap karakteristik fisik dan kimia beras hitam pecah kulit.

Kata kunci : beras hitam pecah kulit, ozon, karakteristik fisik, karakteristik kimia, RVA, SEM XRD, FTIR

ABSTRACT

EFFECT OF OZONE CONCENTRATION ON THE PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF DEHULLED BLACK RICE (ORYZA SATIVA L.)

By :

Riafany Agustin

NIM : 223020007

(Departement Of Food Technology)

The purpose of this study was to determine the effect of ozone concentration on the physical and chemical characteristics of black rice (Oryza sativa L.) with the bran layer retained (brown black rice). The study employed a single-factor Randomized Complete Block Design (RCBD) consisting of five ozone concentration levels (0, 2, 4, 6, and 8 ppm) with three replications. Moisture content, starch content, water activity (A_w), and anthocyanin content were statistically analyzed using analysis of variance (ANOVA), followed by Duncan's Multiple Range Test (DMRT) at a 5% significance level. Meanwhile, the pasting properties and starch structure were characterized using a Rapid Visco Analyzer (RVA), X-Ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), and Scanning Electron Microscopy (SEM).

The results showed that increasing ozone concentration significantly affected starch content, anthocyanin content, and all pasting profile parameters, whereas moisture content and water activity were not significantly different among treatments. Characterization using SEM, XRD, and FTIR indicated that ozone modified the starch structure, as evidenced by changes in granule morphology to a more porous structure, an increase in relative crystallinity, and shifts in absorption bands without the formation of new functional groups as a result of the oxidation process. Based on the RVA analysis, the 6 ppm ozone treatment exhibited better pasting characteristics than the other treatments. Overall, it can be concluded that ozone concentration significantly affected the physical and chemical characteristics of brown black rice.

Keywords: *dehulled black rice, ozone, physical characteristics, chemical characteristics, RVA, SEM, XRD, FTIR.*

**PENGARUH KONSENTRASI OZON TERHADAP
KARAKTERISTIK FISIK DAN KIMIA BERAS HITAM (*Oryza
sativa L.*) PECAH KULIT**

Oleh :

Riafany Agustin
NPM : 223020007
(Program Studi Teknologi Pangan)

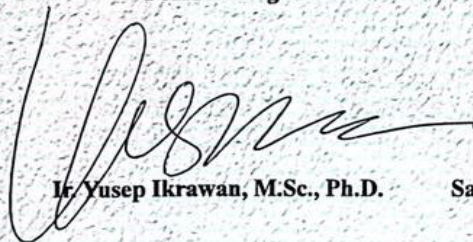
Fakultas Teknik
Universitas Pasundan

Menyetujui
Tim Pembimbing

Tanggal : 04 Agustus 2026

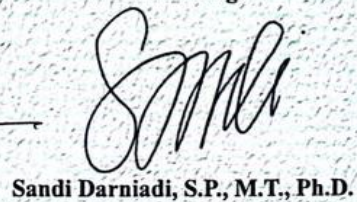
Menyetujui :

Pembimbing I



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

Pembimbing II



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

**PENGARUH KONSENTRASI OZON TERHADAP
KARAKTERISTIK FISIK DAN KIMIA BERAS HITAM (*Oryza
sativa L.*) PECAH KULIT**

Oleh :

Riafany Agustin
NPM : 223020007
(Program Studi Teknologi Pangan)

Fakultas Teknik
Universitas Pasundan

Menyetujui :

Tanggal12-08-2020.....

**Koordinator BELMAWABUD, Tugas Akhir, Kerja Praktek dan
Kemahasiswaan**

Program Studi Teknologi Pangan

**Fakultas Teknik
Universitas Pasundan**

The image shows an official circular stamp of Universitas Pasundan. The stamp contains the university's name in Indonesian and English, along with a central emblem. Overlaid on the stamp is a large, stylized handwritten signature in black ink.

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

PEDOMAN PENGGUNAAN TUGAS AKHIR

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

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

Agustin, R. (2026). Pengaruh Konsentrasi Ozon terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Beras Hitam (*Oryza sativa L.*) Pecah Kulit, Tugas Akhir Program Sarjana, Universitas Pasundan.

Dan dalam bahasa inggris sebagai berikut :

Agustin,R. (2026). *The Effect of Ozone Concentration on the Physical and Chemical Characteristics of Dehulled Black Rice (Oryza sativa L.)*, Bachelor's Thesis, Pasundan University.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas karunia dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan Laporan Tugas Akhir yang berjudul **“Pengaruh Konsentrasi Ozon terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Beras Hitam (*Oryza sativa L.*) Pecah Kulit”**. Penulisan tugas akhir ini merupakan salah satu syarat yang harus dipenuhi dalam menempuh program sarjana strata-1 di Program Studi Teknologi Pangan, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan Bandung.

Dalam penulisan tugas akhir ini penulis menyadari laporan ini masih jauh dari kata sempurna, karena didalamnya masih terdapat kekurangan-kekurangan. Hal ini dikarenakan keterbatasan yang dimiliki oleh penulis baik dalam segi kemampuan, pengetahuan serta pengalaman penulis. Oleh sebab itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang sifatnya membangun agar dalam penyusunan karya tulis selanjutnya dapat menjadi lebih baik.

Penulisan laporan ini dapat diselesaikan berkat dorongan, bimbingan dan motivasi dari berbagai pihak secara langsung maupun tidak langsung, maka dari itu penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Ir. Yusep Ikrawan, M.Sc., Ph.D. selaku Pembimbing Akademik yang telah memberikan bimbingan, pengarahan, serta ilmu yang bermanfaat kepada penulis selama penyusunan Proposal Penelitian ini.
2. Sandi Darniadi, S.P., M.T., Ph.D. selaku Pembimbing Lapangan yang telah memberikan bimbingan, pengarahan, serta ilmu yang bermanfaat kepada penulis selama penyusunan Proposal Penelitian ini.
3. Dr. Ira Endah Rohima, S.T., M.Si. selaku penguji Proposal Penelitian yang telah memberikan pengarahan, saran, serta ilmu yang bermanfaat kepada penulis selama penyusunan Proposal Penelitian ini.
4. Rizal Maulana Ghaffar, S.T., M.T. selaku Koordinator Belmawabud Program Studi Teknologi Pangan, Universitas Pasundan, Bandung.

5. Jaka Rukmana, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknologi Pangan Universitas Pasundan, Bandung.
6. Dosen beserta segenap civitas akademik di lingkup Jurusan Teknologi Pangan, Universitas Pasundan, Bandung.
7. Kedua orang tua dan seluruh keluarga yang senantiasa memberikan do'a serta dukungan baik moril maupun material kepada penulis, serta semangat dan kasih sayang yang tak pernah padam.
8. Rekan semasa kuliah di Universitas Pasundan yaitu Pepy Andriani, Shiba Azhar Tsurayya, Intan Pertiwi dan Shyfa Nur Fitriani yang selalu memberikan dukungan kepada penulis agar dapat menyelesaikan laporan penelitian ini.
9. Rekan-rekan semasa penelitian di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yaitu Hani Uswatun Hasanah, Ismail Ahmad Danial, Nazmi Ghita Fauziah, Zahra Putri Alviena dan Nazwa Amelia Cahyani yang telah memberikan dukungan, bantuan, serta motivasi kepada penulis.
10. Kepada Bu Devry, Teh Elvia Rachmawati, Teh Widia dan Kang Ilman yang telah membantu, memberikan masukan, saran dan kritik kepada penulis selama proses penyusunan laporan tugas akhir ini.
11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah memberikan motivasi dan semangat kepada penulis dalam kelancaran penelitian ini.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir ini karena terbatasnya kemampuan dan pengetahuan yang penulis miliki. Oleh karena itu, kritik dan saran dari semua yang bersangkutan sangat diharapkan demi penyempurnaan penulisan ini dan berharap semoga penulisan Laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membaca, khususnya bagi penulis untuk memandu penelitian.

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
<i>ABSTRACT</i>	ii
PEDOMAN PENGGUNAAN TUGAS AKHIR	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Penelitian	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	3
1.3 Maksud dan Tujuan	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Kerangka Penelitian	4
1.6 Hipotesis Penelitian.....	7
1.7 Waktu dan Tempat Pelaksanaan	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Beras Hitam.....	9
2.2 Beras Pecah Kulit	12
2.3 Senyawa Bioaktif.....	15
2.3.1 Antioksidan.....	15
2.3.2 Antosianin.....	17
2.4 Ozon	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	22
3.1 Bahan dan Alat.....	22
3.1.1 Bahan	22

3.1.2 Alat	22
3.2 Metode Penelitian.....	23
3.2.1 Penelitian Utama	23
3.3 Prosedur Penelitian.....	26
3.3.1 Persiapan Bahan Baku	27
3.3.2 Proses Ozonisasi Beras Hitam Pecah Kulit	27
3.3.3 Pengemasan Vakum	27
3.3.4 Pengecilan Ukuran (Size Reduction)	27
3.3.5 Pengayakan (80 Mesh)	28
3.3.6 Pengujian Karakteristik Tepung Beras Hitam Pecah Kulit.....	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	30
4.1 Parameter Pengamatan yang Dianalisis Secara Statistik.....	30
4.1.1 Respon Kimia	30
4.1.2 Respon Fisik.....	40
4.2 Parameter Pengamatan yang Dianalisis Secara Deskriptif.....	46
4.2.1 Respon Fisik.....	46
4.3.1 Respon Kimia	54
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	58
5.1 Kesimpulan.....	58
5.2 Saran.....	58
DAFTAR PUSTAKA.....	60
LAMPIRAN.....	67

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Komposisi Kimia Beras Hitam Pecah Kulit (BPK).....	14
Tabel 2.	Rancangan Percobaan Faktorial	24
Tabel 3.	Kelompok Ulangan Rancangan Percobaan	25
Tabel 4.	Analisis Variansi Konsentrasi Ozon terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Beras Hitam Pecah Kulit.....	25
Tabel 5.	Hasil Analisis Penelitian Kadar Air	31
Tabel 6.	Hasil Analisis Penelitian Kadar Pati	33
Tabel 7.	Hasil Analisis Penelitian Aktivitas Air (Aw)	36
Tabel 8.	Hasil Analisis Penelitian Uji Kadar Antosianin.....	38
Tabel 9.	Hasil Analisis Sifat Amilografi <i>Rapid Visco Analyzer</i> (RVA)	42
Tabel 10.	Sudut Difraksi Beras Hitam Pecah Kulit yang Telah diberi Perlakuan ozon	50
Tabel 11.	Daerah Kristalinitas (%) dan Daerah Amorf (%) XRD (<i>X-Ray Diffraction</i>) Beras Hitam Pecah Kulit Akibat Ozonisasi.....	52
Tabel 13.	Hasil Pembacaan Analisis FT-IR	57
Tabel 17.	Data Hasil Analisis Respon kimia Kadar Air	72
Tabel 18.	Analisis Variasi (ANOVA) Analisis Respon Kimia Kadar Air	73
Tabel 19.	Data Hasil Analisis Respon Kimia Kadar Pati	74
Tabel 20.	Analisis Variasi (ANOVA) Analisis Respon Kimia Kadar Pati	75
Tabel 21.	Uji Lanjut Duncan Analisis Respon Kimia Kadar Pati	76
Tabel 22.	Data Hasil Analisis Respon Kimia Aktivitas Air (Aw).....	77
Tabel 23.	Analisis Variasi (ANOVA) Analisis Respon Kimia Aktivitas Air (Aw)	78
Tabel 24.	Data Hasil Analisis Respon Kimia Kadar Antosianin	79
Tabel 25.	Analisis Variasi (ANOVA) Analisis Respon Kimia Kadar Antosianin.....	80
Tabel 26.	Uji Lanjut Duncan Respon Kimia Kadar Antosianin	81
Tabel 27.	Data <i>Peak Viscosity</i>	82
Tabel 28.	Analisis Variansi (ANOVA) <i>Peak Viscosity</i>	82

Tabel 29. Uji Lanjut Duncan <i>Peak Viscosity</i>	83
Tabel 30. Data <i>Though</i>	84
Tabel 31. Analisis Variansi (ANAVA) <i>Though</i>	84
Tabel 32. Uji Lanjut Duncan <i>Though</i>	85
Tabel 33. Data <i>Breakdown</i>	86
Tabel 34. Analisis Variansi (ANAVA) <i>Breakdown</i>	86
Tabel 35. Uji Lanjut Duncan <i>Breakdown</i>	87
Tabel 36. Data <i>Final Viscosity</i>	88
Tabel 37. Analisis Variansi (ANAVA) <i>Final Viscosity</i>	88
Tabel 38. Uji Lanjut Duncan <i>Final Viscosity</i>	89
Tabel 39. Data <i>Setback</i>	90
Tabel 40. Analisis Variansi (ANAVA) <i>Setback</i>	90
Tabel 41. Uji Lanjut Duncan <i>Setback</i>	91
Tabel 42. Data <i>Peak time</i>	92
Tabel 43. Analisis Variansi (ANAVA) <i>Peak time</i>	92
Tabel 44. Uji Lanjut Duncan <i>Peak time</i>	93
Tabel 45. Data <i>Peak time</i>	94
Tabel 46. Analisis Variansi (ANAVA) <i>Pasting Temperature</i>	94
Tabel 47. Uji Lanjut Duncan <i>Pasting Temperature</i>	95

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Beras Hitam	10
Gambar 2.	Beras Hitam Pecah Kulit.....	12
Gambar 3.	Struktur Umum Biji Padi (Gabah) sebagai Representasi Struktur Beras Pecah Kulit.....	13
Gambar 4.	Struktur Molekul Antosianin	18
Gambar 5.	<i>Ozone Chamber</i>	20
Gambar 6.	Mekanisme Ozon Langsung (<i>Direct</i>) dan Tidak Langsung (<i>Indirect</i>)	21
Gambar 7.	Diagram Alir Penelitian Beras Hitam Pecah Kulit.	29
Gambar 8.	Kurva Amilografi Rapid Visco Analyzer (RVA).....	43
Gambar 9.	a-e Konsentrasi 0 ppm (a); Konsentrasi 2 ppm (b); Konsentrasi 4 ppm (c); Konsentrasi 6 ppm (d); Konsentrasi 8 ppm (e)	47
Gambar 10.	Difratogram Beras Hitam Pecah Kulit.....	50
Gambar 12.	Grafik Spektrum FT-IR Pada Beras Hitam Pecah Kulit	54
Gambar 13.	Grafik Hasil Analisis Respon Fisik <i>XRD (X-Ray Diffraction)</i> Konsentrasi 0 ppm (a1).....	96
Gambar 14.	Grafik Hasil Analisis Respon Fisik <i>XRD (X-Ray Diffraction)</i> Konsentrasi 2 ppm (a2).....	96
Gambar 15.	Grafik Hasil Analisis Respon Fisik <i>XRD (X-Ray Diffraction)</i> Konsentrasi 4 ppm (a3).....	97
Gambar 16.	Grafik Hasil Analisis Respon Fisik <i>XRD (X-Ray Diffraction)</i> Konsentrasi 6 ppm (a4).....	97
Gambar 17.	Grafik Hasil Analisis Respon Fisik <i>XRD (X-Ray Diffraction)</i> Konsentrasi 8 ppm (a5).....	98
Gambar 18.	Grafik Analisis <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR) Beras Hitam Pecah Kulit pada Konsentrasi Ozon 0 ppm (a1)	99

Gambar 19. Grafik Analisis <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR) Beras Hitam Pecah Kulit pada Konsentrasi Ozon 2 ppm (a2)	99
Gambar 20. Grafik Analisis <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR) Beras Hitam Pecah Kulit pada Konsentrasi Ozon 4 ppm (a3)	100
Gambar 21. Grafik Analisis <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR) Beras Hitam Pecah Kulit pada Konsentrasi Ozon 6 ppm (a4)	100
Gambar 22. Grafik Analisis <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR) Beras Hitam Pecah Kulit pada Konsentrasi Ozon 8 ppm (a5)	101
Gambar 23. Proses Ozonisasi Beras Hitam Pecah Kulit	102
Gambar 24. Pengujian Analisis Kadar Air Metode Gravimetri	102
Gambar 25. Pengujian Analisis Kadar Pati Metode Luff Scrool	103
Gambar 26. Pengujian Analisis Kadar Antosianin pH Differensial	104
Gambar 27. Pengujian Analisis XRD (<i>X-Ray Diffraction</i>) di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Cisitu Bandung.	105
Gambar 28. Pengujian Analisis SEM <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i> di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Cisitu Bandung. ...	105
Gambar 29. Pengujian Analisis Aktivitas Air di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Cisitu Bandung.	106

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Prosedur Analisis Kimia	67
Lampiran 2.	Prosedur Analisis Fisik	70
Lampiran 3.	Hasil Analisis Respon Kimia Kadar Air	72
Lampiran 4.	Perhitungan Analisis Kadar Pati	74
Lampiran 5.	Uji Lanjut Duncan Respon Kimia Kadar Pati	76
Lampiran 6.	Perhitungan Analisis Aktivitas Air (Aw)	77
Lampiran 7.	Perhitungan Analisis Kadar Antosianin	79
Lampiran 8.	Uji Lanjut Duncan Respon Kimia Kadar Antosianin	81
Lampiran 9.	Hasil Data Analisis <i>Rapid Visco Analyzer</i> (RVA)	82
Lampiran 10.	Grafik Analisis <i>XRD (X-Ray Diffraction)</i> Berbagai Konsentrasi Ozon	96
Lampiran 11.	Grafik Analisis <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR) Beras Hitam Pecah Kulit Berbagai Konsentrasi Ozon.	99
Lampiran 12.	Dokumentasi penelitian	102

BAB I PENDAHULUAN

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

1.1 Latar Belakang Penelitian

Beras merupakan makanan pokok utama yang dikonsumsi oleh masyarakat Indonesia. Dari segi warna, beras terdiri atas beras putih dan beras warna. Beras mengandung karbohidrat, protein, lemak, vitamin, dan zat gizi lainnya yang dibutuhkan oleh tubuh manusia. Jumlah penduduk Indonesia yang besar menjadikan kebutuhan beras semakin meningkat. Secara umum, lebih dari 50% penduduk dunia bergantung pada beras sebagai sumber kalori utama. Selain menyumbang energi, beras juga menyediakan protein dan zat besi masing-masing sebesar 37,7% dan 25,30% dari total kebutuhan tubuh (Martina, 2024). Berdasarkan rilis terbaru Badan Pusat Statistik (BPS) pada 5 Januari 2026, produksi beras pada periode Januari-Desember 2025 diperkirakan mencapai 34,71 juta ton, meningkat 4,09 juta ton atau 3,36 % dibandingkan periode yang sama tahun 2024. Peningkatan ini didorong oleh bertambahnya luas panen serta upaya penguatan produksi di berbagai sentra utama padi. BPS mencatat proyeksi luas panen Januari-Desember 2025 sebesar 11,33 juta hektare, mengalami peningkatan sebesar 1,29 juta hektare (12,8 persen).

Beras hitam merupakan salah satu varietas padi (*Oryza sativa L. Indica*) yang dibudidayakan di berbagai daerah Indonesia. Dibandingkan beras putih, beras hitam memiliki kandungan serat dan antioksidan yang jauh lebih tinggi, dengan kadar serat mencapai sekitar 7,69% (bb) sedangkan beras putih hanya 0,57% (bb). Warna perikarp-aleuron yang merah-biru-ungu pekat menandakan tingginya senyawa antioksidan seperti antosianin dan flavonoid (Fitriana et al., 2022). Kandungan antosianin utamanya berupa turunan sianidin dan peonidin, yang tidak hanya memberikan warna ungu kehitaman, tetapi juga berperan

mencegah kerusakan oksidatif pada sel tubuh. Senyawa fenolik, termasuk antosianin, berfungsi sebagai antioksidan yang menetralkan radikal bebas serta memberikan manfaat fisiologis seperti antidiabetik, antiinflamasi, dan perlindungan terhadap stres oksidatif (Mahardani & Yuanita, 2021).

Beras hitam pecah kulit (*brown rice hitam*) merupakan bentuk beras yang masih mempertahankan lapisan bran dan aleuron secara utuh, sehingga antosianin, senyawa fenolik, serta serat pangan tetap terkonsentrasi tinggi. Pemilihan beras hitam pecah kulit dalam penelitian ini didasarkan pada kemampuannya mempertahankan nutrisi dan senyawa bioaktif secara optimal, sehingga cocok untuk menguji pengaruh ozonasi terhadap perubahan karakteristik fisik dan kimia tanpa kehilangan nilai gizi yang berarti. Selain itu, bentuk pecah kulit ini lebih rentan terhadap degradasi oksidatif dibandingkan beras sosoh, menjadikannya model yang tepat untuk mengevaluasi keamanan dan efektivitas perlakuan ozon pada biji-bijian berpigmen.

Kerentanan tersebut menjadi aspek penting untuk diperhatikan ketika ozon digunakan sebagai perlakuan, karena ozon bersifat oksidator kuat yang berpotensi merusak komponen sensitif pada lapisan bran. Secara kimia, ozon dapat bereaksi dengan ikatan rangkap dalam struktur antosianin dan senyawa fenolik, yang dapat mengakibatkan pembukaan cincin aromatik serta terbentuknya senyawa turunan yang tidak berwarna. Hal ini mengindikasikan bahwa kestabilan senyawa bioaktif pada beras hitam sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan selama proses oksidasi berlangsung (Haifan, 2017).

Sejalan dengan hal tersebut, dari segi fungsional senyawa fenolik dan antosianin yang berperan dalam aktivitas antioksidan diketahui mudah mengalami degradasi akibat oksidasi selama proses pengolahan maupun penyimpanan. Berbagai faktor seperti suhu tinggi, keberadaan oksigen dan paparan cahaya dapat mempercepat reaksi oksidasi, yang tidak hanya menurunkan kadar senyawa fenolik, tetapi juga memicu terjadinya pencoklatan sehingga berdampak pada perubahan warna serta penurunan daya tarik produk (Mahardani & Yuanita, 2021)

Ozon merupakan oksidator kuat yang sangat reaktif dan berpotensi sebagai alternatif ramah lingkungan untuk mendetoksifikasi pestisida serta mikroba pada biji-bijian makanan, termasuk beras, tanpa meninggalkan residu beracun karena mudah terurai menjadi oksigen. Menurut (Kaur et al., 2022), ozon bekerja melalui mekanisme oksidasi kuat yang mampu menonaktifkan serangga, jamur penghasil mikotoksin, dan residu pestisida, sekaligus berupaya mempertahankan atau meningkatkan kualitas nutrisi dan fungsional biji-bijian. Pada beras hitam pecah kulit yang kaya antosianin dan senyawa fenolik di lapisan bran serta aleuron, ozon berpotensi memengaruhi karakteristik fisik seperti warna (kemungkinan pemudaran akibat degradasi pigmen) dan tekstur, serta karakteristik kimia seperti komposisi pati, lipid (risiko peroksidasi), dan kadar antosianin, tergantung pada konsentrasi yang digunakan.

Pada konteks beras hitam yang kaya dengan antosianin dan senyawa bioaktif, ozonasi dapat memengaruhi karakteristik fisik seperti warna dan tekstur, serta kimia seperti komposisi pati dan lipid, tergantung pada konsentrasi yang digunakan. Pada penelitian mengenai Pengaruh Konsentrasi Ozon Terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Beras Hitam Pecah Kulit mampu menjelaskan sejauh mana pengaruh variasi konsentrasi ozon (0,2,4,6,8 ppm) masih dapat dipertimbangkan aman dan menguntungkan bagi kualitas beras hitam pecah kulit.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan Latar belakang yang diuraikan diatas, maka masalah yang dapat diidentifikasi adalah bagaimana pengaruh konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisik dan kimia beras hitam pecah kulit ?

1.3 Maksud dan Tujuan

Maksud dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh konsentrasi ozon dengan berbagai konsentrasi terhadap karakteristik fisik dan kimia beras hitam BPK (Beras Pecah Kulit)

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh konsentrasi ozon terhadap karakteristik Beras Hitam Pecah Kulit.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Memberikan informasi tentang bagaimana konsentrasi (0,2, 4, 6 dan 8 ppm) memengaruhi kualitas fisik dan kimia beras hitam BPK (Beras Pecah Kulit)
2. Menjadi dasar bagi penelitian selanjutnya yang membahas perlakuan ozon pada beras atau bahan pangan lainnya.
3. Menjadi sumber referensi mengenai pengaruh konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisik dan kimia beras hitam pecah kulit.
4. Menambah pengetahuan dan pemahaman peneliti tentang pengaruh ozon pada kualitas fisik dan kimia beras hitam pecah kulit.

1.5 Kerangka Penelitian

Menurut (Das et al., 2023) menemukan bahwa beras hitam memiliki kadar antosianin hingga 100-500 mg/100 g, yang berkontribusi pada warna hitam-ungu dan sifat fungsionalnya. Namun, pada bentuk pecah kulit (*broken husk*), beras hitam rentan terhadap degradasi kualitas selama penyimpanan, seperti penurunan kadar air, peningkatan oksidasi lemak, dan kehilangan antosianin akibat paparan udara dan mikroba.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa upaya mempertahankan kualitas beras hitam pecah kulit sangat dipengaruhi oleh kestabilan parameter fisikokimia penyusunannya. Menurut (Hartono et al., 2025) parameter seperti kadar air dan profil asam lemak memiliki peran penting sebagai variabel utama dalam menentukan laju kerusakan oksidatif serta mempertahankan fungsionalitas beras secara keseluruhan.

Menurut (Cheng et.al, 2021) Kadar air merupakan salah satu indikator terpenting dalam menilai kesegaran dan kualitas beras hitam. Kadar air yang sesuai dapat berikatan erat dengan pati, protein, dan koloid hidrofilik lainnya

sehingga meningkatkan kualitas makan. Selama penyimpanan, kadar air beras merah cenderung menurun, dan penurunan ini lebih cepat pada suhu tinggi. Nilai asam lemak bebas meningkat secara bertahap seiring waktu penyimpanan, dan peningkatan ini terjadi paling cepat pada suhu tinggi. Akumulasi asam lemak bebas yang berlebihan selama penyimpanan akan menyebabkan beras menjadi tengik dan sangat menurunkan kualitas makannya.

Menurut (Winarno, 2004) reaksi oksidasi pada bahan pangan dapat menyebabkan kerusakan pigmen, lemak, dan komponen bioaktif lainnya yang sensitif terhadap oksigen dan oksidator kuat.

Menurut (Mahardani & Yuanita, 2021) menjelaskan bahwa stabilitas senyawa fenolik pada beras hitam sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti oksigen dan suhu, yang dapat dipercepat oleh oksidasi berlebih. Dalam konteks penelitian ini, ozonasi pada konsentrasi rendah dapat mengurangi kadar air tanpa merusak struktur butir, sehingga mencegah pertumbuhan jamur dan serangga.

Secara umum, kualitas beras dievaluasi berdasarkan perubahan gelatinisasi pati dan tekstur, serta perubahan kandungan air, mikrostruktur, dan struktur sekunder protein yang secara langsung mencerminkan kualitas beras (Cheng et al., 2021).

Menurut (Martina et al., 2024) kualitas kimiawi bahan pangan seperti beras tidak hanya ditentukan oleh komposisi awal, melainkan juga oleh perubahan yang terjadi selama proses pengolahan, termasuk kehilangan zat gizi akibat oksidasi atau paparan lingkungan.

Ozon merupakan oksidator yang sangat kuat dan reaktif, sehingga mudah bereaksi dengan berbagai senyawa organik dalam bahan pangan, khususnya yang memiliki ikatan rangkap seperti pigmen dan asam lemak tak jenuh. Proses oksidasi ini dapat mengubah struktur kimia bahan pangan, misalnya dengan merusak pigmen atau memicu oksidasi lipid yang akhirnya menurunkan mutu keseluruhan produk (Winarno, 2004).

Dalam aplikasinya pada bahan pangan, ozon mampu menonaktifkan mikroorganisme dan enzim, mengoksidasi komponen kimia seperti pigmen, lemak, dan pati, serta memperpanjang masa simpan produk (Khadre et al., 2001).

Reaksi ozon terhadap bahan pangan sangat bergantung pada konsentrasi dan lama paparan. Konsentrasi ozon yang terlalu tinggi dapat menimbulkan oksidasi berlebihan yang justru menurunkan kualitas bahan, misalnya melalui degradasi senyawa fenolik, denaturasi protein, dan pemutusan rantai pati (Choe & Min, 2006).

Ozon bekerja melalui mekanisme langsung (selektif terhadap ikatan tak jenuh) dan tidak langsung (melalui radikal hidroksil), sehingga dapat mendegradasi kontaminan sambil memengaruhi komposisi kimia pada konsentrasi rendah hingga sedang (0–10 ppm) (Kaur et al., 2022).

Konsentrasi ozon berpengaruh terhadap karakteristik kimia beras hitam pecah kulit melalui mekanisme oksidasi yang dapat mengubah senyawa bioaktif seperti antosianin dan fenolik. Pada dosis rendah hingga sedang, ozon cenderung menjaga kadar serat dan antioksidan, sedangkan konsentrasi lebih tinggi berisiko memicu degradasi pigmen serta peroksidasi lipid. Menurut (Fitriana et al., 2022) menyatakan bahwa senyawa antosianin pada beras hitam, terutama turunan sianidin dan peonidin, sangat sensitif terhadap oksidasi, sehingga perubahan kadarnya menjadi indikator penting dalam pengujian pengolahan.

Menurut penelitian (Rickes, 2022) menunjukkan bahwa aplikasi ozon mampu menurunkan kadar mikotoksin pada beras tanpa menurunkan kualitas teknologisnya. Dan Menurut (Savi et al., 2020) melaporkan juga bahwa aplikasi ozon pada beras selama penyimpanan efektif menurunkan cemaran jamur hingga 90% tanpa menyebabkan perubahan bermakna pada mutu fisik dan kimia butir beras.

Menurut (Hryenko, 2025) pada *cereal grains* menunjukkan bahwa ozonasi pada 10 mL/L selama 60 menit menurunkan residu pestisida hingga signifikan, yang analog dengan potensi pada *pigmented rice* untuk menjaga

stabilitas nutrisi. Hal ini menghubungkan treatment ozon dengan respon kimia, di mana variasi konsentrasi diharapkan memodifikasi kadar air, abu, lemak, protein, pati, amilosa, dan serat melalui oksidasi selektif.

Ozon dapat menyebabkan pemudaran warna hitam-ungu akibat degradasi pigmen atau perubahan morfologi butir melalui analisis SEM dan XRD. Menurut (Aryana, 2024) dalam studi desiminasi varietas beras hitam fungsional menunjukkan bahwa penanganan pascapanen yang tidak tepat menyebabkan perubahan warna dan tekstur, sehingga penggunaan ozon dengan dosis terkendali diharapkan dapat memperbaiki stabilitas fisik tanpa mengurangi daya tarik konsumen.

Menghubungkan dengan respon fisik, ozonasi juga memodifikasi struktur dan penampilan beras hitam melalui perubahan kristalinitas dan morfologi. XRD (*X-ray Diffraction*) digunakan untuk mengukur pola kristal pati. Pada japonica rice menunjukkan bahwa ozon meningkatkan kristalinitas endosperm, yang relevan untuk black rice di mana XRD dapat mendeteksi perubahan A-type pati setelah oksidasi (analog dari Kaur et al., 2022 pada *grains*).

Kerangka pemikiran di atas menunjukkan bahwa konsentrasi ozon memengaruhi karakteristik beras hitam pecah kulit melalui mekanisme oksidasi terhadap senyawa bioaktif dan komponen pati, sehingga penelitian ini dirancang untuk mengukur pengaruh tersebut secara kimia (Kadar Pati, Kadar Air, Aktivitas Air, Kadar Antosianin) maupun secara fisik, meliputi profil gelatinisasi pati (*Rapid Visco Analyzer*), morfologi granula (*Scanning Electron Microscope*), derajat kristalinitas (*X-Ray Diffraction*), dan gugus fungsi (*Fourier Transform Infrared*).

1.6 Hipotesis Penelitian

Berdasarkan kerangka pemikiran di atas, diduga bahwa konsentrasi ozon berpengaruh terhadap karakteristik fisik dan kimia Beras Hitam Pecah Kulit.

1.7 Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Waktu pelaksanaan penelitian dimulai pada bulan April hingga selesai dan tempat penelitian dilaksanakan di dua tempat yaitu Laboratorium Penelitian Badan Riset dan Inovasi Bandung (BRIN Bandung), Jl. Sangkuriang, Dago, Kecamatan Coblong, Kota Bandung dan di Laboratorium Teknologi Pangan Fakultas Teknik Universitas Pasundan, Kampus IV Universitas Pasundan, Jalan Dr. Setiabudi No.193, Kota Bandung.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini akan menguraikan mengenai : (2.1) Beras Hitam, (2.2) Beras Pecah Kulit, (2.3) Senyawa Bioaktif, (2.4) Ozonasi

2.1 Beras Hitam

Beras hitam (*Oryza sativa L.*) merupakan salah satu varietas padi berpigmen yang memiliki nilai fungsional tinggi dibandingkan dengan beras putih. Pigmen hitam keunguan pada lapisan perikarp dan aleuron berasal dari senyawa antosianin, yaitu kelompok flavonoid yang berperan sebagai antioksidan alami yang mampu menangkalkan radikal bebas dan menurunkan risiko penyakit degeneratif (Istiqomah, 2022).

Studi karakteristik fisik dan kimia beras hitam lokal di Indonesia menunjukkan bahwa setiap varietas memiliki kadar senyawa bioaktif dan komponen nutrisi yang berbeda-beda, termasuk total fenolik, antosianin, serta komponen pati dan amilosa yang beragam antar varietas. Beras hitam dikenal oleh masyarakat dengan nama yang berbeda-beda. Penduduk di Solo mengenal beras ini dengan nama Beras Wulung, sedangkan di Cibeusi, Jawa Barat lebih dikenal dengan beras Gadog, di Sleman dikenal dengan Cempo Ireng atau beras Jaliteng dan di Bantul dikenal sebagai beras Melik (Balai Besar Penelitian Tanaman Padi, 2010).

Kedudukan taksonomi dari beras hitam menurut Tjitrosoepomo (2005) dan penampakan beras hitam dapat dilihat pada Gambar 1. sebagai berikut:

Kingdom	: Plantae
Divisi	: Spermatophyta
Sub divisi	: Angiospermae
Kelas	: Monocotyledoneae
Bangsa	: Poales (Glumiflorae)

Famili : Poaceae (Graminea)
Marga : Oryza
Spesies : *Oryza sativa L.indica*



Gambar 1. Beras Hitam

(Istiqomah, 2022)

Selain keragaman varietas, beras hitam juga memiliki karakteristik fungsional yang membedakannya dari beras konvensional. Beras hitam merupakan bahan pangan tanpa gluten serta sumber serat pangan yang tinggi dan bermanfaat bagi kesehatan. Warna ungu tua sampai hitam yang menjadi ciri khasnya berasal dari kadar antosianin yang tinggi di bagian aleuron dan endosper. Selaras dengan khasiat kesehatannya, beras hitam secara tradisional disebut sebagai *blood enriching rice*, *medicinal rice*, *longevity rice*, dan *immortal rice*, sementara di masa kini digolongkan sebagai *superfood*.

Penelitian ini menggunakan beras dengan varietas Jeliteng (beras hitam) yang relevan untuk pengembangan produk. Beras hitam (*Oryza sativa L. indica*) mengandung beragam senyawa bioaktif yang menjadikannya sumber pangan fungsional dengan manfaat kesehatan. Menilik dari sisi makronutrien, kandungan amilosa pada beras hitam adalah sekitar 25,49% yang bernilai lebih rendah bila dibandingkan dengan beras putih (Dewi & Wihandani, 2025). Hal ini berkaitan dengan indeks glikemik beras hitam yang cenderung lebih

rendah bila dibandingkan dengan jenis beras lainnya. Indeks glikemik beras hitam termasuk ke dalam kategori makanan dengan indeks glikemik rendah (<55%) berdasarkan klasifikasi FAO/WHO (Agung et al., 2020).

Kultivar Jeliteng adalah varietas unggul beras hitam pertama yang berhasil dilepas oleh Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian pada tahun 2019. Varietas beras hitam ini mempunyai tekstur nasi yang pulen dengan kandungan amilosa 19,6%. Kandungan fenolik dalam varietas ini sangat tinggi yaitu mencapai $7104,3 \pm 417,9$ mg GAE*/100 g BPK. Varietas ini agak tahan WBC biotipe 1, tahan HDB kelompok IV dan tahan blas ras 033 dan 073. Umur panen varietas Jeliteng ini berkisar ± 113 hari, lebih cepat dibandingkan varietas Cempo Ireng dan Pari Ireng yang memiliki umur panen yang cukup panjang sekitar 5 bulan (Dayriza et al., 2021).

Beras hitam juga memiliki kandungan antioksidan dan antosianin yang tinggi. Antosianin merupakan senyawa organik dari golongan flavonoid. Pigmen antosianin tersebut terdapat pada lapisan aleuron beras hitam. Warna beras yang semakin gelap mengindikasikan kandungan antosianinnya semakin tinggi (Fitriyah et al., 2021). Penelitian lain menunjukkan bahwa kandungan antosianin memiliki aktivitas anti-oksidatif dan anti-inflamasi anti kanker dan berbagai manfaat kesehatan lainnya.

Menurut Mietha, (2012) melaporkan kadar serat pangan beras hitam mencapai 7,5%, lebih tinggi dibandingkan beras putih sebesar 5,4%. Kandungan hemiselulosa beras hitam juga dilaporkan lebih tinggi, yakni 5,8%, dibandingkan beras putih yang hanya 2,2% (Ok et al., 2001 dalam Narwidina, 2009).

Sebagai bahan fungsional, karakteristik beras hitam menjadi dasar untuk memilih metode pengolahan dan penyimpanan yang tepat agar nilai gizi dan aktivitas antioksidannya tetap terjaga pascapanen.

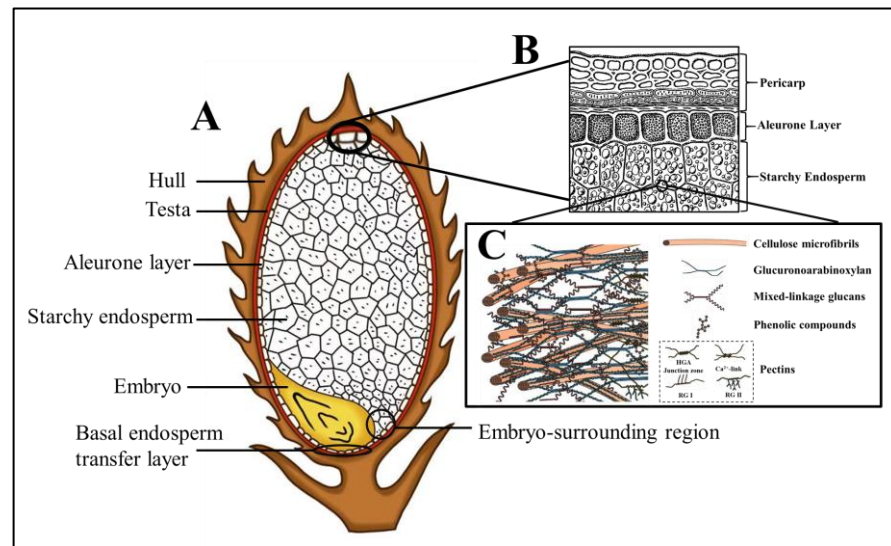
2.2 Beras Pecah Kulit



Gambar 2. Beras Hitam Pecah Kulit

(Istiqomah, 2022)

Beras Pecah Kulit adalah beras yang hanya dihilangkan sekamnya dan masih mengandung bekatul. Beras pecah kulit memiliki bekatul sekitar 8-10%, dimana di dalam bekatul mengandung zat gizi dan komponen bioaktif sehingga beras pecah kulit memiliki nilai sensory tekstur dan aroma yang rendah sehingga konsumen tidak menyukainya (Suarti & Wannawa, 2025). Bekatul adalah hasil dari proses penggilingan padi yaitu lapisan perikarp atau lapisan luar dan bagian lembaga beras. Beras Pecah Kulit (BPK) diperoleh dengan melepaskan bagian kulit terluarnya yang dikenal sebagai dengan hull. Beras berdasarkan kelompok pigmen, ada yang berpigmen (beras hitam dan merah) dan tanpa pigmen (beras putih) (Suarti et al., 2021)



Gambar 3. Struktur Umum Biji Padi (Gabah) sebagai Representasi Struktur Beras Pecah Kulit

Sumber : (Xiong et al., 2022)

Beras pecah kulit memiliki kandungan gizi dan antioksidan yang lebih tinggi dibandingkan beras sosoh (Suarti et al., 2024). Hal ini disebabkan karena Beras Pecah Kulit mengandung lemak, protein, vitamin, serat pangan, mineral, fenolik, antosianin dan flavonoid. Beras pecah kulit juga memiliki kandungan amilosa lebih tinggi daripada beras sosoh. Beras yang mengandung amilosa tinggi biasanya memiliki Indeks Glikemik yang rendah (Suarti et al., 2023).

Tabel 1. Komposisi Kimia Beras Hitam Pecah Kulit (BPK)

Komposisi	Beras Hitam Pecah Kulit (BPK)
Protein (g)	7.50
Lemak (g)	2.68
Karbohidrat (g)	76.17
Gula (g)	1.90
Abu	1.27
Kalsium	33.00
Magnesium	143.00
Phosphorus	264.00
Iron	1.80
Thiamin	0.41
Niacin	4.30
Asam Pantotenat	1.49
Lemak	4.91

Sumber : (U.S. Department of Agriculture, 2011).

Butiran beras kulit disusun oleh perikarp 1-2%, aleuron dan testa 4-6 %, embrio 2-3% dan endosperm 89-94 %. Sekam mempunyai berat 18-28% dari berat butir gabah pada tingkat kadar air 13 % berat basah. Sekam membentuk jaringan keras sebagai perisai pelindung bagi butir beras terhadap pengaruh luar. Karena kulit ari bersifat kedap terhadap oksigen, CO₂ dan uap air, sehingga dapat melindungi butir beras dari kerusakan oksidasi dan enzimatik (Muchtadi, 1992).

Kerapatan kulit dan kekerasan biji berkaitan dengan ketahanan biji terhadap serangan hama selama masa penyimpanan. Kerusakan karena seragam hama lebih banyak terjadi pada beras yang memiliki aleuron yang masih utuh atau mempunyai ikatan yang longgar. Sifat mekanis aleuron seperti kekerasan, kerapuhan, dan kemudahan terpotong diduga juga berkaitan dengan kemudahan diserang oleh serangga (Haryadi, 2006).

Pada penggilingan gabah, kulit atau sekam dipisahkan. Dari penggilingan gabah, dihasilkan biji beras atau disebut dengan beras pecah kulit. Beras ini jarang langsung digunakan untuk konsumsi tetapi perlu penyosohan terlebih dahulu (Haryadi, 2006).

Beras Pecah Kulit (BPK) memiliki manfaat dibandingkan dengan beras putih karena memiliki kandungan serat yang tinggi bermanfaat untuk mencegah penyakit gastrointestinal, kaya akan vitamin B untuk mencegah beri-beri, juga tinggi lemak sebagai sumber energi yang baik (Zahra, 2020).

2.3 Senyawa Bioaktif

2.3.1 Antioksidan

Antioksidan merupakan senyawa yang membantu melindungi tubuh dari serangan radikal bebas. Manusia memiliki antioksidan yang dihasilkan sendiri oleh tubuh yang dinamakan antioksidan endogen. Jumlah antioksidan dalam tubuh akan berkurang seiring dengan kondisi tubuh setiap manusia yang tidak akan sebanding dengan jumlah radikal bebas yang terbentuk. Oleh karena itu tubuh membutuhkan antioksidan eksogen (Tatang Irianti et al., 2017).

Secara garis besar, antioksidan terbagi menjadi antioksidan endogen dan antioksidan eksogen. Antioksidan endogen diproduksi oleh tubuh, misalnya enzim superoksida dismutase, katalase, dan glutathione peroksidase yang berfungsi untuk menjaga keseimbangan ROS di dalam sel (Fithria et al., 2022). Seiring bertambahnya usia atau meningkatnya paparan stres oksidatif, kapasitas antioksidan endogen sering kali tidak lagi mencukupi, sehingga diperlukan asupan antioksidan eksogen dari pangan. Antioksidan eksogen umumnya berasal dari senyawa fitokimia seperti polifenol, flavonoid, antosianin, vitamin C dan vitamin E yang banyak terdapat pada buah, sayur dan sereal berpigmen seperti beras hitam (Mahardani & Yuanita, 2021).

Aktivitas antioksidan dari ekstrak beras hitam dengan menggunakan metode *2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)* (ABTS) dan *2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl* (DPPH) radikal dilaporkan menjadi ekstrak

yang secara signifikan bersifat paling poten dibandingkan dengan bahan pangan pokok lainnya, seperti beras putih, beras coklat, barley maupun gandum. Ekstrak beras hitam memiliki kapasitas antioksidan yang tinggi, terbukti mampu menetralkan radikal bebas ABTS dan DPPH secara efektif meskipun dalam konsentrasi yang rendah, dengan nilai IC₅₀ sebesar 99,73 µg/mL untuk ABTS dan 204,60 µg/mL untuk DPPH (Dewi & Wihandani, 2025)

Dalam matriks pangan nabati, terutama sereal berpigmen seperti beras hitam, kapasitas antioksidan sangat dipengaruhi oleh kandungan total fenolik dan flavonoid, termasuk antosianin. Beberapa studi menunjukkan adanya korelasi positif antara kandungan total fenolik dengan kapasitas antioksidan yang semakin tinggi kadar fenolik dan flavonoid, umumnya semakin besar kemampuan sampel meredam radikal bebas yang diukur dengan metode DPPH, FRAP, atau pengujian kapasitas antioksidan lainnya (Maryati, 2020). Pada penelitian ekstrak daun bumbu duri, peningkatan kadar fenolik dan flavonoid sejalan dengan meningkatnya kapasitas antioksidan sehingga kondisi optimum suhu dan waktu maserasi tertentu (Made, 2020).

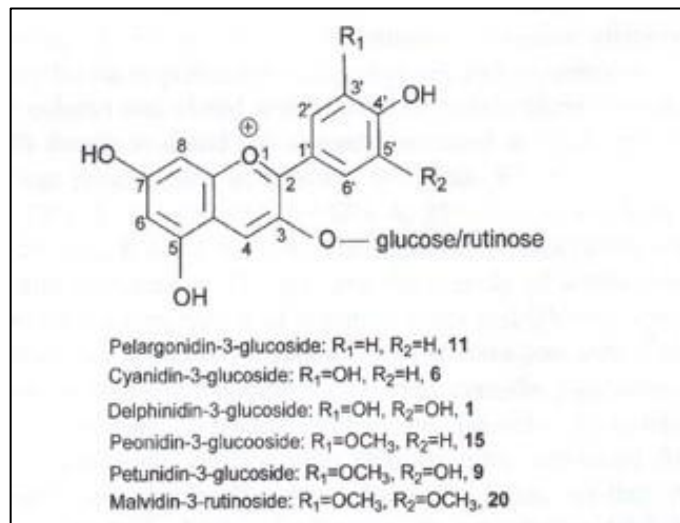
Namun, hubungan antara total fenolik dan kapasitas antioksidan tidak selalu linear. Tinjauan mengenai pengolahan dan penyimpanan senyawa fenolik menunjukkan bahwa penurunan kadar fenolik tidak selalu diikuti penurunan aktivitas antioksidan, dan sebaliknya peningkatan fenolik tidak selalu paralel dengan peningkatan kapasitas antioksidan (Mahardani & Yuanita, 2021). Hal ini dijelaskan oleh kontribusi senyawa antioksidan lain (misalnya antosianin, vitamin C, vitamin E, pigmen lain) yang juga ikut terdeteksi dalam pengujian aktivitas antioksidan (Mahardani & Yuanita, 2021). Aktivitas antioksidan dalam bahan pangan pada umumnya dievaluasi melalui kemampuan senyawa untuk menyumbangkan elektron atau atom hidrogen kepada radikal bebas, sehingga radikal tersebut berubah menjadi bentuk yang lebih stabil dan tidak reaktif (Zainul, 2020).

Dalam konteks beras hitam pecah kulit, antioksidan utama berasal dari antosianin dan polifenol lain yang terakumulasi pada lapisan aleuron dan bekatul. Perlakuan proses, termasuk paparan oksidan kuat seperti ozon, berpotensi memodifikasi struktur senyawa fenolik dan antosianin sehingga dapat menurunkan atau mengubah profil kapasitas antioksidan (Mahardani & Yuanita, 2021). Oleh karena itu, pengaturan kondisi proses (konsentrasi ozon, lama paparan, suhu, dan kadar oksigen) menjadi krusial untuk menjaga keseimbangan antara efek dekontaminasi dengan pelestarian senyawa bioaktif dan kapasitas antioksidan beras hitam sebagai pangan fungsional (Maryati et al., 2020).

2.3.2 Antosianin

Antosianin adalah senyawa kimia organik yang memiliki warna merah, biru, dan hitam biasanya terdapat pada tanaman. Selain itu antosianin termasuk pewarna alami golongan flavonoid dengan tiga karbon diikat oleh satu atom oksigen. Antosianin memiliki karakteristik karbon $C_6-C_3-C_6$ yang memiliki sifat larut pada pelarut polar. Berdasarkan kepolarannya pelarut antosianin pada tanaman berbentuk aglikon. Antosianin memiliki manfaat dalam mencegah dan mengobati berbagai penyakit dengan menangkal radikal bebas turunan oksigen reaktif yaitu oksigen tunggal, peroksil dan hidroksil (Pasaribu., 2021).

Antosianin dikenal sebagai salah satu senyawa bioaktif yang memiliki aktivitas antioksidan dengan cara memberikan elektronnya ke radikal bebas yang tidak stabil, sehingga menjadi stabil. Beras hitam memiliki kandungan antosianin yang lebih tinggi apabila dibandingkan dengan jenis beras yang lain (Pramitasari & Angelica, 2020). Menurut (Li, 2009) mengevaluasi kandungan antosianin beras hitam yang terdiri atas sianidin 3-O-glukosida, peonidin 3-O-glukosida, malvidin 3-O-glukosida, pelagonidin 3-O-glukosida, dan delphinidin 3-O-glukosida. Antosianin yang dominan adalah sianidin 3-O-glukosida (95%) dan peonidin 3-O-glukosida (5%).



Gambar 4. Struktur Molekul Antosianin

Sumber : (Li, 2009)

Stabilitas antosianin sangat dipengaruhi oleh pH, suhu, oksigen, cahaya, dan keberadaan ion logam atau enzim pengoksidasi. Pada ekstrak pigmen berantosianin, peningkatan suhu dan waktu pemansan di atas kisaran tertentu mempercepat degradasi pigmen dan penurunan intensitas warna (Nasrullah, 2020). Pada beras hitam, antosianin terakumulasi di lapisan aleuron dan bekatul, sehingga bentuk beras pecah kulit mempertahankan kandungan antosianin lebih tinggi dibandingkan dengan beras putih yang dipoles.

Penelitian pada tepung beras hitam, menunjukkan bahwa penurunan kadar antosianin selama penyimpanan disertai penurunan aktivitas antioksidan, yang menunjukkan hubungan erat antara stabilitas pigmen dan kapasitas antioksidan tepung (Latifa et al., 2019). Dengan demikian, antosianin pada beras hitam berfungsi tidak hanya sebagai pewarna alami, tetapi juga kontributor utama aktivitas antioksidan yang dapat menambah nilai pangan fungsional produk berbasis beras hitam.

2.4 Ozon

Ozon (O_3) adalah molekul oksigen triatomik yang tersusun atas tiga atom oksigen, bersifat tidak stabil, berbau tajam, berwarna kebiruan pada suhu ruang,

dan mudah terurai kembali menjadi oksigen (O_2) sehingga tidak dapat disimpan lama. Secara kimia, ozon dikenal sebagai oksidator kuat yang mampu membentuk radikal hidroksil ($\bullet OH$) dan mengoksidasi berbagai senyawa organik maupun anorganik. Dalam bidang pangan, sifat ozon yang sangat reaktif namun cepat terurai menjadi O_2 penting karena memungkinkan proses dekontaminasi dan oksidasi berlangsung efektif tanpa meninggalkan residu kimia berbahaya pada produk pangan (Moris et al., 2022).

Ozon memiliki potensi oksidasi yang tinggi sebesar 2,074V dibandingkan dengan klorin (1,36V) dan oksigen (1,23V). Pada suhu kamar, ozon merupakan gas yang tidak stabil dan mudah terdegradasi. Ozon memiliki dua fungsi utama yaitu sebagai oksidator dan disinfektan yang sangat kuat, efektif, dan aman. Sebagai oksidator, pada pengolahan air ozon sangat efektif untuk menghilangkan warna, rasa, dan bau yang diakibatkan oleh material organik dan anorganik yang dapat dioksidasi seperti ion besi, mangan, dan sulfida. Selain itu, ozon juga memiliki kemampuan oksidasi yang sangat kuat yang dapat menekan pertumbuhan mikroba pada produk pangan, sehingga kesegaran dan daya simpan produk dapat bertahan lebih lama (Hartoyo & Rachma, 2022).

Menurut Haifan (2017) Ozon dapat terbentuk melalui dua proses yaitu proses penyerapan cahaya dan proses tumbukan. Pembentukan ozon terjadi melalui proses fotokimia, di mana baik molekul oksigen (O_2) maupun ozon (O_3) menyerap radiasi UV. O_2 menyerap UV dengan panjang gelombang <240 nm, sehingga terurai menjadi dua atom oksigen reaktif. Atom oksigen ini kemudian bereaksi dengan O_2 membentuk O_3 melalui reaksi eksotermik. Secara keseluruhan, reaksi ini mengubah tiga molekul O_2 menjadi dua molekul O_3 sambil mengonversi energi UV menjadi panas. Ozon sendiri menyerap UV pada rentang 240–290 nm, menyebabkan disosiasi menjadi O_2 dan atom oksigen.

Sedangkan pembentukan ozon melalui proses tumbukan dapat dilakukan dengan melewati gas oksigen pada daerah yang dikenai tegangan tinggi. Molekul oksigen ini mengalami ionisasi, yaitu proses terlepasnya suatu

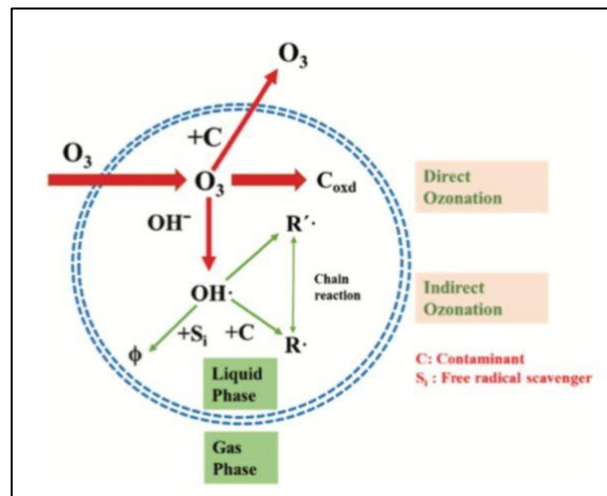
atom atau molekul dari ikatannya menjadi ion-ion oksigen. Molekul-molekul oksigen yang terionisasi ini biasa disebut dengan kondisi plasma (Haifan, 2017).



Gambar 5. *Ozone Chamber*

(sumber : Haifan, 2017)

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 secara langsung (*Direct*) 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 tidak langsung (*Indirect*) terjadi akibat ketidakstabilan molekul ozon, dimana 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 (Kaur et al., 2022).



Gambar 6. Mekanisme Ozon Langsung (*Direct*) dan Tidak Langsung (*Indirect*)

Sumber : (Kaur et al., 2022)

Ozonasi dipandang sebagai metode sanitasi yang ramah lingkungan karena tidak melibatkan penambahan bahan kimia sintetis, sehingga aman dari sudut pandang ekologi. Ozon dapat dihasilkan dari oksigen murni maupun udara kering melalui berbagai metode, seperti proses termal, kimia, fotokimia, elektrokimia, serta melalui mekanisme lucutan listrik. 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 itu, perlakuan ozonasi juga dilaporkan efektif dalam pengendalian serangga dan hama pascapanen, dekontaminasi mikotoksin, serta inaktivasi jamur penghasil toksin (Kaur et al., 2022)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini akan 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-bahan yang digunakan dalam proses penelitian ini adalah sampel Beras Hitam (*Oryza sativa L.*) varietas jaliteng dengan kadar air 14% 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 (*Memmert 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*), Batu Didih (*Sipelco*), Labu Erlenmeyer 100 mL, 250 mL, 300 mL (*Pyrex*), Kertas Saring (*Whatman No. 42*), 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 a_w Meter (HD-3A)

3.2 Metode Penelitian

3.2.1 Penelitian Utama

Pada penelitian utama ini yaitu Beras Hitam Pecah Kulit dilakukan analisis pada 5 taraf dengan menggunakan konsentrasi ozon yaitu 0,2,4,6,8 ppm. Pemilihan rentang konsentrasi 0–8 ppm didasarkan pada pertimbangan bahwa ozon pada konsentrasi rendah hingga sedang telah dilaporkan efektif dalam perlakuan bahan pangan, namun peningkatan konsentrasi yang terlalu tinggi berpotensi menyebabkan degradasi komponen bioaktif seperti fenolik dan antosianin.. Menggunakan alat ozon *generator* dengan lama waktu paparan ozon yaitu selama 30 menit setiap konsentrasi nya. Respon yang digunakan antara lain yaitu :

1. Respon fisik

Analisis Struktur kristalinITAS pati menggunakan XRD (*X-Ray Diffraction*), Analisis Morfologi Granula menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscopy*) dan Analisis Profil Gelatinisasi menggunakan RVA (*Rapid Visco Analyzer*).

2. Respon kimia

Kadar Air menggunakan metode gravimetri, Kadar Pati menggunakan metode *Luff Schorl*, Kadar Antosianin Menggunakan pH Differensial, A_w Meter dan Analisis Gugus Fungsi menggunakan FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*).

3.2.1.1 Rancangan Perlakuan

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

1. a1 (0 ppm)
2. a2 (2 ppm)
3. a3 (4 ppm)
4. a4 (6 ppm)
5. a5 (8 ppm)

3.2.1.2 Rancangan Percobaan

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

Model percobaan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

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

Keterangan :

- Y_{ij} = Respon percobaan dari perlakuan ke-i pada kelompok ke-j
 μ = Nilai tengah umum
 τ_i = Pengaruh perlakuan konsentrasi ozon
 β_j = Pengaruh kelompok ke-j
 ϵ_{ij} = Pengaruh galat dari perlakuan ke-i pada kelompok ke-j

Tabel 2. Rancangan Percobaan Faktorial

Konsentrasi Ozon (ppm)	Kelompok Ulangan		
	1	2	3
a1 (0 ppm)	a1	a1	a1
a2 (2 ppm)	a2	a2	a2
a3 (4 ppm)	a3	a3	a3
a4 (6 ppm)	a4	a4	a4
a5 (8 ppm)	a5	a5	a5

Berdasarkan rancangan pada tabel X dapat dibuat denah (*Layout*) percobaan *Factorial One Way* yang dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Kelompok Ulangan Rancangan Percobaan

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

3.2.1.3 Rancangan Analisis

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

Tabel 4. Analisis Variansi Konsentrasi Ozon terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Beras Hitam Pecah Kulit

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

(Sumber: Gaspersz, 1995)

Keterangan :

r = Replikasi (Ulangan)

a = Konsentrasi Ozon

Berdasarkan Tabel 4, Analisis Variansi (ANAVA), selanjutnya dapat ditentukan daerah penolakan hipotesis, yaitu:

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

3.2.1.4 Rancangan Respon

Rancangan respon yang dilakukan pada penelitian beras hitam terdiri dari respon fisik dan kimia :

A. Parameter Pengamatan yang Dianalisis Secara Statistik

a) Respon Kimia

Respon kimia yang akan dianalisis secara statistik pada beras hitam pecah kulit yaitu: Kadar Air (AOAC, 2005), Kadar Pati (AOAC, 2005), Aw Meter dan Kadar Antosianin (Pasaribu et al., 2021)

b) Respon Fisik

Analisis Profil Gelatinisasi menggunakan RVA (*Rapid Visco Analyzer*).

B. Parameter Pengamatan yang Dianalisis Secara Deskriptif

a) Respon Fisik

Analisis morfologi permukaan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM), dan XRD (*X-Ray Diffraction*).

b) Respon Kimia

Analisis Profil gugus fungsi menggunakan FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) (Alrasyid, 2025)

3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan secara eksperimental dengan tahapan meliputi persiapan bahan baku (sortasi dan pembersihan), Pengkondisian Kadar

Air, Proses Ozonisasi Beras Hitam Pecah Kulit, Pengecilan ukuran (*Size Reduction*), Penepungan dan Pengayakan, serta Pengujian Karakteristik Fisik dan Kimia. Diagram alir penelitian Beras Hitam Pecah Kulit dapat dilihat pada Gambar 7.

3.3.1 Persiapan Bahan Baku

Beras Hitam Pecah Kulit terlebih dahulu dilakukan sortasi dan pembersihan untuk memisahkan beras dari berbagai material asing yang tidak diinginkan seperti kotoran, batu-batu kecil, sisa sekam, serta butiran beras yang mengalami kerusakan fisik.

3.3.2 Proses Ozonisasi Beras Hitam Pecah Kulit

Beras Hitam Pecah Kulit yang telah bersih kemudian diberi 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, waktu paparan ini dipilih sebagai durasi yang dianggap cukup untuk memungkinkan terjadinya reaksi oksidasi antara ozon dan komponen beras hitam pecah kulit. Perlakuan konsentrasi 0 ppm berfungsi sebagai kontrol (tanpa ozonisasi). Tujuan ozonisasi adalah untuk mengkaji pengaruh konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisik dan kimia tepung beras hitam yang dihasilkan.

3.3.3 Pengemasan Vakum

Setelah proses ozonisasi, sampel beras hitam pecah kulit dimasukkan ke dalam plastik polyethylene (PE) dan dilakukan pengemasan vakum untuk meminimalkan kontak dengan udara dan menjaga kestabilan kualitas sampel.

3.3.4 Pengecilan Ukuran (*Size Reduction*)

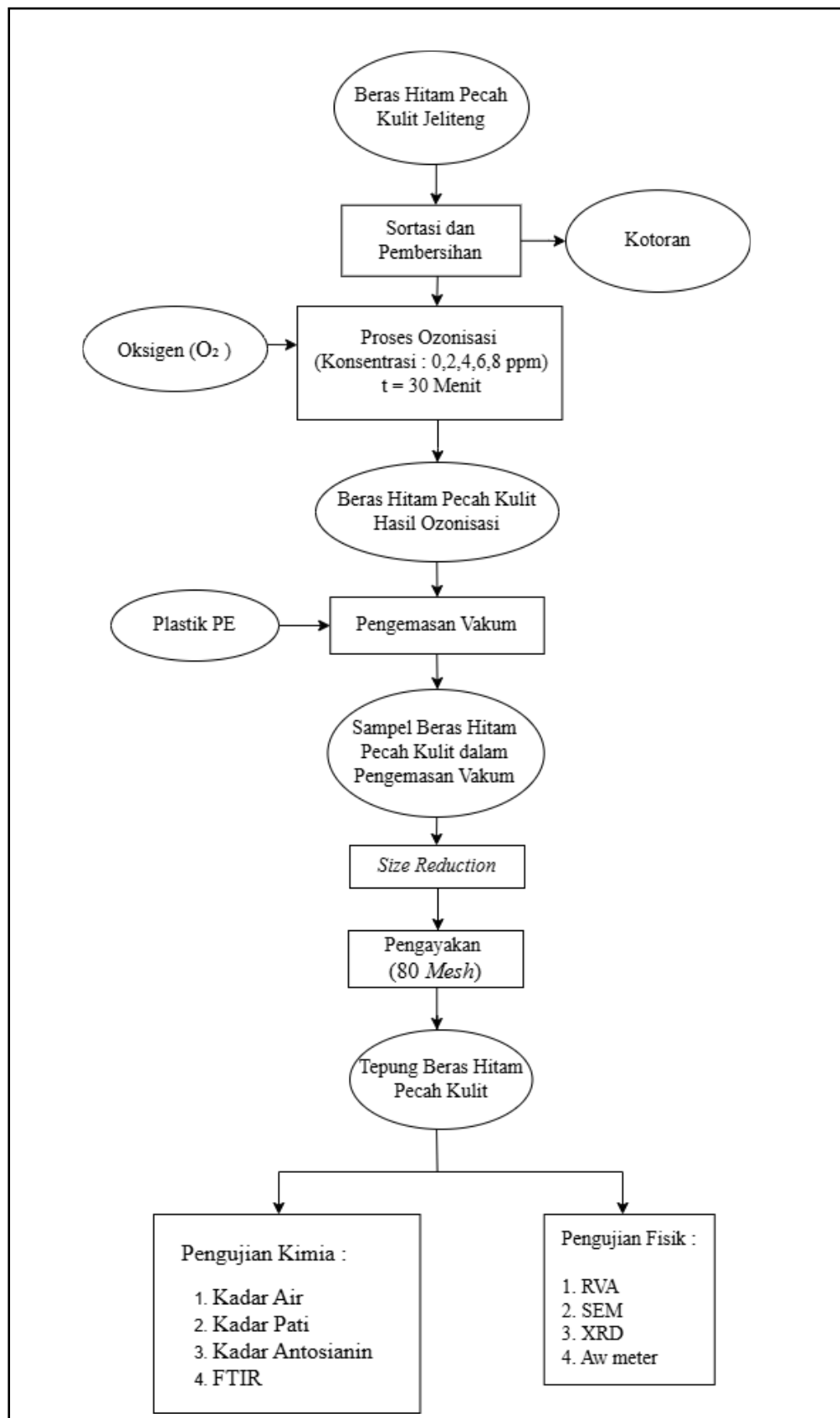
Beras hitam pecah kulit hasil ozonisasi selanjutnya dilakukan proses pengecilan ukuran menggunakan alat penggiling hingga menjadi bentuk tepung. Tahap ini bertujuan untuk mempermudah proses analisis serta meningkatkan homogenitas sampel.

3.3.5 Pengayakan (80 Mesh)

Tepung yang dihasilkan kemudian diayak menggunakan ayakan berukuran 80 mesh. Proses pengayakan ini bertujuan untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam sehingga hasil analisis menjadi lebih akurat dan konsisten.

3.3.6 Pengujian Karakteristik Tepung Beras Hitam Pecah Kulit

Tepung Beras Hitam Pecah Kulit hasil perlakuan kemudian di analisis karakteristik fisik dan kimia nya, meliputi pengujian fisik yaitu *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui struktur kristalin, *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengamati morfologi permukaan dan analisis Aktivitas Air (a_w) menggunakan *water activity* untuk mengetahui jumlah air bebas pada tepung beras hitam pecah kulit hasil perlakuan ozonisasi. Pengujian Kimia yaitu Kadar air, Kadar pati, Kadar antosianin, *Fourier Transform Infrared* (FTIR) untuk identifikasi gugus fungsi.



Gambar 7. Diagram Alir Penelitian Beras Hitam Pecah Kulit.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini akan menguraikan mengenai : (4.1) Parameter Pengamatan yang Dianalisis Secara Statistik. (4.2) Parameter Pengamatan yang Dianalisis Secara Deskriptif

4.1 Parameter Pengamatan yang Dianalisis Secara Statistik

4.1.1 Respon Kimia

Analisis Kimia yang di analisis secara statistik meliputi Analisis Kadar Air, Analisis Kadar Pati, Aktivitas Air dan Analisis Kadar Antosianin pH *Differential*.

4.1.1.1 Analisis Kadar Air

Kadar air merupakan salah satu parameter mutu yang penting pada beras. Dalam penelitian ini, analisis kadar air dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh perlakuan ozon pada berbagai konsentrasi (0,2,4,6,8 ppm) terhadap karakteristik beras hitam pecah kulit. Analisis ini diperlukan untuk mengetahui proses ozonisasi dapat menyebabkan perubahan kadar air pada bahan yang berpotensi memengaruhi mutu beras (Shah et al., 2015).

Berdasarkan hasil penelitian uji analisis Kadar Air yang dilakukan menggunakan metode gravimetri, rata-rata kadar air beras hitam pecah kulit yang diberi perlakuan ozon berkisar antara 11,17%-11,49%. Pada perlakuan 2 ppm menghasilkan kadar air tertinggi yaitu 11,49 %, sedangkan perlakuan 6 ppm menghasilkan kadar air terendah yaitu 11, 17 %. Variasi nilai kadar air antar perlakuan relatif kecil , yaitu berada pada kisaran 11,17% - 11,49% dengan selisih tertinggi dan terendah hanya sebesar 0,32 %. Perubahan kadar air yang terjadi pada setiap perlakuan relatif kecil dan tidak menunjukkan kecenderungan yang konsisten terhadap peningkatan konsentrasi ozon.

Tabel 5. Hasil Analisis Penelitian Kadar Air

Konsentrasi Ozon	Rata-Rata Respon
0 ppm	11,43 ^a ± 0,37
2 ppm	11,49 ^a ± 0,14
4 ppm	11,34 ^a ± 0,05
6 ppm	11,17 ^a ± 0,11
8 ppm	11,20 ^a ± 0,09

Keterangan: Nilai rata-rata yang ditandai dengan notasi huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata dan notasi huruf yang berbeda menunjukkan berbeda nyata menurut uji lanjut Duncan pada taraf 5%.

Menurut Standar Nasional Indonesia (SNI 6128:2020) kadar air pada beras maksimum yang diperbolehkan adalah 14,00%. Hasil penelitian berdasarkan Tabel 5 menunjukkan bahwa Konsentrasi Ozon 2 ppm mengandung Kadar Air tertinggi yaitu 11,49 %, disusul dengan Konsentrasi Ozon 0 ppm yaitu 11,43 %, lalu Konsentrasi Ozon 4 ppm yaitu 11,34 %, Konsentrasi Ozon 8 ppm yaitu 11,20 % dan Konsentrasi Ozon dengan 6 ppm mengandung Kadar Air terendah yaitu 11,17 % sehingga masih berada di bawah batas maksimum yang ditetapkan oleh SNI dan memenuhi persyaratan mutu beras yang baik (Lestari & Kurniawan, 2021).

Hasil analisis ANAVA menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon memberikan pengaruh tidak nyata (tn) terhadap kadar air beras hitam pecah kulit. Hal ini ditunjukkan oleh nilai F Hitung perlakuan sebesar 1,520 yang lebih kecil dibandingkan F Tabel 5% sebesar 3,84. Selain itu, faktor ke-lompok juga menunjukkan hasil tidak nyata dengan F hitung 0,475 lebih kecil daripada F Tabel 4,46.

Tidak berpengaruh nyata nya perlakuan ozon terhadap kadar air diduga karena ozon merupakan oksidator kuat yang bekerja terutama melalui mekanisme oksidasi senyawa organik dan inaktivasi mikroorganism pada

permukaan bahan pangan. Ozon tidak berfungsi sebagai agen pengering maupun agen penambah air sehingga tidak memberikan perubahan yang signifikan terhadap kandungan air bahan. Pada sereal dan produk biji-bijian, penggunaan ozon lebih banyak memengaruhi aspek keamanan pangan, penurunan cemaran mikroba, mikotoksin, serta beberapa karakteristik fisikokimia tertentu dibandingkan kandungan air bahan (Zhu, 2018).

Menurut (Shah et al., 2015) Melaporkan bahwa untuk perlakuan ozon pada beras putih tidak memberikan pengaruh nyata terhadap kadar air ($P > 0,05$), meskipun beberapa sifat fisikokimia lainnya mengalami perubahan akibat proses ozonisasi. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa kadar air merupakan parameter yang relatif stabil selama perlakuan ozon dilakukan pada konsentrasi dan waktu kontak yang sesuai.

Menurut (Metwaly et al., 2026) pada gandum, barley, dan beras yang difumigasi dengan ozon gas hingga 1000 ppm, yang melaporkan penurunan kadar air yang sangat kecil (berkisar 0,12–0,57%) dan tidak menimbulkan perubahan mutu yang berarti pada bahan. Penelitian tersebut sejalan dengan hasil penelitian ini yang menunjukkan bahwa kadar air relatif tidak terpengaruh oleh ozonisasi.

4.1.1.2 Analisis Kadar Pati

Pati merupakan komponen utama beras dan menentukan sifat fungsional, tekstur, dan pencernaan, sehingga sangat berperan dalam mutu beras sebagai pangan pokok. Nilai pati beras hitam pecah kulit pada penelitian ini yaitu 59,06-66,69 % sedikit lebih rendah, yang dapat dikaitkan dengan adanya fraksi dedak/aleuron dan komponen lainnya (protein, serta, fenolik) yang lebih tinggi dibanding tepung beras halus sehingga proporsi patinya menurun.

Penentuan kadar pati pada penelitian ini menggunakan metode Luff-Schoorl yang didasarkan pada hidrolisis pati menjadi glukosa, kemudian glukosa tersebut bereaksi sebagai gula pereduksi dalam proses analisis. Oleh karena itu, nilai kadar pati yang diperoleh secara tidak langsung

menggambarkan jumlah rantai glukon yang masih utuh sehingga dapat mengalami hidrolisis secara optimal. Sebaliknya, apabila sebagian rantai pati telah terdegradasi menjadi oligosakarida berukuran sangat pendek akibat proses oksidasi yang berlebihan, fraksi tersebut berpotensi tidak terdeteksi secara optimal sebagai pati dengan metode ini. Fenomena tersebut diperkirakan terjadi pada perlakuan ozon 8 ppm yang dibahas pada bagian berikutnya.

Berdasarkan hasil penelitian uji analisis kadar pati yang dilakukan menggunakan metode Luff-Schrool, rata-rata kadar pati beras hitam pecah kulit yang diberi perlakuan ozon berkisar antara 59,06%–66,69%. Pada perlakuan 0 ppm menghasilkan kadar pati tertinggi yaitu 66,69%, sedangkan perlakuan 8 ppm menghasilkan kadar pati terendah yaitu 59,06%. Nilai rata-rata kadar pati menunjukkan kecenderungan menurun seiring dengan meningkatnya konsentrasi ozon.

Menurut Hasil Tabel ANAVA (Lampiran 5) menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon memberikan pengaruh nyata terhadap kadar pati beras hitam pecah kulit pada taraf 5%. Hasil analisis kadar pati dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 6. Hasil Analisis Penelitian Kadar Pati

Konsentrasi Ozon	Rata-Rata Respon
0 ppm	66,69 ^e ± 0,65
2 ppm	64,46 ^d ± 0,65
4 ppm	62,52 ^c ± 0,72
6 ppm	61,20 ^b ± 0,54
8 ppm	59,06 ^a ± 0,68

Keterangan: Nilai rata-rata yang ditandai dengan notasi huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata dan notasi huruf yang berbeda menunjukkan berbeda nyata menurut uji lanjut Duncan pada taraf 5%.

Berdasarkan pada Tabel 6. Pada perlakuan kontrol (0 ppm), kadar pati beras hitam pecah kulit mencapai nilai tertinggi yaitu 66,69%. Hal ini terjadi karena beras tidak mendapat paparan ozon sama sekali, sehingga granula pati

masih dalam keadaan alami dan utuh, baik dari segi struktur fisik maupun komposisi kimianya (Juliano, 1993). Pada perlakuan 2 ppm, kadar pati turun menjadi 64,46%. Penurunan ini disebabkan oleh ozon yang mulai bereaksi dengan permukaan granula pati melalui proses oksidasi (Sandhu et al., 2012). Selanjutnya, pada perlakuan 4 ppm kadar pati semakin menurun menjadi 62,52%, karena jumlah ozon yang lebih banyak memungkinkan reaksi oksidasi menembus lebih dalam ke dalam granula pati dan memutus lebih banyak ikatan rantai pati (Li et al., 2012). Pada perlakuan 6 ppm, kadar pati turun menjadi 61,20% seiring dengan semakin meluasnya kerusakan struktur granula pati (Xu et al., 2018). Akhirnya, pada perlakuan 8 ppm kadar pati mencapai nilai terendah yaitu 59,06%. Pada konsentrasi tertinggi ini, ozon menyebabkan degradasi pati yang paling masif, sehingga banyak rantai pati terputus dan berubah menjadi senyawa yang lebih kecil yang tidak terdeteksi sebagai pati utuh dalam metode Luff Schoorl (Catal & Ibanoglu, 2014; Wang et al., 2017).

Penurunan kadar pati yang konsisten ini juga mengindikasikan bahwa granula pati beras hitam pecah kulit semakin berkurang seiring meningkatnya konsentrasi ozon, suatu kecenderungan yang secara struktural relevan dengan perubahan morfologi granula pada analisis SEM serta perubahan derajat kristalinitas pada analisis XRD yang dibahas pada subbab berikutnya, mengingat oksidasi permukaan granula umumnya mendahului perubahan pada susunan kristalin pati (Sandhu et al., 2012).

Pada tingkat biji padi, paparan ozon selama pengisian bulir dilaporkan menurunkan kandungan pati hingga sekitar 15-16% dan memodifikasi sifat pasta pati (Huang et al., 2012). Temuan ini sejalan dengan pola penurunan kadar pati pada beras hitam pecah kulit dengan peningkatan konsentrasi ozon.

(Sandhu et al. 2012) melaporkan bahwa perlakuan gas ozon pada pati jagung menyebabkan penurunan kadar pati seiring dengan meningkatnya konsentrasi ozon, disertai peningkatan gugus karbonil sebagai bukti terjadinya oksidasi.

Menurut (Xu et al. 2018) secara khusus pada pati beras melaporkan penurunan kadar pati total akibat perlakuan ozon, disertai perubahan rasio amilosa dan amilopektin. Dalam konteks beras hitam bahwa ozon pada konsentrasi 2 ppm ke atas sudah mampu menembus lapisan aleuron dan menginduksi degradasi pati yang nyata

4.1.1.3 Analisis Aktivitas Air (a_w)

Aktivitas Air adalah perbandingan tekanan uap air pada bahan dengan tekanan uap air murni pada kondisi yang sama, sehingga menunjukkan ketersediaan air bebas untuk reaksi kimia, enzimatis dan pertumbuhan mikroba. Pada beras hitam parameter ini sangat berperan karena berkaitan dengan kestabilan penyimpanan, sementara lapisan bekatul nya kaya senyawa fenolik, antosianin, dan lipid yang sensitif terhadap kondisi pascapanen dan penyimpanan (Winarno, 2004).

Aktivitas air memiliki hubungan erat dengan mutu dan umur simpan beras. Bahan pangan dengan nilai a_w yang tinggi cenderung lebih rentan mengalami pertumbuhan kapang, khamir dan bakteri. Menurut (Labuza, 1980) sebagian besar kapang dapat tumbuh pada A_w di atas 0,70, sedangkan bakteri umumnya memerlukan a_w di atas 0,90. Oleh karena itu, pengendalian aktivitas air menjadi salah satu faktor penting dalam mempertahankan kualitas beras selama penyimpanan. Meskipun Standar Nasional Indonesia (SNI) beras lebih menitikberatkan pada kadar air, nilai a_w tetap dapat digunakan sebagai indikator kestabilan penyimpanan produk sereal karena berkaitan dengan ketersediaan air bebas di dalam bahan (BSN, 2015).

Berdasarkan hasil penelitian analisis Aktivitas Air (a_w), nilai rata-rata aktivitas air pada beras hitam pecah kulit yang diberi perlakuan ozon berkisar antara 0,77-0,80, dengan perlakuan tanpa ozon 0 ppm (a_1) menghasilkan A_w tertinggi yaitu 0,80, sedangkan perlakuan ozon 2 ppm (a_2) dan 4 ppm (a_3) mengalami penurunan menjadi masing-masing 0,78 dan 0,77. Pada perlakuan ozon 6 ppm (a_4) dan 8 ppm (a_5), nilai A_w kembali meningkat menjadi 0,79. Hasil

tersebut menunjukkan adanya perubahan nilai aktivitas air akibat perlakuan ozon, namun perubahannya relatif kecil.

Berdasarkan hasil ANOVA, perlakuan konsentrasi ozon menunjukkan tidak berbeda nyata terhadap aktivitas air beras hitam pecah kulit. Hal ini ditunjukkan oleh nilai F hitung sebesar 0,472, yang lebih kecil dibandingkan F tabel sebesar 3,84. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa perlakuan ozon pada konsentrasi 0–8 ppm belum mampu menyebabkan perubahan yang signifikan terhadap aktivitas air beras hitam pecah kulit. Hasil analisis kadar pati dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 7. Hasil Analisis Penelitian Aktivitas Air (Aw)

Konsentrasi Ozon	Rata-Rata Respon
0 ppm	0,80 ^a ± 0,01
2 ppm	0,78 ^a ± 0,03
4 ppm	0,77 ^a ± 0,07
6 ppm	0,79 ^a ± 0,02
8 ppm	0,79 ^a ± 0,04

Keterangan : Nilai rata-rata dengan notasi huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata dan notasi huruf yang berbeda menunjukkan berbeda nyata menurut uji lanjut Duncan pada taraf 5%.

Berdasarkan pada tabel 7. Hasil Analisis Penelitian Aktivitas Air (a_w) Penurunan nilai A_w pada perlakuan 2 ppm dan 4 ppm diduga disebabkan oleh kemampuan ozon sebagai oksidator kuat yang dapat menyebabkan perubahan pada struktur komponen penyusun beras, terutama pada permukaan lapisan aleuron dan komponen pati. Ozon dapat memicu oksidasi gugus hidroksil pada molekul polisakarida sehingga sebagian air bebas menjadi lebih terikat pada matriks bahan dan menyebabkan penurunan aktivitas air (Kim et al., 1999) Selain itu, kontak ozon dengan permukaan beras juga diduga menyebabkan sedikit perubahan pada porositas permukaan sehingga memengaruhi distribusi air bebas dalam bahan.

Namun, pada perlakuan 6 ppm dan 8 ppm terjadi peningkatan kembali nilai a_w menjadi 0,79. Peningkatan ini diduga disebabkan oleh proses redistribusi air di dalam matriks beras setelah perlakuan ozon. Konsentrasi ozon yang lebih tinggi dapat menyebabkan perubahan struktur komponen penyusun beras, tetapi tidak cukup besar untuk mengurangi jumlah air bebas secara permanen. Selain itu, sifat higroskopis beras hitam pecah kulit memungkinkan terjadinya penyerapan kembali uap air dari lingkungan selama proses penanganan dan pengukuran sehingga menyebabkan nilai a_w sedikit meningkat (Fellows, 2009).

Secara umum, perbedaan nilai aktivitas air antarperlakuan relatif kecil, yaitu hanya berkisar 0,01–0,03 satuan a_w . Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan ozon tidak memberikan perubahan yang berarti terhadap ketersediaan air bebas dalam beras hitam pecah kulit. Faktor-faktor lain seperti homogenitas sampel, distribusi kadar air dalam biji beras, suhu dan kelembapan lingkungan selama penyimpanan, serta lama kontak ozon diduga lebih berpengaruh terhadap variasi nilai a_w dibandingkan konsentrasi ozon yang digunakan.

Tidak berbedanya nilai aktivitas air secara statistik diduga karena ozon lebih banyak bekerja sebagai agen oksidator terhadap komponen kimia tertentu, seperti pigmen, lipid, dan senyawa fenolik, dibandingkan memengaruhi jumlah air bebas di dalam bahan (Santos et al., 2025).

Menurut (Alim et al., 2019) yang melaporkan bahwa perlakuan ozon pada produk sereal tidak memberikan perubahan yang signifikan terhadap aktivitas air bahan. Penelitian (Mendez et al., 2003) juga menyatakan bahwa perlakuan ozon umumnya tidak memengaruhi aktivitas air secara langsung karena ozon lebih berperan dalam proses oksidasi komponen organik dan inaktivasi mikroorganisme.

4.1.1.4 Analisis Kadar Antosianin

Antosianin merupakan senyawa fenolik golongan flavonoid yang berperan sebagai pigmen utama penyebab warna ungu kehitaman pada beras hitam sekaligus merupakan salah satu komponen bioaktif utamanya. Namun,

antosianin bersifat kurang stabil dan rentan mengalami degradasi akibat proses oksidasi (Enaru et al., 2021). Hal ini menjadi dasar pemilihan kadar antosianin sebagai salah satu parameter penelitian, mengingat ozon merupakan oksidator kuat yang dapat mengoksidasi senyawa fenolik, termasuk antosianin, baik secara langsung maupun melalui pembentukan spesies oksigen reaktif. Dengan demikian, analisis kadar antosianin dilakukan untuk mengetahui pengaruh konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisik dan kimia beras hitam pecah kulit.

Berdasarkan hasil penelitian analisis kadar antosianin total menggunakan metode pH differensial, nilai rata-rata kadar antosianin pada beras hitam pecah kulit yang diberi perlakuan ozon berkisar antara 41,71–104,17 mg/100 g, dengan perlakuan tanpa ozon 0 ppm (a1) menghasilkan kadar antosianin tertinggi yaitu 104,17 mg/100 g, sedangkan perlakuan ozon 2 ppm (a2), 4 ppm (a3), 6 ppm (a4), dan 8 ppm (a5) mengalami penurunan berturut-turut menjadi 81,36 mg/100 g, 60,15 mg/100 g, 53,80 mg/100 g, dan 41,71 mg/100 g.

Berdasarkan hasil ANAVA, perlakuan konsentrasi ozon menunjukkan pengaruh yang nyata terhadap kadar antosianin beras hitam pecah kulit. Hal ini ditunjukkan oleh F Hitung sebesar 852,807 lebih besar dibandingkan F Tabel sebesar 3,84. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa perlakuan ozon pada konsentrasi 0-8 ppm menyebabkan perubahan terhadap kadar antosianin beras hitam pecah kulit. Hasil analisis kadar antosianin dapat di lihat pada tabel 8.

Tabel 8. Hasil Analisis Penelitian Uji Kadar Antosianin

Konsentrasi Ozon	Rata-Rata Respon
0 ppm (a1)	104,17 ^c ± 2,12
2 ppm (a2)	81,36 ^d ± 1,76
4 ppm (a3)	60,15 ^c ± 2,47
6 ppm (a4)	53,80 ^b ± 2,19
8 ppm (a5)	41,71 ^a ± 0,90

Keterangan: Nilai rata-rata dengan notasi huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata dan notasi huruf yang berbeda menunjukkan berbeda nyata menurut uji lanjut Duncan pada taraf 5%.

Pada perlakuan kontrol (0 ppm), kadar antosianin mencapai nilai tertinggi yaitu 104,17 mg/100 g. Nilai ini mencerminkan kandungan pigmen alami yang masih utuh pada beras hitam pecah kulit varietas Jeliteng. Hasil ini berada dalam rentang yang dilaporkan (Yamuangmorn & Prom-U-Thai, 2021) pada beras hitam Thailand berkisar 90–120 mg/100 g pada sampel pecah kulit segar. Nilai yang relatif tinggi ini menunjukkan bahwa varietas Jeliteng memiliki potensi pigmen yang baik sebelum perlakuan oksidatif

Pada perlakuan 2 ppm, kadar antosianin turun menjadi 81,36 mg/100 g (penurunan sekitar 21,9% dibandingkan kontrol). Penurunan yang cukup tajam pada konsentrasi rendah ini mengindikasikan sensitivitas antosianin terhadap oksidasi awal. Hasil ini sebanding dengan penelitian (Li et al., 2021) yang melaporkan penurunan antosianin sebesar 18–25% pada beras hitam setelah perlakuan ozon konsentrasi rendah (sekitar 2–3 ppm).

Pada perlakuan 4 ppm, kadar antosianin menurun lebih lanjut menjadi 60,15 mg/100 g (penurunan 26,1% dibandingkan 2 ppm). Penurunan yang masih signifikan ini menunjukkan semakin intensifnya degradasi pigmen seiring peningkatan konsentrasi ozon. Nilai ini mendekati rentang yang dilaporkan (Tiwari et al., 2009) pada produk sereal berpigmen setelah perlakuan oksidatif sedang, yaitu 55–65 mg/100 g.

Pada perlakuan 6 ppm, kadar antosianin menjadi 53,80 mg/100 g dengan penurunan yang relatif lebih kecil (sekitar 10,6% dibandingkan 4 ppm). Melambatnya laju penurunan diduga menandakan bahwa sebagian besar fraksi antosianin yang lebih sensitif telah terdegradasi. Nilai ini mirip dengan hasil (Enaru et al., 2021) pada ekstrak beras hitam yang mengalami pengolahan oksidatif, yaitu sekitar 50–55 mg/100 g.

Pada perlakuan 8 ppm, kadar antosianin mencapai nilai terendah yaitu 41,71 mg/100 g (penurunan 22,5% dibandingkan 6 ppm). Meskipun penurunan

masih terjadi, laju degradasi mulai melambat. Nilai ini berada dalam kategori rendah-sedang dan mendekati temuan (Sui et al., 2018) pada beras hitam yang diproses dengan oksidator kuat, yaitu 35–45 mg/100 g.

penurunan kadar antosianin yang konsisten seiring meningkatnya konsentrasi ozon pada penelitian ini sejalan dengan temuan pada jus stroberi, di mana ozonisasi pada konsentrasi 2,4–7,8% w/w selama hingga 10 menit menyebabkan penurunan kadar antosianin (pelargonidin-3-glukosida) hingga 98,2% (Tiwari et al., 2009).

Penelitian ini menggunakan ozonisasi pada konsentrasi 0,2,4,6,8 ppm dalam fase gas pada bahan padat, tetapi tetap menunjukkan penurunan yang signifikan secara statistik. Perbedaan respons juga terlihat pada penelitian terhadap buah anggur yang masih hidup, yang melaporkan bahwa paparan ozon pascapanen justru dapat meningkatkan sintesis senyawa fenolik, termasuk antosianin, karena ozon berfungsi sebagai pemicu stres oksidatif yang mengaktifkan jalur biosintesis pertahanan pada jaringan tanaman yang masih aktif secara metabolik (Modesti et al., 2021).

Secara keseluruhan, peningkatan konsentrasi ozon dari 0 hingga 8 ppm menyebabkan penurunan kadar antosianin beras hitam pecah kulit secara nyata dan konsisten, dengan laju penurunan yang bervariasi antar taraf akibat perbedaan aksesibilitas fraksi antosianin dalam matriks bekatul terhadap serangan oksidatif ozon.

4.1.2 Respon Fisik

Respon fisik yang di analisis secara statistik : Analisis Profil Gelatinisasi menggunakan *Rapid Visco Analyzer* (RVA).

4.1.2.1 Analisis Profil Gelatinisasi Beras Hitam Pecah Kulit

Analisis Profil Gelatinisasi beras hitam pecah kulit dianalisis menggunakan *Rapid Visco Analyzer* (RVA) yang menghasilkan parameter peak viscosity, Trough viscosity, Breakdown, Final Viscosity, setback, Peak time, dan Pasting Temperature. Peak Viscosity adalah viskositas tertinggi yang dicapai

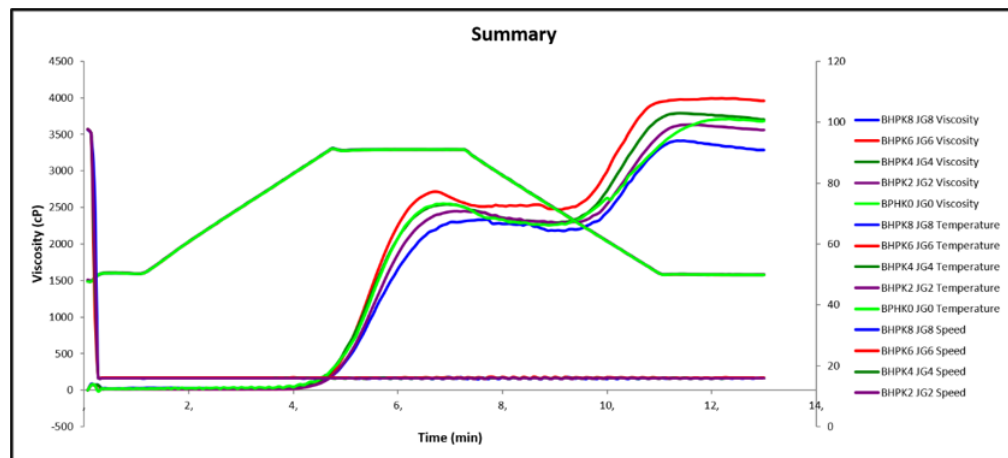
ketika granula pati mengembang maksimal akibat pemanasan. Trough adalah viskositas terendah setelah granula pati mulai pecah pada suhu tinggi. Breakdown merupakan selisih antara Peak Viscosity dan Trough yang menunjukkan tingkat kerapuhan granula pati terhadap panas dan pengadukan. Final Viscosity adalah viskositas akhir setelah proses pendinginan, sedangkan Setback merupakan selisih antara Final Viscosity dan Trough yang menunjukkan kecenderungan retrogradasi pati. Peak time adalah waktu yang dibutuhkan untuk mencapai viskositas puncak, dan Pasting Temperature adalah suhu awal ketika granula pati mulai tergelatinisasi (Maqbool et al., 2024).

Berdasarkan hasil penelitian, nilai Peak Viscosity tertinggi diperoleh pada perlakuan 6 ppm sebesar 2715 cP, sedangkan nilai terendah diperoleh pada perlakuan 8 ppm sebesar 2300 cP. Nilai Trough tertinggi juga diperoleh pada perlakuan 6 ppm sebesar 2336 cP, sedangkan nilai terendah pada perlakuan 8 ppm sebesar 1731 cP. Nilai Breakdown tertinggi diperoleh pada perlakuan 8 ppm sebesar 569 cP, sedangkan nilai terendah pada perlakuan 6 ppm sebesar 379 cP. Nilai Final Viscosity tertinggi diperoleh pada perlakuan 6 ppm sebesar 3958 cP, sedangkan nilai terendah pada perlakuan 8 ppm sebesar 3288 cP. Nilai Setback tertinggi diperoleh pada perlakuan 6 ppm sebesar 1622 cP, sedangkan nilai terendah pada perlakuan kontrol (0 ppm) sebesar 1522 cP. Nilai Peak time tertinggi diperoleh pada perlakuan 2 ppm dan 8 ppm, yaitu masing-masing 7,00 menit, sedangkan nilai terendah pada perlakuan 6 ppm sebesar 6,73 menit. Nilai Pasting Temperature tertinggi diperoleh pada perlakuan 2 ppm sebesar 88,35°C, sedangkan nilai terendah pada perlakuan kontrol (0 ppm) sebesar 67,60°C. Data selengkapnya disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Hasil Analisis Sifat Amilografi *Rapid Visco Analyzer* (RVA)

Parameter	Konsentrasi Ozon				
	0 ppm (a1)	2 ppm (a2)	4 ppm (a3)	6 ppm (a4)	8 ppm (a5)
<i>Peak Viscosity</i> (cP)	2556 ^d ± 6,51	2441 ^b ± 7,02	2543 ^c ± 7,51	2715 ^e ± 8,50	2300 ^a ± 8,50
<i>Trough</i> (cP)	2161 ^d ± 5,51	1943 ^b ± 5,51	2158 ^c ± 6,03	2336 ^e ± 6,51	1730 ^a ± 6,03
<i>Breakdown</i> (cP)	395 ^c ± 1,00	498 ^d ± 2,52	384 ^b ± 2,52	379 ^a ± 3,00	569 ^e ± 2,52
<i>Final Viscosity</i> (cP)	3683 ^c ± 6,51	3558 ^b ± 9,50	3703 ^d ± 8,50	3958 ^e ± 10,50	3288 ^a ± 10,50
<i>Setback</i> (cP)	1522 ^a ± 2,00	1615 ^d ± 4,5	1544 ^b ± 3,51	1622 ^c ± 5,00	1557 ^c ± 4,51
<i>Peak time</i> (menit)	6,87 ^b ± 0,03	7,00 ^d ± 0,03	6,93 ^c ± 0,04	6,73 ^a ± 0,04	7,00 ^d ± 0,03
<i>Pasting Temp</i> (°C)	67,60 ^a ± 0,18	88,35 ^e ± 0,15	84,65 ^b ± 0,15	87,60 ^d ± 0,20	86,00 ^c ± 0,18

Keterangan: Tabel dibaca secara horizontal. Nilai rata-rata dengan notasi huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata dan notasi huruf yang berbeda menunjukkan berbeda nyata menurut uji lanjut Duncan pada taraf 5%.



Gambar 8. Kurva Amilografi *Rapid Visco Analyzer* (RVA)

Berdasarkan hasil (ANOVA) pada Lampiran 9, menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon berpengaruh nyata terhadap seluruh parameter profil pasting RVA beras hitam pecah kulit, yang meliputi *Peak Viscosity*, *Trough*, *Breakdown*, *Final Viscosity*, *Setback*, *Peak Time*, dan *Pasting Temperature*. Oleh karena itu, dilanjutkan dengan uji Duncan pada taraf 5% untuk melihat perbedaan antar konsentrasi pada setiap parameter.

Peak Viscosity pada perlakuan 0 ppm (kontrol) mencapai $2556^d \pm 6,51$ cP. Nilai ini mencerminkan kemampuan alami granula pati beras hitam pecah kulit untuk mengembang maksimal selama pemanasan. Pada perlakuan 2 ppm, nilai menurun menjadi $2441^b \pm 7,02$ cP. Penurunan ini diduga disebabkan oleh oksidasi awal yang mulai mengganggu struktur permukaan granula, sehingga kemampuan swelling sedikit menurun. Pada 4 ppm, *Peak Viscosity* naik kembali menjadi $2543^c \pm 7,51$ cP. Kenaikan ini diduga terjadi karena oksidasi sedang mulai melemahkan interaksi hidrogen di daerah amorf, sehingga granula lebih mudah menyerap air. Selanjutnya pada 6 ppm, nilai mencapai puncak tertinggi yaitu $2715^e \pm 8,50$ cP. Pada konsentrasi ini, oksidasi masih dalam tahap yang menguntungkan bagi *swelling*, sehingga kemampuan granula mengikat air meningkat maksimal (Ding et al., 2015). Sebaliknya, pada 8 ppm *Peak Viscosity* turun tajam menjadi $2300^a \pm 8,50$ cP. Penurunan ini mengindikasikan terjadinya depolimerisasi rantai pati yang lebih intensif, sehingga struktur granula melemah dan kemampuan *swelling* menurun (Du et al., 2024). Perubahan ini

sejalan dengan hasil FTIR (pergeseran pita glikosidik) dan SEM (struktur lebih berpori) yang menunjukkan kerusakan daerah amorf pada konsentrasi tinggi. Konsentrasi ozon berpengaruh nyata terhadap Peak Viscosity ($p < 0,05$). Pola perubahan menunjukkan bahwa oksidasi sedang (hingga 6 ppm) dapat meningkatkan kemampuan swelling, sedangkan oksidasi berlebih (8 ppm) justru menurunkan viskositas puncak.

Trough Pada 0 ppm bernilai $2161^d \pm 5,51$ cP, menunjukkan ketahanan pasta alami terhadap pemanasan. Pada 2 ppm, nilai turun menjadi $1943^b \pm 5,51$ cP. Penurunan ini diduga karena oksidasi awal membuat granula lebih mudah rusak saat dipanaskan. Pada 4 ppm, *Trough* naik menjadi $2158^c \pm 6,03$ cP, hampir mendekati kontrol. Pada 6 ppm, nilai mencapai tertinggi yaitu $2336^e \pm 6,51$ cP. Peningkatan ini diduga disebabkan oleh struktur granula yang masih relatif utuh namun lebih stabil setelah oksidasi sedang. Sebaliknya, pada 8 ppm *Trough* turun drastis menjadi $1730^a \pm 6,03$ cP, menandakan granula sudah sangat lemah dan mudah hancur selama pemanasan (Ding et al., 2015; Du et al., 2024). Maka Konsentrasi ozon berpengaruh nyata terhadap *Trough* ($p < 0,05$). Nilai tertinggi pada 6 ppm menunjukkan stabilitas pasta terbaik, sedangkan nilai terendah pada 8 ppm menandakan kerusakan struktur yang paling intensif.

Breakdown pada 0 ppm bernilai $395^c \pm 1,00$ cP. Pada 2 ppm naik menjadi $498^d \pm 2,52$ cP, menunjukkan granula mulai lebih mudah rusak. Pada 4 ppm dan 6 ppm, nilai menurun berturut-turut menjadi $384^b \pm 2,52$ cP dan $379^a \pm 3,00$ cP. Penurunan ini diduga menandakan bahwa pada konsentrasi sedang, granula relatif lebih tahan terhadap pemanasan. Namun pada 8 ppm, *Breakdown* melonjak menjadi $569^e \pm 2,52$ cP (nilai tertinggi). Peningkatan tajam ini mengindikasikan bahwa oksidasi berlebih menyebabkan granula sangat mudah hancur selama pemasakan (Çatal & İbanoğlu, 2014). Maka Konsentrasi ozon berpengaruh nyata terhadap *Breakdown* ($p < 0,05$). Nilai terendah pada 6 ppm menunjukkan stabilitas termal terbaik, sedangkan nilai tertinggi pada 8 ppm menandakan kerentanan granula yang paling tinggi.

Setback pada 0 ppm bernilai $1522^a \pm 2,00$ cP (terendah). Pada 2 ppm naik menjadi $1615^d \pm 4,5$ cP, kemudian pada 4 ppm $1544^b \pm 3,51$ cP, pada 6 ppm mencapai tertinggi $1622^e \pm 5,00$ cP, dan pada 8 ppm $1557^c \pm 4,51$ cP. Peningkatan *Setback* setelah perlakuan ozon diduga disebabkan oleh reasosiasi rantai amilosa yang lebih mudah terjadi setelah oksidasi. Meskipun ada fluktuasi, secara keseluruhan ozon cenderung meningkatkan kecenderungan retrogradasi dibandingkan kontrol (Çatal & İbanoğlu, 2014). Maka Konsentrasi ozon berpengaruh nyata terhadap *Setback* ($p < 0,05$). Peningkatan *Setback* mengindikasikan bahwa nasi beras hitam pecah kulit cenderung lebih cepat mengeras setelah didinginkan.

Peak Time bernilai $6,87^b \pm 0,03$ menit. Pada 2 ppm dan 8 ppm sama-sama $7,00^d \pm 0,03$ menit (tertinggi). Pada 4 ppm $6,93^c \pm 0,04$ menit, dan terendah pada 6 ppm ($6,73^a \pm 0,04$ menit). Waktu yang lebih singkat pada 6 ppm diduga karena granula lebih cepat mengembang akibat pelemahan daerah amorf. Pada konsentrasi 2 dan 8 ppm, waktu lebih lama diduga karena gangguan struktur yang menghambat proses swelling optimal (Du et al., 2024).

Pasting Temperature pada 0 ppm sangat rendah yaitu $67,60^a \pm 0,18$ °C. Setelah perlakuan ozon, suhu naik drastis: 4 ppm ($84,65^b \pm 0,15$ °C), 8 ppm ($86,00^c \pm 0,18$ °C), 6 ppm ($87,60^d \pm 0,20$ °C), dan tertinggi pada 2 ppm ($88,35^e \pm 0,15$ °C). Peningkatan suhu pasting yang signifikan setelah ozonasi diduga disebabkan oleh perubahan struktur permukaan granula dan pembentukan gugus karbonil/karboksil yang mempersulit masuknya air ke dalam granula. Selain itu, peningkatan proporsi daerah kristalin (hasil XRD) juga berkontribusi pada kebutuhan energi yang lebih tinggi untuk memulai gelatinisasi (Çatal & İbanoğlu, 2014; Du et al., 2024).

Menurut (Ding et al., 2015) yang melaporkan bahwa paparan ozon singkat (sekitar 0,5 jam) meningkatkan *peak viscosity* dan *final viscosity* pati akibat oksidasi ringan yang memperkuat kemampuan *swelling*, namun ketika durasi paparan diperpanjang, kedua nilai viskositas tersebut justru menurun akibat depolimerisasi berlebih. Pola dosis-dependen serupa juga dilaporkan oleh

(Okekunle et al., 2020) yang mengaitkan peningkatan *peak viscosity* pada tahap oksidasi awal dengan pemutusan parsial ikatan glikosidik yang memperluas ruang bagi penetrasi air ke dalam granula.

4.2 Parameter Pengamatan yang Dianalisis Secara Deskriptif

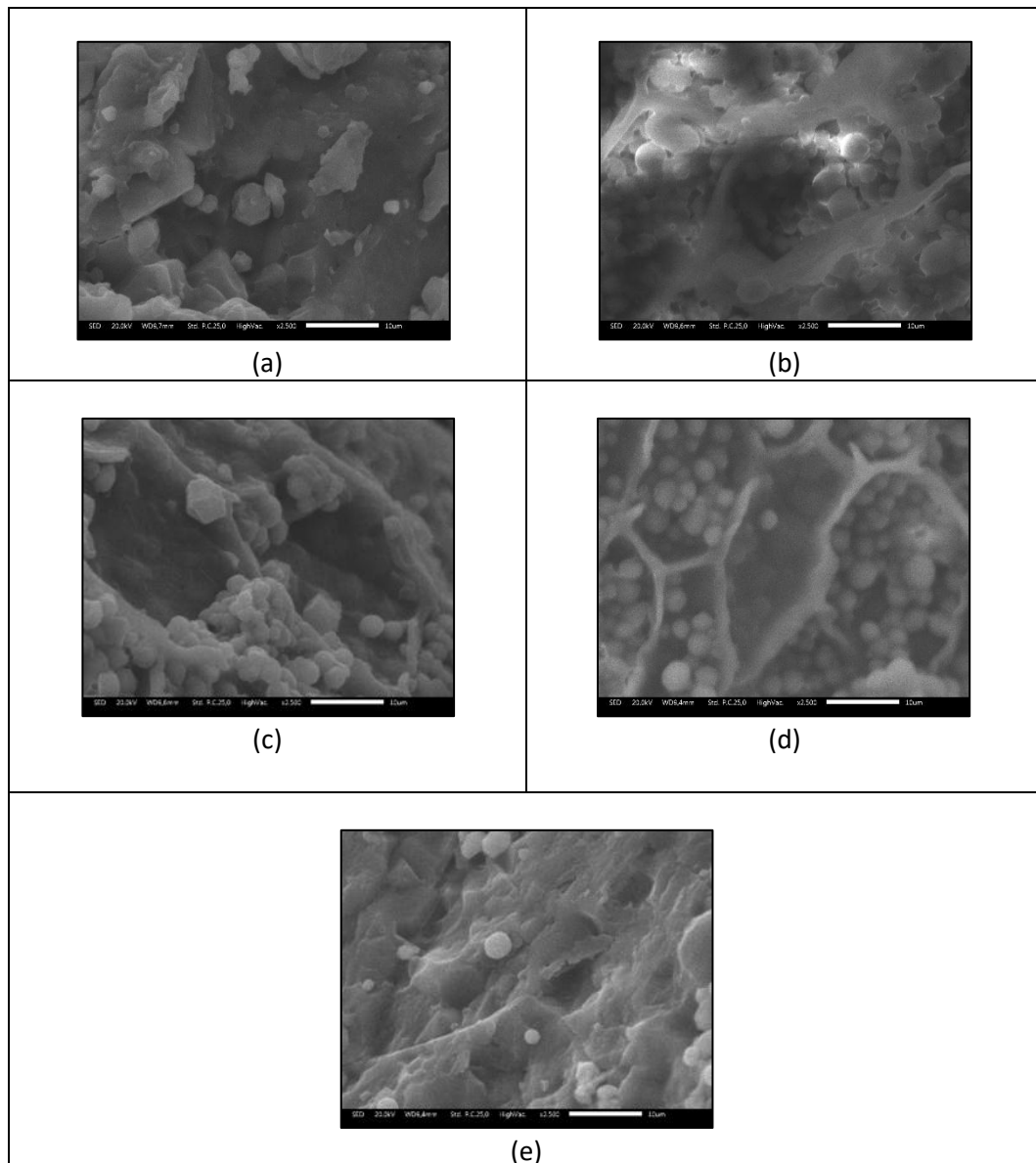
4.2.1 Respon Fisik

Respon fisik yang di analisis secara deskriptif meliputi : Analisis morfologi Granula beras hitam pecah kulit *Scanning Electron Microscopy* (SEM), dan Analisis Kristalinitas *X-Ray Diffraction* (XRD)

4.2.1.1 Analisis Morfologi Granula Beras Hitam Pecah Kulit

Analisis morfologi Granula beras hitam pecah kulit pada penelitian ini dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk mengamati perubahan morfologi permukaan granula pati akibat perlakuan ozon. Prinsip kerja SEM didasarkan pada interaksi antara berkas elektron dan permukaan sampel. Elektron yang dipancarkan dan dipantulkan dari permukaan sampel akan diarahkan oleh lensa elektromagnetik sehingga menghasilkan sinyal yang kemudian dikonversi menjadi citra permukaan sampel. Menurut (Goldstein et al., 2017) *Scanning Electron Microscope* (SEM) merupakan instrumen yang mampu menghasilkan citra permukaan suatu objek dengan resolusi tinggi sehingga memungkinkan pengamatan secara rinci terhadap struktur permukaan.

Dalam pengujian Analisis morfologi permukaan beras hitam pecah kulit 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.



Gambar 9. a-e Konsentrasi 0 ppm (a); Konsentrasi 2 ppm (b); Konsentrasi 4 ppm (c); Konsentrasi 6 ppm (d); Konsentrasi 8 ppm (e)

Pada Gambar 8a (Konsentrasi Ozon 0 ppm), pada perbesaran 2500x menunjukkan permukaan relatif padat dan menyatu, dengan granula-granula pati kecil berbentuk bulat yang tertanam rapat di dalam suatu matriks tanpa batas yang jelas antar-granula. Permukaan partikel besar di sekitarnya cenderung halus hingga sedikit berbutir, tanpa retakan, pori, maupun tanda kerusakan struktural yang berarti.

Gambar 8b (Konsentrasi ozon 2 ppm), memperlihatkan mulai munculnya struktur menyerupai lembaran atau serat tipis (*fibrous/sheet-like structure*) yang terbuka pada sebagian permukaan, disertai kumpulan granula-granula kecil berbentuk bulat yang mulai berkelompok membentuk gugus-gugus kecil (*early agglomeration*). Permukaan partikel besar di sekitarnya juga mulai tampak sedikit lebih kasar dibandingkan kontrol, meskipun granula pati secara individual belum menunjukkan kerusakan yang nyata.

Gambar 8c (Konsentrasi Ozon 4 ppm), granula pati mulai tampak lebih individual dan terpisah dari matriks di sekitarnya. Sebagian granula berbentuk poligonal mulai terlihat berdampingan dengan kelompok granula bulat kecil, sementara latar belakang permukaan menunjukkan pola garis-garis serat (*striasi*) yang lebih jelas dibandingkan konsentrasi sebelumnya, diduga berasal dari struktur dinding sel yang mulai tersingkap akibat terkikisnya lapisan protein-matriks.

Gambar 8d (Konsentrasi Ozon 6 ppm), terlihat menunjukkan adanya perubahan morfologi permukaan yang paling signifikan dibandingkan perlakuan lainnya. Perubahan tersebut ditandai dengan terbentuknya struktur permukaan menyerupai jaring atau sarang lebah (*honeycomb-like atau reticulated structure*), yang terdiri atas kompartemen-kompartemen berbentuk poligonal dan dipisahkan oleh dinding yang relatif tipis. Pada setiap kompartemen tampak granula pati berukuran kecil dan berbentuk bulat yang tersusun secara rapat. Selain itu, pori-pori dan rongga antarkompartemen terlihat lebih terbuka dan terdefinisi dengan jelas, mengindikasikan peningkatan porositas permukaan yang lebih besar dibandingkan perlakuan konsentrasi ozon lainnya.

Gambar 8e (Konsentrasi Ozon 8 ppm), pola *honeycomb* yang dominan pada 6 ppm tidak lagi terlihat jelas; sebagai gantinya, permukaan tampak lebih padat dan menyatu kembali dengan granula-granula pati yang tersingkap secara tidak beraturan di antara latar yang terfragmentasi, beberapa di antaranya tampak terkikis pada bagian tepi. Jumlah pori dan rongga yang teramati relatif lebih sedikit dan kurang teratur dibandingkan 6 ppm, mengindikasikan adanya

kecenderungan reaggregasi sebagian komponen yang terdegradasi pada dosis ozon yang lebih tinggi.

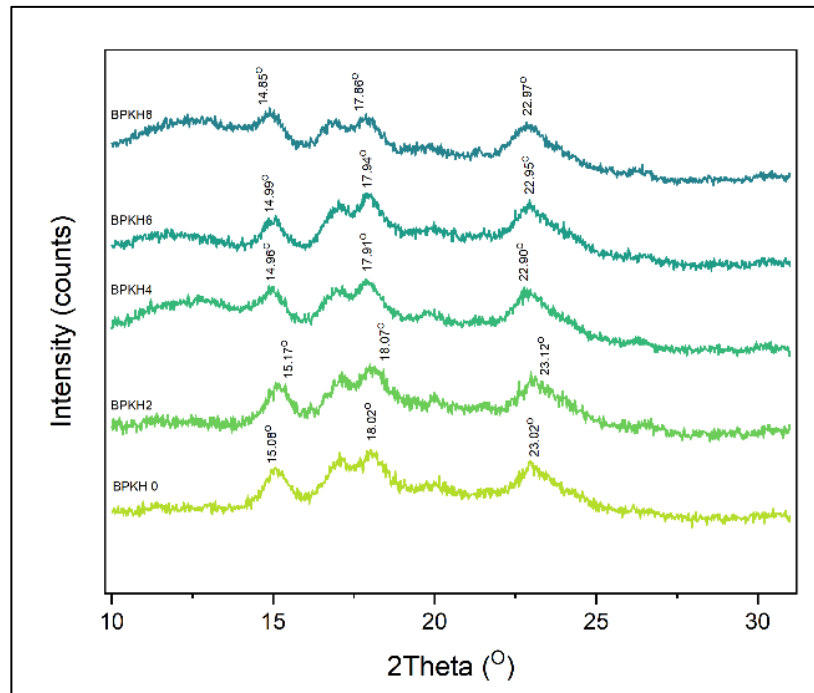
Menurut (Li et al., 2023) melaporkan bahwa perlakuan ozon menyebabkan terbentuknya cekungan dan pori pada permukaan granula pati. Perubahan morfologi tersebut dikaitkan dengan proses oksidasi yang terlebih dahulu terjadi pada daerah amorf granula, yang memiliki tingkat kerentanan lebih tinggi terhadap serangan oksidatif dibandingkan daerah kristalin.

Struktur menyerupai *honeycomb* yang teramati pada perlakuan ozon 6 ppm diduga berkaitan dengan degradasi sebagian protein dan dinding sel sehingga jaringan yang sebelumnya menutupi granula pati menjadi lebih tersingkap. Pada konsentrasi ozon 8 ppm, intensitas oksidasi yang lebih tinggi menyebabkan perubahan morfologi lebih lanjut sehingga pola *honeycomb* tidak lagi terlihat secara jelas dan permukaan granula menjadi lebih padat serta tidak beraturan. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi ozon tidak selalu menghasilkan perubahan morfologi yang bersifat linear. Hasil tersebut sejalan dengan (Almeida et al., 2024) yang melaporkan bahwa ozonasi intensif dapat menyebabkan granula pati kehilangan bentuk aslinya dan mengalami perubahan morfologi yang lebih kompleks.

4.2.1.2. Analisis Kristalinitas Beras Hitam Pecah Kulit

Karakteristik kristalinitas dianalisis menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui perubahan struktur kristalin akibat perlakuan ozon. *X-ray diffraction* (XRD) digunakan untuk menentukan derajat kristalinitas pati berdasarkan perbandingan antara daerah kristalin dan daerah amorf. Daerah kristalin menghasilkan puncak difraksi tajam dan daerah amorf akan memberikan puncak yang lebar pada pola difraksi sinar-X (Zaiyar, 2015).

Gambar 10. Difratomogram Beras Hitam Pecah Kulit



Tabel 10. Sudut Difraksi Beras Hitam Pecah Kulit yang Telah diberi Perlakuan ozon

Konsentrasi	Sudut Difraksi 2θ (°)
0 ppm (a1)	15,0; 18,0; 23,0
2 ppm (a2)	15,1; 18,0; 23,1
4 ppm (a3)	14,9 ; 17,9; 22,9
6 ppm (a4)	14,9 ; 17,9 ; 22,9
8 ppm (a5)	14,8 ; 17,8 ; 22,9

Berdasarkan grafik XRD pada Gambar 10, pola difraksi beras hitam pecah kulit pada perlakuan 0 ppm (BPKH0), menunjukkan pola difraksi khas pati tipe-A yang umum dijumpai pada sereal (Vasanthan & Bhatt, 2007; Sun et al., 2020). Pola tersebut mengindikasikan bahwa struktur kristalin pati pada beras hitam pecah kulit kontrol masih berada dalam kondisi alami (native) dan belum mengalami perubahan akibat perlakuan ozon.

Pada perlakuan 2 ppm (BPKH2), sudut difraksi teramati pada 15,1°; 18,0°; dan 23,1°, Terjadi sedikit pergeseran puncak difraksi ke sudut yang lebih

besar dibandingkan kontrol. Pergeseran ini mengindikasikan adanya perubahan kecil pada susunan kristalin pati akibat tahap awal proses oksidasi, meskipun pola kristal tipe-A masih tetap dipertahankan.

Pada perlakuan 4 ppm (BPKH4), terjadi pergeseran menjadi sekitar $14,9^\circ$; $17,9^\circ$; dan $22,9^\circ$. Pergeseran puncak ke sudut yang lebih kecil menunjukkan adanya perubahan pada struktur kristalin pati yang diduga berkaitan dengan meningkatnya proses oksidasi akibat perlakuan ozon. Meskipun demikian, pola difraksi yang terbentuk masih menunjukkan karakteristik pati tipe-A.

Pada perlakuan 6 ppm (BPKH6), posisi sudut difraksi relatif stabil di sekitar $14,9^\circ$; $17,8^\circ$; dan $22,9^\circ$ tidak banyak berubah dibandingkan perlakuan 4 ppm. Hal ini diduga menunjukkan bahwa perubahan struktur kristalin pati pada konsentrasi tersebut tidak berlangsung secara signifikan..

Selanjutnya pada perlakuan 8 ppm (BPKH8), sudut difraksi teramati pada $14,8^\circ$; $17,8^\circ$; dan $22,9^\circ$ menunjukkan bahwa konsentrasi ozon yang lebih tinggi memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap struktur kristalin pati. Namun, pola difraksi yang diperoleh masih menunjukkan karakteristik pati tipe-A sehingga tidak terjadi perubahan jenis kristal.

Secara umum, pergeseran posisi puncak difraksi yang terjadi antar perlakuan ozon, meskipun relatif kecil, menunjukkan adanya pengaruh ozon terhadap keteraturan struktur kristalin pati pada beras hitam pecah kulit. Pergeseran ke sudut yang sedikit lebih rendah pada konsentrasi tinggi (terutama pada 8 ppm) mengindikasikan adanya gangguan ringan pada susunan kristal pati akibat proses oksidasi. Perubahan ini sejalan dengan penurunan kadar pati dan perubahan morfologi granula yang teramati pada parameter lain.

Tabel 11. Daerah Kristalinitas (%) dan Daerah Amorf (%) XRD (*X-Ray Diffraction*) Beras Hitam Pecah Kulit Akibat Ozonisasi

Konsentrasi	Nilai Kristalinitas (%)	Nilai Amorf (%)
0 ppm (a1)	24,2 %	75,8 %
2 ppm (a2)	22,1 %	77,9 %
4 ppm (a3)	26,0 %	74,0 %
6 ppm (a4)	26,3 %	73,7 %
8 ppm (a5)	30,6 %	69,4 %

Berdasarkan Tabel 10. hasil analisis XRD menunjukkan bahwa tingkat kristalinitas pati beras hitam pecah kulit mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan konsentrasi ozon. Nilai kristalinitas tertinggi diperoleh pada perlakuan 8 ppm (a5) sebesar 30,6% dengan nilai amorf 69,4%, sedangkan nilai kristalinitas terendah terdapat pada perlakuan 2 ppm (a2) sebesar 22,1% dengan nilai amorf 77,9%. Perlakuan kontrol (0 ppm) menunjukkan kristalinitas sebesar 24,2%. Secara keseluruhan, terlihat pola bahwa pada konsentrasi ozon rendah terjadi sedikit penurunan kristalinitas, namun semakin tinggi konsentrasi ozon (4-8 ppm) cenderung meningkatkan proporsi daerah kristalin. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi ozon dapat berpengaruh terhadap karakteristik kristalinitas dan amorf pati beras hitam pecah kulit, di mana pada konsentrasi rendah (2 ppm) terjadi sedikit penurunan kristalinitas, namun semakin tinggi konsentrasi ozon (4-8) cenderung meningkatkan proporsi daerah kristalin.

Penurunan kristalinitas pada perlakuan 2 ppm diduga menunjukkan bahwa pada tahap awal ozonisasi terjadi gangguan terhadap keteraturan struktur granula pati sebelum proses degradasi daerah amorf berlangsung secara dominan. Pada konsentrasi ozon yang masih rendah, oksidasi diperkirakan belum cukup intensif untuk mengurangi fraksi amorf secara signifikan sehingga kristalinitas relatif sedikit menurun. Seiring meningkatnya konsentrasi ozon menjadi 4–8 ppm, degradasi daerah amorf berlangsung lebih dominan sehingga proporsi daerah kristalin yang tersisa meningkat dan nilai kristalinitas relatif menjadi lebih tinggi (Du et al., 2024).

Peningkatan konsentrasi ozon pada beras hitam pecah kulit cenderung menyebabkan kenaikan nilai kristalinitas pati seiring dengan penurunan tingkat amorf. Hal ini terjadi karena ozon sebagai oksidator kuat lebih dahulu menyerang dan mendepolimerisasi daerah amorf granula pati, sehingga memungkinkan terbentuknya struktur kristalin yang lebih teratur (Du et al., 2024). Hasil tersebut sesuai dengan penelitian (Pratiwi et al., 2021) yang menyatakan bahwa modifikasi oksidasi menggunakan ozon menyebabkan perubahan struktur pati melalui degradasi selektif pada wilayah amorf yang kemudian diikuti oleh reorganisasi molekul menjadi lebih kristalin. Pada penelitian ini, peningkatan kristalinitas tertinggi pada konsentrasi 8 ppm menunjukkan bahwa perlakuan ozon berpotensi meningkatkan stabilitas termal dan fungsional pati beras hitam pecah kulit, meskipun pengaruhnya terhadap sifat tekstur dan daya cerna masih perlu dikaji lebih lanjut.

Peningkatan kristalinitas relatif seiring meningkatnya konsentrasi ozon pada penelitian ini sejalan dengan mekanisme degradasi selektif daerah amorf yang juga dilaporkan pada penelitian ozonisasi pati beras ketan, yang menunjukkan bahwa oksidasi secara selektif mendegradasi bagian amorf berberat molekul kecil sehingga secara proporsional meningkatkan kristalinitas relatif granula yang tersisa (Yang et al., 2024).

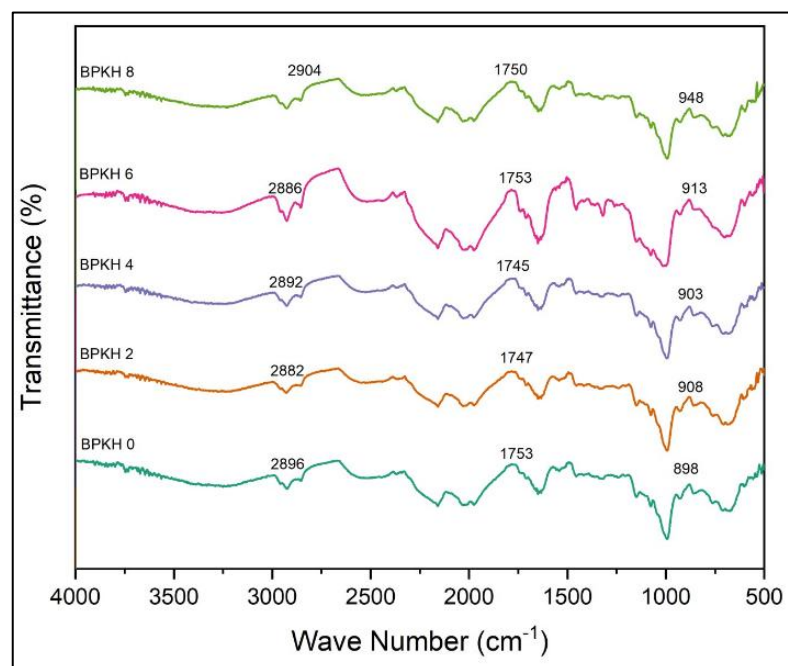
Secara keseluruhan, hasil XRD menunjukkan bahwa ozonisasi memengaruhi struktur kristalin pati beras hitam pecah kulit. Penurunan kristalinitas pada 2 ppm diduga berkaitan dengan gangguan awal terhadap keteraturan struktur granula, sedangkan peningkatan kristalinitas pada 4–8 ppm mengindikasikan degradasi daerah amorf yang lebih dominan sehingga proporsi daerah kristalin relatif meningkat. Pola tersebut sejalan dengan hasil penurunan kadar pati dan peningkatan porositas granula yang diamati melalui SEM. Meskipun demikian, pola difraksi menunjukkan bahwa tipe kristal pati tetap bertahan sebagai tipe A pada seluruh taraf perlakuan.

4.3.1 Respon Kimia

Analisis Fisik yang di analisis secara deskriptif meliputi : Analisis Gugus Fungsi FT-IR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*).

4.3.1.1 Analisis Gugus Fungsi Beras Hitam Pecah Kulit

Karakteristik gugus fungsi dianalisis menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk mengidentifikasi perubahan gugus fungsi akibat perlakuan ozon. FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) digunakan untuk mendeteksi perubahan gugus fungsi akibat proses modifikasi maupun oksidasi pati melalui pergeseran posisi, intensitas atau bentuk pita serapan pada bilangan gelombang tertentu. Secara prinsip, FTIR bekerja berdasarkan penyerapan radiasi inframerah oleh ikatan kimia yang mengalami perubahan momen dipol selama vibrasi molekul, sehingga setiap gugus fungsi menghasilkan pola serapan yang khas pada rentang bilangan gelombang tertentu. (Kizil, Irudayaraj, & Seetharaman, 2002).



Gambar 11. Grafik Spektrum FT-IR Pada Beras Hitam Pecah Kulit

Berdasarkan grafik spektrum FT-IR pada gambar 12. Puncak serapan pada daerah ini teridentifikasi pada bilangan gelombang 2896 cm^{-1} (0 ppm), 2882 cm^{-1} (2 ppm), 2892 cm^{-1} (4 ppm), 2886 cm^{-1} (6 ppm), dan 2904 cm^{-1} (8

ppm). Rentang ini sesuai dengan pita regangan asimetris dan simetris C–H yang berasal dari gugus metil dan metilena pada unit anhidroglukosa penyusun amilosa dan amilopektin (Kizil et al., 2002). Meskipun bilangan gelombang pada pita C–H mengalami sedikit pergeseran antarperlakuan, perubahan tersebut tidak menunjukkan kecenderungan yang konsisten seiring meningkatnya konsentrasi ozon. Perubahan bilangan gelombang yang relatif kecil menunjukkan bahwa gugus C–H pada pati tidak mengalami perubahan yang signifikan setelah perlakuan ozon hingga 8 ppm. Hasil ini mengindikasikan bahwa proses oksidasi yang terjadi masih terbatas pada tahap awal dan belum menyebabkan perubahan yang nyata pada gugus C–H penyusun pati (Du et al., 2024). Kondisi tersebut diduga karena ozon sebagai oksidator terlebih dahulu mengoksidasi gugus hidroksil pada posisi C-2, C-3, dan C-6 menjadi gugus karbonil, kemudian gugus karboksil, sehingga perubahan pada gugus C–H belum tampak secara signifikan (Pratiwi et al., 2021).

Kestabilan relatif pita C-H ini juga konsisten dengan hasil analisis SEM, yang menunjukkan bahwa meskipun morfologi permukaan granula pati BPKH mengalami perubahan yang cukup signifikan pada konsentrasi ozon tinggi, kerangka dasar rantai karbon penyusun molekul pati (backbone glukuan) relatif tetap dipertahankan, sehingga perubahan yang teramati pada SEM lebih mencerminkan modifikasi struktur permukaan dan susunan granula secara makroskopik dibandingkan kerusakan menyeluruh pada tingkat ikatan kimia dasar penyusun pati.

Pada daerah $1745\text{--}1753\text{ cm}^{-1}$, puncak serapan teramati pada bilangan gelombang 1753; 1747; 1745; 1753; dan 1750 cm^{-1} berturut-turut untuk beras hitam pecah kulit dengan konsentrasi ozon 0, 2, 4, 6, dan 8 ppm. Pita ini telah teramati pada sampel 0 ppm, sehingga keberadaannya diduga berkaitan dengan regangan gugus karbonil (C=O) yang telah terdapat secara alami pada komponen penyusun beras hitam pecah kulit. Menurut (Pratiwi et al., 2021) selama proses oksidasi menggunakan ozon, gugus hidroksil pada pati akan teroksidasi menjadi gugus karbonil dan selanjutnya menjadi gugus karboksil. Oleh karena

itu, pembentukan gugus karbonil dan karboksil dapat digunakan sebagai indikator terjadinya oksidasi pati. Namun, pada spektrum beras hitam pecah kulit dalam penelitian ini tidak teramati munculnya pita baru yang menunjukkan pembentukan gugus karbonil akibat oksidasi. Hal tersebut mengindikasikan bahwa perlakuan ozon hingga konsentrasi 8 ppm belum menghasilkan perubahan gugus fungsi yang dapat dideteksi melalui analisis FTIR (Du et al., 2024; Pratiwi et al., 2021).

Pada daerah $898\text{--}948\text{ cm}^{-1}$, terjadi pergeseran progresif dari 898 cm^{-1} (0 ppm) menjadi 908 cm^{-1} (2 ppm), 903 cm^{-1} (4 ppm), 913 cm^{-1} (6 ppm), dan melonjak hingga 948 cm^{-1} pada konsentrasi 8 ppm, dengan intensitas pita yang semakin tajam pada perlakuan 6 dan 8 ppm. Daerah ini dikaitkan dengan vibrasi kerangka ikatan glikosidik α -1,4 pada rantai amilosa dan amilopektin (Kizil et al., 2002). Pergeseran sebesar $\Delta = 50\text{ cm}^{-1}$, terutama yang tajam pada 8 ppm, mengindikasikan bahwa ozon mulai mengoksidasi dan mengganggu daerah amorf granula pati secara lebih nyata seiring dengan peningkatan konsentrasi. Hal ini sejalan dengan mekanisme umum bahwa ozon sebagai oksidator kuat cenderung menyerang zona amorf granula pati terlebih dahulu sebelum mengganggu zona kristalin (Du et al., 2024).

Pergeseran pita glikosidik yang paling nyata terjadi antara konsentrasi 6 ppm dan 8 ppm (dari 913 cm^{-1} menjadi 948 cm^{-1}) memiliki kesesuaian yang baik dengan pola perubahan pada parameter lain pada rentang konsentrasi yang sama, yaitu penurunan kadar pati yang terus berlanjut hingga mencapai titik terendah pada 8 ppm, serta perubahan morfologi granula pada SEM yang menunjukkan kecenderungan reagregasi permukaan pada konsentrasi tertinggi tersebut. Kesesuaian temporal antara ketiga jenis data ini, meskipun diperoleh dari instrumen dan prinsip analisis yang sepenuhnya berbeda, memperkuat keyakinan bahwa konsentrasi 8 ppm merupakan titik ketika modifikasi struktural pati BPKH berlangsung paling intensif di antara seluruh taraf konsentrasi yang diuji.

Tabel 12. Hasil Pembacaan Analisis FT-IR

No	Konsentrasi Ozon					Gugus Fungsi
	0 ppm	2 ppm	4 ppm	6 ppm	8 ppm	
1)	2896	2882	2892	2886	2904	C–H stretching (alifatik, rantai pati)
2)	1753	1747	1745	1753	1750	C=O stretching (ester, lipid bekatul)
3)	898	908	903	913	948	C-O-C glikosidik, C-O stretching, dan wilayah sidik jari (anomerik α -1,4/ α -1,6)

Secara keseluruhan, spektrum FTIR menunjukkan bahwa perlakuan ozon hingga konsentrasi 8 ppm menyebabkan perubahan struktur kimia beras hitam pecah kulit yang bersifat selektif. Perubahan paling nyata ditunjukkan oleh pergeseran pita pada daerah vibrasi ikatan glikosidik ($898\text{--}948\text{ cm}^{-1}$), yang mengindikasikan adanya perubahan pada struktur pati, terutama di daerah amorf granula. Sebaliknya, pita serapan yang berkaitan dengan regangan C–H dan gugus karbonil (C=O) relatif tidak mengalami perubahan yang berarti, sehingga menunjukkan bahwa kerangka utama pati dan gugus fungsi tersebut masih relatif stabil. Perubahan tersebut mengindikasikan adanya modifikasi pada struktur pati, yang didukung oleh penurunan kadar pati serta perubahan morfologi granula yang diamati melalui analisis SEM. Sementara itu, hasil analisis XRD menunjukkan adanya perubahan pada derajat kristalinitas, meskipun polanya tidak menunjukkan kecenderungan yang linier terhadap peningkatan konsentrasi ozon.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini akan menguraikan mengenai : (5.1) Kesimpulan, dan (5.2) Saran.

5.1 Kesimpulan

1. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan bahwa konsentrasi ozon (0, 2, 4, 6, dan 8 ppm) berpengaruh terhadap karakteristik fisik dan kimia beras hitam pecah kulit. Konsentrasi ozon tidak berpengaruh nyata ($p > 0,05$) terhadap kadar air dan aktivitas air (a_w), tetapi berpengaruh nyata ($p < 0,05$) terhadap kadar pati dan kadar antosianin, dengan kecenderungan menurun seiring meningkatnya konsentrasi ozon dan konsentrasi ozon juga berpengaruh nyata ($p < 0,05$) terhadap seluruh parameter profil gelatinisasi (RVA).
2. Karakterisasi menggunakan *Rapid Visco Analyzer (RVA)*, *X-Ray Diffraction (XRD)*, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)*, dan *Scanning Electron Microscopy (SEM)* menunjukkan bahwa perlakuan ozon memengaruhi karakteristik pati beras hitam pecah kulit melalui proses oksidasi. Perubahan tersebut ditunjukkan oleh perubahan karakteristik pasting, perubahan tingkat kristalinitas tanpa mengubah tipe kristal pati A, pergeseran pita serapan FTIR tanpa terbentuknya gugus fungsi baru, serta perubahan morfologi granula pati yang menjadi lebih berpori pada konsentrasi ozon tertentu.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran antara lain :

1. Dilakukan pengujian mikrobiologis (seperti total mikroba, kapang, atau khamir) pada penelitian selanjutnya, mengingat salah satu tujuan umum aplikasi ozon pada bahan pangan adalah aspek keamanan pangan, sementara manfaat tersebut belum diukur secara langsung dalam penelitian ini.

2. Dilakukan pengujian aktivitas antioksidan sehingga perubahan kadar antosianin akibat perlakuan ozon dapat dikaitkan secara langsung dengan perubahan sifat fungsional beras hitam pecah kulit.
3. Dilakukan analisis kadar amilosa dan amilopektin secara terpisah pada penelitian selanjutnya, untuk memperjelas mekanisme perubahan sifat fungsional pati beras hitam pecah kulit akibat ozonisasi yang belum dapat dijelaskan secara rinci hanya melalui data kadar pati total.
4. Dilakukan penelitian selanjutnya analisis *Resistant Starch (RS)* agar dapat diketahui pengaruh perlakuan ozon terhadap kandungan pati resisten serta kaitannya dengan sifat fungsional beras hitam pecah kulit.

DAFTAR PUSTAKA

- Afistia, N. R. (2024). *Arrhenius Estimating The Shelf Life Of Black Rice Extract Beverages In Metalized Packaging With Arrhenius*. 14(2).
- Agung, A., Putri, S., Andriani, R., Hasnul, M., & Abd, N. (2020). *Physical Properties And Glycemic Index Of Organic And Conventional Black Rice Grown In Bali , Indonesia*. 10(4), 1688–1695.
- Alim, M., Kusnandar, F., & Hariyadi, P. (2019). Pengaruh Perlakuan Ozon Terhadap Karakteristik Mutu Produk Serealia. *Jurnal Teknologi Dan Industri Pangan*, 30 (2), 145–152.
- Almeida, R. L. J., Santos, N. C., Brito, D. A. C. O., Leite, A. C. N., Morais, J. R. F., De Oliveira, B. F., Da Silva, P. B., Da Silva, Y. T. F., Da Silva Freitas, R. V., Bonfim, K. S. D., De Sousa, A. B. B., De Figueiredo, M. J., Da Costa, G. A., De Assis Cavalcante, J., & Pereira, T. D. S. (2024). *Dual Modification Of Starch: Synergistic Effects Of Ozonation And Pulsed Electric Fields On Structural, Rheological, And Functional Attributes*. *Food Chemistry*, 462 (Pt2), 141718. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141718>
- 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. Universitas Pasundan.
- AOAC, I. (2005). *Official Methods Of Analysis*, (18 Th). AOAC International, Gaithersburg, MD.
- Aryana, I. G. P. M. (2024). Desiminasi Varietas Inpari Unram 1 BSP (Padi Fungsional Beras Hitam) Di Desa Karang Sidemen Kecamatan Batukliang Utara Kabupaten Lombok Tengah. *Jurnal Pepadu*, 5 (4), 871–880. <https://doi.org/10.29303/pepadu.v5i4.5908>
- Balai Besar Penelitian Tanaman Padi. (2010). *Padi Beras Hitam*.
- BSN. (2015). *SNI 6128:2015 Beras*.
- Das, S., Mitra, S., Khurana, S. M. P., Gaur, A., Samanta, S., Samanta, S., Rasane, P., & Dhua, S. (2023). *Bioactive Compounds, Functional Properties, Health Benefits, And Food Applications Of Black Rice: A Comprehensive Review*. *Food Chemistry Advances*, 5, Article 100759.
- Dayriza, D. I., Pamungkas, D. H., & Maryani, Y. (2021). Waktu Pemberian Pupuk Bokashi Dan Dosis Pupuk Majemuk Terhadap Tanaman Padi Beras Hitam

- (*Oryza Sativa L. Indica*) Varietas Jeliteng. *Jurnal Ilmiah Agroust*, 5(2), 106–125.
- Dewi, A. R., & Wihandani, D. M. (2025). Kandungan Dan Aktivitas Antioksidan Senyawa Antosianin Pada Beras Hitam : Sebuah Tinjauan Literatur. *Jurnal Kedokteran*, 56(2), 86–90. <https://doi.org/10.15562/Medicina.V56i2.1395>
- Ding, W., Wang, Y., Zhang, W., Shi, Y., & Wang, D. (2015). *Effect Of Ozone Treatment On Physicochemical Properties Of Waxy Rice Flour And Waxy Rice Starch*. *International Journal Of Food Science & Technology*, 50(3), 744–749. <https://doi.org/10.1111/Ijfs.12691>
- 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*, 10, 23. <https://doi.org/10.1016/J.Fochx.2024.101234>
- Enaru, B., Dret, G., Pop, T. D., & St̃, A. (2021). *Anthocyanins : Factors Affecting Their Stability And Degradation*.
- Fellows, P. J. (2009). *Food Processing Technology: Principles And Practice* (3rd Ed.). Woodhead Publishing.
- Fithria, R. F., Aryono, B., & Zainuddin, M. (2022). Pengaruh Intensitas Pencahayaan Yang Berbeda Pada Kultur Spirulina Platensis. *Journal Of Marine Research*, 11(4), 819–828.
- Fitriana, M., Romadhan, M., & Basriman, I. (2022). Pengaruh Substitusi Tepung Terigu Dengan Tepung Beras Hitam Bolu Kukus. *Jurnal Teknologi Pangan Dan Kesehatan (The Journal Of Food Technology And Health)*. <https://doi.org/10.36441/Jtepakes.V3i2.575>
- Fitriyah, D., Ayu, D. P., Puspita, S. D., Yuanta, Y., & Ubaidillah, M. (2021). Analisis Kandungan Senyawa Bioaktif , Nutrisi Dan Aktivitas Antioksidan Pada Minuman Ekstrak Beras Hitam. *Jurnal Tekonologi Pangan*, 3(1), 21–30.
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2017). *Scanning Electron Microscopy And X-Ray Microanalysis*. In *Journal Sains (4th Ed.)*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9>
- Haifan, M. (2017). *Review Kajian Aplikasi Teknologi Ozon Untuk Penanganan Buah, Sayuran Dan Hasil Perikanan*. *Jurnal IPTEK*, 1 (1), 15–21.
- Hartono, S. A. N., Rosida Dedin Finatsiyatull Rosida, & Ayu, A. R. (2025). *Kajian Nutrisi Cookies Beras Hitam (Oryza Sativa L) Dan*. 4, 1–12.

- Hartoyo, B., & Rachma, Y. . (2022). Pemanfaatan Teknologi Ozon Sebagai Green Technology Pada Penanganan Hasil Pertanian. *Jurnal Agrifoodtech*, 1 (2), 68–80.
- Haryadi. (2006). Teknologi Pengolahan Beras. Penerbit UGM Press : Yogyakarta.
- Hrynko, I. (2025). *The Effect Of Ozone On The Behavior Of Systemic And Non-Systemic Pesticides In Cereal Grains*. 30, 4087. <https://doi.org/10.3390/Molecules30204087>
- Huang, Y., Sui, L., Wang, W., Geng, C., & Yin, B. (2012). *Visible Injury And Nitrogen Metabolism Of Rice Leaves Under Ozone Stress, And Effect On Sugar And Protein Contents In Grain*. *Atmospheric Environment*, 62, 433–440.
- Istiqomah, N. (2022). Karakteristik Fisik, Kimia, Dan Aktivitas Antioksidan Beras Hitam (*Oryza Sativa L. Indica*) Dari Berbagai Daerah Di Indonesia. *Jurnal Teknologi Pangan*.
- Kaur, K., Kaur, P., Kumar, S., & Zalpouri, R. (2022). *Ozonation As A Potential Approach For Pesticide And Microbial Detoxification Of Food Grains With A Focus On Nutritional And Functional Quality*. *Food Reviews International*, 00(00), 1–33. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2092129>
- Kim, J. G., Yousef, A. E., & Dave, S. (1999). *Application Of Ozone For Enhancing The Microbiological Safety And Quality Of Foods: A Review*. *Journal Of Food Protection*, 62 (9), 1071–1087.
- Kizil, R., Irudayaraj, J., & Seetharaman, K. (2002). *Characterization Of Irradiated Starches By Using FT-Raman And FTIR Spectroscopy*. *Journal Of Agricultural And Food Chemistry*, 50(14), 3912–3918. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jf011652p>
- Laboratorium X-Ray, D. (2020). *Standard Operating Procedure X-Ray Diffractometer (SOP) Rev 1.0*.
- Labuza, T. P. (1980). *The Effect Of Water Activity On Reaction Kinetics Of Food Deterioration*. *Food Technology*, 34(4), 36–41.
- Latifa, N., Nurhidajah, & Yusuf, M. (2019). Stabilitas Antosianin Dan Aktivitas Antioksidan Tepung Beras Hitam Berdasarkan Jenis Kemasan Dan Lama Penyimpanan. *Jurnal Pangan Dan Gizi*, 9(02).
- Lestari, S., & Kurniawan, F. (2021). Pemutuan Fisik Gabah Dan Beras Menurut Standar Nasional Indonesia (SNI) *Physical Qualifications Of Grain Dan Rice According To Indonesian National*. *Journal Of Applied Agricultural Sciences*, 5 No. 2, 159–168. <https://doi.org/10.25047/Agriprima.V5i2.438>

- Li, J. (2009). *Total Anthocyanin And Dietary Fiber Contents In Blue Corn Cookies As Affected By Ingredients And Oven Types* [Kansas State University]. <https://Krex.K-State.Edu/Items/28bdf90e-8aa9-48f8-A51f-104aa2ff8f8e>
- Li, J., Du, M.-Y., Din, Z., Xu, P., Chen, L., Chen, X., Wang, Y., Cao, Y., Zhuang, K., Cai, J., Lyu, Q., Chang, X., & Ding, W. (2023). Multi-Scale Structure Characterization Of Ozone Oxidized Waxy Rice Starch. *Carbohydrate Polymers*, 307. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120624>
- Li, Ma, D., Wang, Y., & Li, D. (2021). *Effect Of Ozone Treatment On The Stability Of Anthocyanins In Black Rice*. *Food Chemistry*, 345(128712). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128712>
- Made, N., Wahyuni, S., Wrasati, L. P., & Hartiati, A. (2020). Pengaruh Perlakuan Suhu Dan Waktu Maserasi Terhadap Karakteristik Ekstrak Daun Bambu Duri (*Bambusa Blumeana*) Sebagai Sumber Antioksidan *The Influence Of Temperature And Maceration Time On Characteristic Of Bambu Duri Leaf Extract (Bambusa Blumeana) Fo*. *Jurnal Ilmiah Teknologi Pertanian*, 5(1), 27–33.
- Mahardani, O. T., & Yuanita, L. (2021). Efek Metode Pengolahan Dan Penyimpanan Terhadap Kadar Senyawa Fenolik Dan Aktivitas Antioksidan. *Jurnal Kimia*, 10(1), 64–78.
- Martina, Jaenudin, A. A., & Kartahadimaja. (2024). Kualitas Beras Dan Kandungan Gizi Tiga Genotipe Padi Yang Dibudidayakan Secara Organik Dan Non Organik. *Jurnal Tanaman Pangan Dan Hortikultura* E-ISSN 2685-4627, 6(April), 38–52.
- Maryati, Y., Susilowati, A., Artanti, N., Lotulung, P., & Aspiyanto, A. (2020). Pengaruh Waktu Fermentasi Terhadap Aktivitas Antioksidan Dan Kadar Betasianin Minuman Fungsional Dari Buah Naga (*Hylocereus Polyrrhizus*) Dan Umbi Bit (*Beta Vulgaris*). *Vol 7*, 48–58. <https://doi.org/10.29122/jbbi.v7i1.3732>
- Mendez, F., Maier, D. E., Mason, L. J., & Woloshuk, C. P. (2003). *Penetration Of Ozone Into Columns Of Stored Grains And Effects On Quality Parameters*. *Journal Of Stored Products Research*, 39 (1), 33–44.
- Metwaly, K. H., Al-Anany, M. S., & Gad, H. A. (2026). *Effect Of Grain Type On The Effectiveness Of Ozone Against Two Sitophilus Species*. *Journal Of Plant Diseases And Protection*, 133, 33. <https://doi.org/10.1007/S41348-025-01217-8>
- Mietha, M. (2012). *Dietary Fiber Contents Of Pigmented Rice Varieties And Their Potential Health Benefits*. *Asian Journal Of Clinical Nutrition*, 4(1), 1–10.

<https://doi.org/10.3923/Ajcn.2012.1.10>

- Modesti, M., Macaluso, M., Taglieri, I., Bellincontro, A., & Sanmartin, C. (2021). *Ozone And Bioactive Compounds In Grapes And Wine*. 1–14.
- Moris, A. O., Nur, M., & Setyatwan, H. (2022). Pengaruh Pemaparan Gas Ozon Terhadap Kadar Air , Lignin , Selulosa Dan Hemiselulosa Pada Azolla Pinnata Effect Of Ozonation On Water Content , Lignin , Cellulose And Hemicellulose Of Azolla Pinnata. *Jurnal Ilmu Ternak UNPAD*, 22(1), 1–5. <https://doi.org/10.24198/Jit.V22i1.38037>
- Muchtadi, T. R. (1992). Ilmu Pengetahuan Bahan Pangan. CV Alfabeta : Bandung.
- Nasrullah, Husain Halimah, & Muh., S. (2020). Pengaruh Suhu Dan Waktu Pemanasan Terhadap Stabilitas Pigmen Antosianin Ekstrak Asam Sitrat Kulit Buah Naga Merah. *Jurnal Chemical, Vol.21 Nom*, 150–162.
- Ok, S. Y., Choi, S., & Park, J. (2001). *Dietary Fiber And Hemicellulose Content In Colored Rice Varieties. Korean Journal Of Food Science And Technology*, 33(5), 842–847.
- Okekunle, M. O., Adebawale, K. O., Olu-Owolabi, B. I., & Lamprecht, A. (2020). *Physicochemical, Morphological And Thermal Properties Of Oxidized Starches From Different Botanical Origins*. 72(1900265.), (11–12).
- Pasaribu, S. F., Wiboworini, B., & Kartikasari, L. R. (2021). Analisis Antosianin Dan Flavonoid Ekstrak Kecambah Beras Hitam. *Jurnal Dunia Gizi*, 4(1), 8–14.
- Pramitasari, R., & Angelica, N. (2020). Ekstraksi , Pengeringan Semprot , Dan Analisis Sifat Fisikokimia. *Jurnal Aplikasi Teknologi Pangan*, 9(2), 83–94.
- Pratiwi, M. S., Legowo, A. M., & Pratama, Y. (2021). Pengaruh Oksidasi Menggunakan Ozon Terhadap Sifat Fisik Pati *The Effect Of Oxidation Using Ozone On The Physical Properties Of Starch*. 5(1), 24–26.
- Rickes, S., Almeida, F., Tuchtenhagen, C., Dietrich, C., Jos, L., Luis, J., Monks, F., & Oliveira, M. De. (2022). *Reduced Of Mycotoxin Levels In Parboiled Rice By Using Ozone And Its Effects On Technological And Chemical Properties. Food Chemistry*, 372. <https://doi.org/10.1016/J.Foodchem.2021.131174>
- 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), 68–82. <https://doi.org/10.33104/Jihp.V17i2.7808>

- Sandhu, H. P. S., Manthey, F. A., & Simsek, S. (2012). *Ozone Gas Affects Physical And Chemical Properties Of Wheat (Triticum Aestivum L.) Starch. Carbohydrate Polymers*, 87(2), 1261–1268. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.09.003>
- Santos, N. C., Almeida, R. L. J., Tomé, A. E. S., Teles, F. G., Araújo, R. H. C. R., Farias, J. Q., Fonseca, M. T. S., & Silva, V. M. A. (2025). *Ozone Aeration Enhance Flowability , Structure , And Antioxidant Activity In Blueberry Pulp Powder*. 14, 1–19.
- Savi, G., Gomes, T., Canever, S., Feltrin, A., Piacentini, K., Scussel, R., Oliveira, D., Machado-De-Ávila, R., Cargnin, M., & Angioletto, E. (2020). *Application Of Ozone On Rice Storage: A Mathematical Modeling Of The Ozone Spread, Effects In The Decontamination Of Filamentous Fungi And Quality Attributes. Journal Of Stored Products Research*, 87, 101605. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101605>
- 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>
- Suarti, B., Rahman, M. H., Fuadi, M., & Setiavani, G. (2024). Sifat Fisikokimia Beras Pecah Kulit Dan Beras Sosoh Pada Beberapa Varietas. *Jurnal Pangan*, 3 No. 1, 1–6.
- Suarti, B., Setiavani, G., Iqbal, M. ., Fuadi, M., & Apriyanti, I. (2023). Perbedaan Sifat Fisik Dan Amilosa Beras Pecah Kulit Dan Beras Sosoh. *Jurnal Pangan*, 17, 1274–1282.
- Suarti, B., Sukarno, S., Ardiansyah, A., & Budijanto, S. (2021). Karakterisasi Sifat Fisikokimia Dan Fungsional Beras Pecah Kulit Berpigmen Dan Tanpa Pigmen. *Jurnal Pangan*, 30(1), 13–22. <https://doi.org/10.33964/Jp.V30i1.515>
- Suarti, B., & Wannawa, A. (2025). Karakteristik Tepung Dari Beras Pecah Kulit Dengan Metode Pregelatinisasi. *Jurnal Pangan*, 19, 2145–2157.
- Sui, X., Zhang, Y., & Zhou, W. (2018). *Impact Of Processing On Anthocyanins In Pigmented Grains. Journal Of Cereal Science*, 81, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.03.012>
- Tatang Irianti, T., Kuswandi, & Nuranto, S. (2017). *Antioksidan*. UGM PRESS.
- Tiwari, B. K., O'Donnell, C. P., Patras, A., Brunton, N., & Cullen, P. . (2009). *Effect Of Ozone Processing On Anthocyanins And Ascorbic Acid Degradation Of Strawberry Juice. Food Chemistry*, 113(4), 1119–1126.

- U.S. Department Of Agriculture, A. R. S. (2011). *USDA National Nutrient Database For Standard Reference, Release 22*. <https://www.ars.usda.gov>
- Winarno, F. G. (2004). *Kimia Pangan Dan Gizi*. Gramedia Pustaka Utama.
- Xiong, W., Devkota, L., Zhang, B., Muir, J., & Dhital, S. (2022). *Intact Cells: “Nutritional Capsules” In Plant Foods. Comprehensive Reviews In Food Science And Food Safety*, 21(2), 1198–1217. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12904>
- Yamuangmorn, S., & Prom-U-Thai, C. (2021). *The Potential Of High-Anthocyanin Purple Rice As A Functional Ingredient In Human Health. Antioxidants*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/Antiox10060833>
- Zahra, N. And S. J. (2020). *Brown Rice As Useful Nutritional Source. Pakistan Journal Of Agricultural Research. Pakistan Journal Of Agricultural Research*, 33(3), 445–453. <https://doi.org/10.17582/Journal.Pjar/2020/33.3.445.453>
- Zainul, M. (2020). Pengaruh Pemberian Buah Naga Merah , Jambu Biji Merah , Dan Kombinasinya Terhadap Kapasitas Antioksidan Total Dan Kadar Malondealdehid Pada Remaja Perokok. *Jurnal Gizi Indonesia*, 9(1), 53–60.
- Zhu, F. (2018). *Effect Of Ozone Treatment On The Quality Of Grain Product. Food Chemistry*, 264, 358–366. <https://doi.org/10.1016/J.Foodchem.2018.05.047>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814618308422>)

LAMPIRAN

Lampiran 1. Prosedur Analisis Kimia

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

Alat : Timbangan, Cawan, Desikator, Tang krus, dan Oven.

Bahan : Sampel beras.

Prosedur :

1. Cawan dipanaskan dalam oven selama 30 menit dengan suhu 105°C, kemudian didinginkan dalam desikator selama 15 menit
2. Ditimbang cawan hingga berat konstan dan didapat W_0
3. Menimbang sampel sebanyak 2 gram menggunakan cawan
4. Ditimbang cawan dan sampel sebelum pengeringan dan didapat W_1
5. Dilakukan pengeringan dalam oven pada suhu 105°C selama 3 jam, kemudian didinginkan dalam desikator selama 15 menit
6. Ditimbang cawan yang berisi sampel setelah dikeringkan dan didapat W_2 .

Rumus yang digunakan untuk menentukan kadar air yaitu

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

Keterangan :

W_0 : Berat cawan kosong (g)

W_1 : Berat cawan + sampel awal (sebelum proses pengeringan) (g)

W_2 : Berat cawan + sampel konstan (sesudah proses pengeringan) (g)

2. Prosedur Analisis Pati Metode Luff Schroll (AOAC, 2005)

Alat : Timbangan analitik, Erlenmeyer 500 mL, Gelas ukur, pemanas, Termometer, Pipet volume (10 mL), Labu takar 500 mL, Buret, Statif dan klem, Erlenmeyer 250 mL dan refluks

Bahan : Sampel beras, Aquadest, HCl pekat, NaOH 30%, Indikator fenoltalein, HCl 9,5 N, Reagen Luff Schroll, H_2SO_4 , KI, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,1 N, dan Indikator amilum 1%

Prosedur :

1. Sampel sebanyak 0,5 gram ditimbang dan dimasukkan kedalam erlenmeyer 500 mL, lalu ditambahkan dengan 200 mL aquadest dan 15 mL HCl pekat.
2. 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).
3. Kemudian pindahkan dalam labu takar 500 ml dan tanda bataskan dengan aquadest (larutan sampel C).
4. Dari larutan sampel C dipipet sebanyak 10 ml masukkan dalam erlenmeyer, ditambahkan 15 ml aquadest dan 10 ml reagen Luff Schoorl.
5. Direfluks selama 15 menit, lalu dinginkan di air mengalir.
6. Setelah dingin tambahkan 15 ml H₂SO₄ dan 1 gram KI.
7. Kemudian dititrasi dengan Na₂S₂O₃ 0,1 N hingga warna kuning mentah (pucat) atau kuning jerami kemudian tambahkan 1 ml amylum 1 % homogenkan
8. dan dititrasi kembali menggunakan Na₂S₂O₃ 0,1 N hingga titik akhir titrasi larutan biru hilang atau berwarna putih.

Kadar pati dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

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

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

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

Analisis FT-IR direkam pada spektrofotometer Shimadzu 4300 FT-IR, menggunakan teknik disk kalium bromide, dalam kisaran 4200-400 cm-

1. Disk disiapkan dari sampel yang digiling (1 mg) dan KBr (100 mg) menggunakan 400 kg/cm² tekanan selama 10 menit.

4. Prosedur Analisis Antosianin menggunakan Metode pH Differential (Pasaribu et al., 2021)

Alat : Spektrofotometer UV-Vis, kuvet, mikropipet, labu ukur, Gelas beker, Tabung reaksi dan pH meter

Bahan : sampel, Larutan buffer KCl pH 1,0, Larutan buffer natrium asetat pH 4,5 dan aquadest

Prosedur :

1. Ekstrak beras hitam diencerkan menggunakan buffer KCl pH 1,0 hingga diperoleh nilai absorbansi kurang dari 1,2 pada panjang gelombang 510 nm.
2. Dua larutan sampel kemudian disiapkan, yaitu:
3. Sampel pertama dicampur dengan buffer KCl pH 1,0.
4. Sampel kedua dicampur dengan buffer natrium asetat pH 4,5.
5. Masing-masing larutan diencerkan sesuai faktor pengenceran yang telah ditentukan.
6. Larutan sampel kemudian dipindai menggunakan spektrofotometer pada rentang panjang gelombang 510 nm – 750 nm untuk menentukan panjang gelombang maksimum (λ vis-maks).
7. Setelah λ vis-maks diperoleh, dilakukan pengukuran absorbansi pada: λ vis-maks 700 nm (sebagai koreksi kekeruhan larutan)
8. Nilai absorbansi total dihitung menggunakan persamaan:

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

Rumus perhitungan Kadar antosianin Total

$$Total \text{ antosianin } \left(\frac{mg}{g} \right) = \frac{A \times MW \times DF \times 1000}{\epsilon \times l}$$

Keterangan

A = Absorbansi larutan

MW	= <i>Molecular weight</i> (449,2 g/ mol)
DF	= <i>Dilution factor</i> (faktor pengenceran)
ϵ	= Absorptivitas molar <i>cyanidin-3-glucoside</i> (26.900)
b	= Tebal kuvet = 1
MAP	= <i>Monomeric Anthocyanin Pigment</i>

Lampiran 2. Prosedur Analisis Fisik

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

Alat : *X-Ray Diffractometer*; sampel *holder*; komputer dengan software pengolah data XRD.

Bahan : Sampel beras dan Standar silikon (Si) sebagai bahan kalibrasi alat.

Prosedur :

1. Menyiapkan sampel yang akan dianalisis, kemudian merekatkannya pada kaca dan memasang pada tempatnya berupa lempeng tipis berbentuk persegi panjang (sampel *holder*) dengan lilin perekat.
2. Memasang sampel yang telah disimpan pada sampel *holder* kemudian meletakkannya pada sampel stand dibagian goniometer.
3. 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.
4. 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.
5. Melihat hasil difraksi pada komputer dan intensitas difraksi pada sudut 2θ tertentu dapat dicetak oleh mesin printer.
6. Data yang terekam berupa sudut difraksi (2θ), besarnya intensitas (I), dan waktu pencatatan perlangkah (t).

7. Setelah data diperoleh analisis kualitatif dengan menggunakan *search match analysis*, yaitu membandingkan data yang diperoleh dengan data standar (*Power Diffraction File database = database PDF*).

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

Scanning Electron Microscopy (SEM) dilakukan untuk analisis mikroskopis produk. Sampel ditempelkan pada sampel *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.

3. Prosedur Analisis RVA (*Rapid Visco Analyzer*) (RVA Manual Book, 1994)

Sebanyak 3 gram tepung dilarutkan pada 25 ml. aquades dan diaduk hingga homogen. Selanjutnya sampel dimasukkan kedalam RVA Setelah proses pada RVA selesai, kurva amilografi dari sampel akan muncul dilayar monitor Pada kurva amilografi yang muncul dilayar monitor, dapat diketahui nilai *Pasting Temperature* (PT), *peak viscosity* (PV), *minimum viscosity* (MV), *Final Viscosity* (FV) dan *time to peak* (Ptime). Pengukuran profil gelatinisasi dengan RVA menggunakan rentang suhu 50-950C, kecepatan pengadukan 160 rpm selama 13 menit. Proses analisis menggunakan RVA yaitu pada menit ke-0 suhu yang diberikan pada sampel 500C dengan kecepatan 960 rpm selama 10 detik. Selanjutnya kecepatan putar diturunkan menjadi 160 rpm hingga akhir proses. Pada waktu 4 menit 42 detik suhu dinaikan menjadi 950C hingga menit ke-11. Kemudian suhu diturunkan kembali menjadi 500C selama 2 menit.

4. Analisis Nilai aw (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 aw tepung beras hitam

pecah kulit. Proses pengukuran selesai setelah angka keluar yang menyatakan nilai aw pada tepung beras hitam pecah kulit.

Lampiran 3. Hasil Analisis Respon Kimia Kadar Air

Tabel 13. Data Hasil Analisis Respon kimia Kadar Air

konsentrasi ozon	kelompok ulangan			jumlah	rata-rata	standar deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	11,26	11,18	11,86	34,30	11,43	0,37
2 ppm (a2)	11,44	11,65	11,39	34,48	11,49	0,14
4 ppm (a3)	11,30	11,40	11,31	34,01	11,34	0,05
6 ppm (a4)	11,11	11,10	11,29	33,50	11,17	0,11
8 ppm (a5)	11,21	11,29	11,10	33,60	11,20	0,09
Jumlah	56,33	56,62	56,95	169,89		
Rata-rata	11,27	11,32	11,39			

Perhitungan ANAVA Analisis Respon Kimia Kadar Air :

$$FK = \frac{(Total)^2}{\sum Ulangan \times \sum Sampel} = 1924,225$$

$$\begin{aligned}
 JKK &= \frac{(\sum K1)^2 + (\sum K2)^2 + (\sum K3)^2}{\sum Sampel} - FK \\
 &= \frac{(56,33)^2 + (56,62)^2 + (56,95)^2}{5} - 1924,225 \\
 &= 0,038023
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKP &= \frac{(\sum a1)^2 + (\sum a2)^2 + (\sum a3)^2 + (\sum a4)^2 + (\sum a5)^2}{\sum Ulangan} - FK \\
 &= \frac{(34,30)^2 + (34,48)^2 + (34,01)^2 + (33,50)^2 + (33,60)^2}{3} - 1924,225 \\
 &= 0,243445
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKT &= ((n_1)^2 + (n_2)^2 + \dots + (n_n)^2) - FK \\
 &= ((11,26)^2 + (11,18)^2 + \dots + (11,10)^2) - 1924,225 \\
 &= 0,601894
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKG &= JKT - JKP - JKK \\
 &= 0,320426
 \end{aligned}$$

Tabel 14. Analisis Variasi (ANAVA) Analisis Respon Kimia Kadar Air

Sumber Variasi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F tabel
Kelompok	2	0,038023	0,019011	0,475 ^{tn}	4,46
Perlakuan	4	0,243445	0,060861	1,520 ^{tn}	3,84
Galat	8	0,320426	0,040053		
Total	14	0,601894			

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 1,520 < daripada F tabel pada taraf 5% sebesar 3,84, sedangkan nilai F hitung untuk faktor kelompok sebesar 0,475 < daripada F tabel sebesar 4,46. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon maupun faktor kelompok tidak memberikan pengaruh nyata terhadap respon kimia kadar air beras hitam pecah kulit. Oleh karena itu, uji lanjut Duncan tidak perlu dilakukan

Lampiran 4. Perhitungan Analisis Kadar Pati

Tabel 15. Data Hasil Analisis Respon Kimia Kadar Pati

konsentrasi ozon	kelompok ulangan			jumlah	rata-rata	standar deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	67,43	66,19	66,45	200,07	66,69	0,65
2 ppm (a2)	64,95	64,76	63,66	193,37	64,46	0,70
4 ppm (a3)	63,06	61,70	62,81	187,56	62,52	0,72
6 ppm (a4)	61,82	60,84	60,96	183,61	61,20	0,54
8 ppm (a5)	59,78	58,44	58,95	177,17	59,06	0,68
Jumlah	317,05	311,92	312,82	941,79		
Rata-rata	63,41	62,38	62,56			

Perhitungan ANAVA Analisis Respon Kimia Kadar Pati :

$$FK = \frac{(Total)^2}{\sum Ulangan \times \sum Sampel} = 59131,27$$

$$\begin{aligned}
 JKK &= \frac{(\sum K1)^2 + (\sum K2)^2 + (\sum K3)^2}{\sum Sampel} - FK \\
 &= \frac{(317,05)^2 + (311,92)^2 + (312,82)^2}{5} - 59131,27 \\
 &= 2,993780
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKP &= \frac{(\sum a1)^2 + (\sum a2)^2 + (\sum a3)^2 + (\sum a4)^2 + (\sum a5)^2}{\sum Ulangan} - FK \\
 &= \frac{(200,07)^2 + (193,37)^2 + (187,56)^2 + (183,61)^2 + (177,17)^2}{3} - 59131,27 \\
 &= 103,558844
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKT &= ((n_1)^2 + (n_2)^2 + \dots + (n_n)^2) - FK \\
 &= ((67,43)^2 + (66,19)^2 + \dots + (58,95)^2) - 59131,27 \\
 &= 107,933733
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKG &= JKT - JKP - JKK \\
 &= 1,381108
 \end{aligned}$$

Tabel 16. Analisis Variasi (ANOVA) Analisis Respon Kimia Kadar Pati

Sumber Variasi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F tabel
Kelompok	2	2,993780	1,496890	8,671*	4,46
Perlakuan	4	103,558844	25,889711	149,965*	3,84
Galat	8	1,381108	0,172639		
Total	14	107,933733			

Keterangan :

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan :

Berdasarkan tabel ANOVA analisis respon kimia kadar pati diketahui bahwa nilai F Hitung untuk faktor perlakuan (konsentrasi ozon) sebesar 149,965 > daripada F tabel pada taraf 5% sebesar 3,84, sedangkan nilai F hitung untuk faktor kelompok sebesar 8,671 > daripada F tabel sebesar 4,46. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon maupun faktor kelompok memberikan pengaruh nyata terhadap respon kimia kadar air beras hitam pecah kulit. Sehingga perlu di lakukan Uji Lanjut Duncan.

Lampiran 5. Uji Lanjut Duncan Respon Kimia Kadar Pati

$$S_y = \sqrt{\frac{KTG}{r}} = 0,240$$

Tabel 17. Uji Lanjut Duncan Analisis Respon Kimia Kadar Pati

SSR 5%	LSR%	Rata-rata	Kode perlakuan	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	59,06	a5	-	-	-	-	-	a
3,26	0,78203	61,20	a4	2,15*	-	-	-	-	b
3,39	0,81322	62,52	a3	3,46*	1,32*	-	-	-	c
3,47	0,83241	64,46	a2	5,40*	3,25*	1,94*	-	-	d
3,52	0,84441	66,69	a1	7,63*	5,49*	4,17*	2,23*	-	e

Keterangan :

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan :

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

Lampiran 6. Perhitungan Analisis Aktivitas Air (Aw)

Tabel 18. Data Hasil Analisis Respon Kimia Aktivitas Air (Aw)

konsentrasi ozon	kelompok ulangan			jumlah	rata-rata	standar deviasi
	1	2	3			
0 ppm	0,79	0,81	0,79	2,39	0,80	0,01
2 ppm	0,79	0,75	0,80	2,34	0,78	0,03
4 ppm	0,81	0,69	0,80	2,30	0,77	0,07
6 ppm	0,79	0,77	0,80	2,36	0,79	0,02
8 ppm	0,79	0,75	0,83	2,37	0,79	0,04
Jumlah	3,96	3,77	4,02	11,76		
Rata-rata	0,79	0,75	0,80			

Perhitungan ANAVA Analisis Respon Kimia Aktivitas Air (aw) :

$$FK = \frac{(Total)^2}{\sum Ulangan \times \sum Sampel} = 9,213569$$

$$\begin{aligned}
 JKK &= \frac{(\sum K1)^2 + (\sum K2)^2 + (\sum K3)^2}{\sum Sampel} - FK \\
 &= \frac{(3,96)^2 + (3,77)^2 + (4,02)^2}{5} - 9,213569 \\
 &= 0,0070
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKP &= \frac{(\sum a1)^2 + (\sum a2)^2 + (\sum a3)^2 + (\sum a4)^2 + (\sum a5)^2}{\sum Ulangan} - FK \\
 &= \frac{(2,39)^2 + (2,34)^2 + (2,30)^2 + (2,36)^2 + (2,37)^2}{3} - 9,213569 \\
 &= 0,0017
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKT &= ((n_1)^2 + (n_2)^2 + \dots + (n_n)^2) - FK \\
 &= ((0,79)^2 + (0,81)^2 + \dots + (0,83)^2) - 9,213569 \\
 &= 0,0156
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 JKG &= JKT - JKP - JKK \\
 &= 0,0070
 \end{aligned}$$

Tabel 19. Analisis Variasi (ANAVA) Analisis Respon Kimia Aktivitas Air (Aw)

Sumber Variasi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F tabel
Kelompok	2	0,0070	0,0035	3,996 ^{tn}	4,46
Perlakuan	4	0,0017	0,0004	0,472 ^{tn}	3,84
Galat	8	0,0070	0,0009		
Total	14	0,0156			

Keterangan :

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan :

Berdasarkan tabel ANAVA analisis respon kimia Aw Meter diketahui bahwa nilai F Hitung untuk faktor perlakuan (konsentrasi ozon) sebesar $0,472 <$ daripada F tabel pada taraf 5% sebesar 3,84, sedangkan nilai F hitung untuk faktor kelompok sebesar $3,996 <$ daripada F tabel sebesar 4,46. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon maupun faktor kelompok tidak memberikan pengaruh nyata terhadap respon kimia Aktivitas Air (Aw) pada beras hitam pecah kulit. Oleh karena itu, uji lanjut Duncan tidak perlu dilakukan

Lampiran 7. Perhitungan Analisis Kadar Antosianin

Tabel 20. Data Hasil Analisis Respon Kimia Kadar Antosianin

Konsentrasi Ozon	Ulangan			Jumlah	Rata-rata	St dev
	1	2	3			
0 (a1)	106,34	102,10	104,07	312,50	104,17	2,12
2 (a2)	83,33	80,79	79,95	244,07	81,36	1,76
4 (a3)	60,45	62,45	57,54	180,45	60,15	2,47
6 (a4)	55,94	53,90	51,57	161,41	53,80	2,19
8 (a5)	42,75	41,31	41,08	125,14	41,71	0,90
Jumlah	348,81	340,56	334,21	1023,57		
Rata-rata	69,76	68,11	66,84			

Perhitungan ANAVA Analisis Respon Kimia Kadar Antosianin :

$$FK = \frac{(Total)^2}{\sum Ulangan \times \sum Sampel} = 69847,03$$

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

$$= \frac{(348,81)^2 + (340,56)^2 + (334,21)^2}{5} - 69847,03$$

$$= 21,42169$$

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

$$= \frac{(312,50)^2 + (244,07)^2 + (180,45)^2 + (161,41)^2 + (125,14)^2}{3} - 69847,03$$

$$= 7321,05191$$

$$JKT = ((n_1)^2 + (n_2)^2 + \dots + (n_n)^2) - FK$$

$$= ((106,34)^2 + (102,10)^2 + \dots + (41,08)^2) - 69847,03$$

$$= 7359,64290$$

$$JKG = JKT - JKP - JKK$$

$$= 17,16930$$

Tabel 21. Analisis Variasi (ANAVA) Analisis Respon Kimia Kadar Antosianin

Sumber Variasi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F tabel
Kelompok	2	21,42169	10,71085	4,991*	4,46
Perlakuan	4	7321,05191	1830,26298	852,807*	3,84
Galat	8	17,16930	2,14616		
Total	14	7359,64290			

Keterangan :

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan :

Berdasarkan tabel ANAVA analisis respon kimia Kadar Antosianin diketahui bahwa nilai F Hitung untuk faktor perlakuan (konsentrasi ozon) sebesar 852,807 > daripada F tabel pada taraf 5% sebesar 3,84, sedangkan nilai F hitung untuk faktor kelompok sebesar 4,991 > daripada F tabel sebesar 4,46. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon maupun faktor kelompok memberikan pengaruh nyata terhadap respon kimia kadar antosianin beras hitam pecah kulit. Sehingga perlu di lakukan Uji Lanjut Duncan.

Lampiran 8. Uji Lanjut Duncan Respon Kimia Kadar Antosianin

$$S_y = \sqrt{\frac{KTG}{r}} = 0,846$$

Tabel 22. Uji Lanjut Duncan Respon Kimia Kadar Antosianin

SSR 5%	LSR%	Rata-rata	Kode	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	41,71	a2	-	-	-	-		a
3,26	2,75733	53,80	a5	12,09*	-				b
3,39	2,86728	60,15	a3	18,44*	6,35*	-			c
3,47	2,93495	81,36	a4	39,64*	27,55*	21,21*	-		d
3,52	2,97724	104,17	a1	62,45*	50,36*	44,02*	22,81*	-	e

Keterangan :

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan :

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

Lampiran 9. Hasil Data Analisis *Rapid Visco Analyzer* (RVA)

Tabel 23. Data *Peak Viscosity*

konsentrasi ozon	kelompok ulangan			jumlah	rata-rata	standar deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	2556	2562	2549	7667	2556	6,51
2 ppm (a2)	2441	2449	2435	7325	2442	7,02
4 ppm (a3)	2543	2551	2536	7630	2543	7,51
6 ppm (a4)	2715	2724	2707	8146	2715	8,50
8 ppm (a5)	2300	2308	2291	6899	2300	8,50
Jumlah	12555	12594	12518	37667		
Rata-rata	2511	2519	2504			

Tabel 24. Analisis Variansi (ANAVA) *Peak Viscosity*

Sumber Variasi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F tabel
Kelompok	2	577,733	288,867	304,070*	4,46
Perlakuan	4	282784,400	70696,100	74416,947*	3,84
Galat	8	7,600	0,950		
Total	14	283369,733			

Keterangan :

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan :

Berdasarkan tabel ANAVA analisis profil gelatinisasi Peak Viscosity diketahui bahwa nilai F hitung untuk faktor perlakuan (konsentrasi ozon) sebesar 74416,947 > daripada F tabel pada taraf 5% sebesar 3,84, sedangkan nilai F hitung untuk faktor kelompok sebesar 304,070 > daripada F tabel sebesar 4,46. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon maupun faktor kelompok memberikan pengaruh nyata terhadap respon profil gelatinisasi Peak Viscosity beras hitam pecah kulit. Sehingga perlu dilakukan Uji Lanjut Duncan.

Uji Lanjut Duncan *Peak Viscosity*

$$S_y = \sqrt{\frac{KTG}{r}} = 0,563$$

Tabel 25. Uji Lanjut Duncan *Peak Viscosity*

SSR 5%	LSR%	Rata- rata	Kode	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	2300	a5	-	-	-	-		a
3,26	1,83450	2442	a2	142,00*	-				b
3,39	1,90766	2543	a3	243,67*	101,67*	-			c
3,47	1,95268	2556	a1	256,00*	114,00*	12,33*	-		d
3,52	1,98081	2715	a4	415,67*	273,67*	172,00*	159,67*	-	e

Keterangan :

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan :

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

Tabel 26. Data *Trough*

konsentrasi ozon	kelompok ulangan			jumlah	rata-rata	standar deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	2161	2166	2155	6482	2161	5,51
2 ppm (a2)	1943	1948	1937	5828	1943	5,51
4 ppm (a3)	2159	2164	2152	6475	2158	6,03
6 ppm (a4)	2336	2342	2329	7007	2336	6,51
8 ppm (a5)	1731	1736	1724	5191	1730	6,03
Jumlah	10330	10356	10297	30983		
Rata-rata	2066	2071	2059			

Tabel 27. Analisis Variansi (ANAVA) *Trough*

Sumber Variasi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F tabel
Kelompok	2	349,733	174,867	874,333*	4,46
Perlakuan	4	654268,400	163567,100	817835,499*	3,84
Galat	8	1,600	0,200		
Total	14	654619,733			

Keterangan :

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan :

Berdasarkan tabel ANAVA analisis profil gelatinisasi *Trough* diketahui bahwa nilai F hitung untuk faktor perlakuan (konsentrasi ozon) sebesar 817835,499 > daripada F tabel pada taraf 5% sebesar 3,84, sedangkan nilai F hitung untuk faktor kelompok sebesar 874,333 > daripada F tabel sebesar 4,46. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon maupun faktor kelompok memberikan pengaruh nyata terhadap respon profil gelatinisasi *Trough* beras hitam pecah kulit. Sehingga perlu dilakukan Uji Lanjut Duncan.

Uji Lanjut Duncan *Though*

$$S_y = \sqrt{\frac{KTG}{r}} = 0,258$$

Tabel 28. Uji Lanjut Duncan *Though*

SSR 5%	LSR%	Rata- rata	Kode	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	1730	a5	-	-	-	-		a
3,26	0,84173	1943	a2	212,33*	-				b
3,39	0,87529	2158	a3	428,00*	215,67*	-			c
3,47	0,89595	2161	a1	430,33*	218,00*	2,33*	-		d
3,52	0,90886	2336	a4	605,33*	393,00*	177,33*	175,00*	-	e

Keterangan :

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan :

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

Tabel 29. Data *Breakdown*

konsentrasi ozon	kelompok ulangan			jumlah	rata-rata	standar deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	395	396	394	1185	395	1,00
2 ppm (a2)	498	501	496	1495	498	2,52
4 ppm (a3)	384	387	382	1153	384	2,52
6 ppm (a4)	379	382	376	1137	379	3,00
8 ppm (a5)	569	572	567	1708	569	2,52
Jumlah	2225	2238	2215	6678		
Rata-rata	445	448	443			

Tabel 30. Analisis Variansi (ANAVA) *Breakdown*

Sumber Variasi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F tabel
Kelompok	2	53,200	26,600	44,333*	4,46
Perlakuan	4	86518,400	21629,600	36049,333*	3,84
Galat	8	4,800	0,600		
Total	14	86576,400			

Keterangan :

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan :

Berdasarkan tabel ANAVA analisis profil gelatinisasi *Breakdown* diketahui bahwa nilai F hitung untuk faktor perlakuan (konsentrasi ozon) sebesar $36049,333 > 3,84$ (F tabel pada taraf 5%), sedangkan nilai F hitung untuk faktor kelompok sebesar $44,333 > 4,46$ (F tabel). Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon maupun faktor kelompok memberikan pengaruh nyata terhadap parameter profil gelatinisasi *Breakdown* beras hitam pecah kulit. Sehingga perlu dilakukan Uji Lanjut Duncan.

Uji Lanjut Duncan *Breakdown*

$$S_y = \sqrt{\frac{KTG}{r}} = 0,447$$

Tabel 31. Uji Lanjut Duncan *Breakdown*

SSR 5%	LSR%	Rata- rata	Kode	Perlakuan					Tarf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	379	a4	-	-	-	-		a
3,26	1,45792	384	a3	5,33*	-				b
3,39	1,51605	395	a1	16,00*	10,67*	-			c
3,47	1,55183	498	a2	119,33*	114,0*	103,33*	-		d
3,52	1,57419	569	a5	190,33*	185,0*	174,33*	71,0*	-	e

Keterangan :

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan :

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

Tabel 32. Data *Final Viscosity*

konsentrasi ozon	kelompok ulangan			jumlah	rata-rata	standar deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	3683	3690	3677	11050	3683	6,51
2 ppm (a2)	3558	3568	3549	10675	3558	9,50
4 ppm (a3)	3703	3712	3695	11110	3703	8,50
6 ppm (a4)	3958	3969	3948	11875	3958	10,50
8 ppm (a5)	3288	3298	3277	9863	3288	10,50
Jumlah	18190	18237	18146	54573		
Rata-rata	3638	3647	3629			

Tabel 33. Analisis Variansi (ANAVA) *Final Viscosity*

Sumber Variasi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F tabel
Kelompok	2	828,400	414,200	144,488*	4,46
Perlakuan	4	714051,067	178512,767	62271,8*	3,84
Galat	8	22,933	2,867		
Total	14	714902,400			

Keterangan :

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan :

Berdasarkan tabel ANAVA analisis profil gelatinisasi *Final Viscosity* diketahui bahwa nilai F hitung untuk faktor perlakuan (konsentrasi ozon) sebesar $62271,8 > 3,84$ (F tabel pada taraf 5%), sedangkan nilai F hitung untuk faktor kelompok sebesar $144,488 > 4,46$ (F tabel). Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon maupun faktor kelompok memberikan pengaruh nyata terhadap parameter profil gelatinisasi *Final Viscosity* beras hitam pecah kulit. Sehingga perlu dilakukan Uji Lanjut Duncan.

Uji Lanjut Duncan *Final Viscosity*

$$S_y = \sqrt{\frac{KTG}{r}} = 0,978$$

Tabel 34. Uji Lanjut Duncan *Final Viscosity*

SSR 5%	LSR%	Rata- rata	Kode	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	3288	a5	-	-	-	-		a
3,26	3,18673	3558	a2	270,67*	-				b
3,39	3,31381	3683	a1	395,67*	125,00*	-			c
3,47	3,39201	3703	a3	415,67*	145,00*	20,00*	-		d
3,52	3,44089	3958	a4	670,67*	400,00*	275,00*	255,0*	-	e

Keterangan :

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan :

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

Tabel 35. Data *Setback*

konsentrasi ozon	kelompok ulangan			jumlah	rata-rata	standar deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	1522	1524	1520	4566	1522	2,00
2 ppm (a2)	1615	1620	1611	4846	1615	4,51
4 ppm (a3)	1544	1548	1541	4633	1544	3,51
6 ppm (a4)	1622	1627	1617	4866	1622	5,00
8 ppm (a5)	1557	1562	1553	4672	1557	4,51
Jumlah	7860	7881	7842	23583		
Rata-rata	1572	1576	1568			

Tabel 36. Analisis Variansi (ANAVA) *Setback*

Sumber Variasi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F tabel
Kelompok	2	152,400	76,200	52,552*	4,46
Perlakuan	4	23574,400	5893,600	4064,552*	3,84
Galat	8	11,600	1,450		
Total	14	23738,400			

Keterangan :

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan :

Berdasarkan tabel ANAVA analisis profil gelatinisasi *Setback* diketahui bahwa nilai F hitung untuk faktor perlakuan (konsentrasi ozon) sebesar $4064,552 > 3,84$ (F tabel pada taraf 5%), sedangkan nilai F hitung untuk faktor kelompok sebesar $52,552 > 4,46$ (F tabel). Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon maupun faktor kelompok memberikan pengaruh nyata terhadap parameter profil gelatinisasi *Setback* beras hitam pecah kulit. Sehingga perlu dilakukan Uji Lanjut Duncan.

Uji Lanjut Duncan *Setback*

$$S_y = \sqrt{\frac{KTG}{r}} = 0,695$$

Tabel 37. Uji Lanjut Duncan *Setback*

SSR 5%	LSR%	Rata- rata	Kode	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	1522	a5	-	-	-	-		a
3,26	2,26642	1544	a4	22,33*	-				b
3,39	2,35680	1557	a3	35,33*	13,00*	-			c
3,47	2,41242	1615	a2	93,33*	71,00*	58,00*	-		d
3,52	2,44718	1622	a1	100,00*	77,67*	64,67*	6,67*	-	e

Keterangan :

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan :

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

Tabel 38. Data *Peak time*

konsentrasi ozon	kelompok ulangan			jumlah	rata-rata	standar deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	6,87	6,90	6,84	20,61	6,87	0,03
2 ppm (a2)	7,00	7,03	6,97	21,00	7,00	0,03
4 ppm (a3)	6,93	6,97	6,90	20,80	6,93	0,04
6 ppm (a4)	6,73	6,77	6,70	20,20	6,73	0,04
8 ppm (a5)	7,00	7,03	6,97	21,00	7,00	0,03
Jumlah	34,53	34,70	34,38	103,61		
Rata-rata	6,91	6,94	6,88			

Tabel 39. Analisis Variansi (ANAVA) *Peak time*

Sumber Variasi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F tabel
Kelompok	2	0,01025	0,00513	512,66667*	4,46
Perlakuan	4	0,14856	0,03714	3714,00001*	3,84
Galat	8	0,00008	0,00001		
Total	14	0,15889			

Keterangan :

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan :

Berdasarkan tabel ANAVA analisis profil gelatinisasi *Peak time* diketahui bahwa nilai F hitung untuk faktor perlakuan (konsentrasi ozon) sebesar 3714,00001 > 3,84 (F tabel pada taraf 5%), sedangkan nilai F hitung untuk faktor kelompok sebesar 512,66667 > 4,46 (F tabel). Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon maupun faktor kelompok memberikan pengaruh nyata terhadap parameter profil gelatinisasi *Peak time* beras hitam pecah kulit. Sehingga perlu dilakukan Uji Lanjut Duncan.

Uji Lanjut Duncan *Peak time*

$$S_y = \sqrt{\frac{KTG}{r}} = 0,002$$

Tabel 40. Uji Lanjut Duncan *Peak time*

SSR 5%	LSR%	Rata- rata	Kode	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	6,73	a4	-	-	-	-		a
3,26	0,00595	6,87	a1	0,14*	-				b
3,39	0,00619	6,93	a3	0,20*	0,06*	-			c
3,47	0,00634	7,00	a2	0,27*	0,13*	0,07*	-		d
3,52	0,00643	7,00	a5	0,27*	0,13*	0,07*	0,00 ^{tn}	-	d

Keterangan :

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan :

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

Tabel 41. Data *Peak time*

konsentrasi ozon	kelompok ulangan			jumlah	rata-rata	standar deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	67,60	67,78	67,42	202,80	67,60	0,18
2 ppm (a2)	88,35	88,50	88,20	265,05	88,35	0,15
4 ppm (a3)	84,65	84,80	84,50	253,95	84,65	0,15
6 ppm (a4)	87,60	87,80	87,40	262,80	87,60	0,20
8 ppm (a5)	86,00	86,18	85,82	258,00	86,00	0,18
Jumlah	414,20	415,06	413,34	1242,60		
Rata-rata	82,84	83,01	82,67			

Tabel 42. Analisis Variansi (ANAVA) *Pasting Temperature*

Sumber Variasi	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F tabel
Kelompok	2	0,29584	0,14792	314,72340*	4,46
Perlakuan	4	895,61100	223,90275	476388,83076*	3,84
Galat	8	0,00376	0,00047		
Total	14	895,91060			

Keterangan :

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan :

Berdasarkan tabel ANAVA analisis profil gelatinisasi *Pasting Temperature* diketahui bahwa nilai F hitung untuk faktor perlakuan (konsentrasi ozon) sebesar $476388,83076 > 3,84$ (F tabel pada taraf 5%), sedangkan nilai F hitung untuk faktor kelompok sebesar $314,72340 > 4,46$ (F tabel). Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon maupun faktor kelompok memberikan pengaruh nyata terhadap parameter profil gelatinisasi *Pasting Temperature* beras hitam pecah kulit. Sehingga perlu dilakukan Uji Lanjut Duncan.

Uji Lanjut Duncan *Pasting Temperature*

$$S_y = \sqrt{\frac{KTG}{r}} = 0,013$$

Tabel 43. Uji Lanjut Duncan *Pasting Temperature*

SSR 5%	LSR%	Rata- rata	Kode	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	67,60	a1	-	-	-	-		a
3,26	0,04080	84,65	a3	17,05*	-				b
3,39	0,04243	86,00	a5	18,40*	1,35*	-			c
3,47	0,04343	87,60	a4	20,00*	2,95*	1,60*	-		d
3,52	0,04406	88,35	a2	20,75*	3,70*	2,35*	0,75*	-	e

Keterangan :

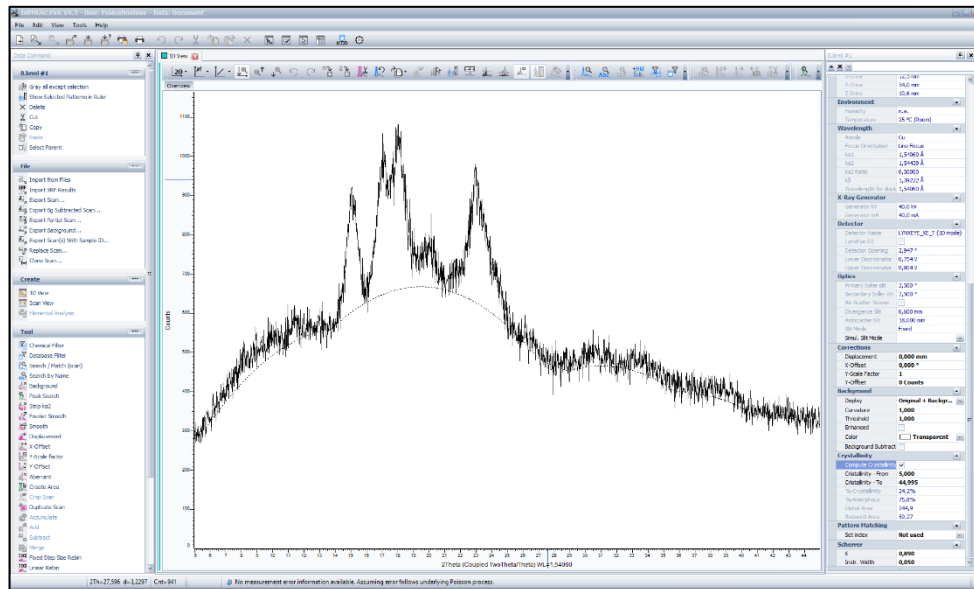
tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

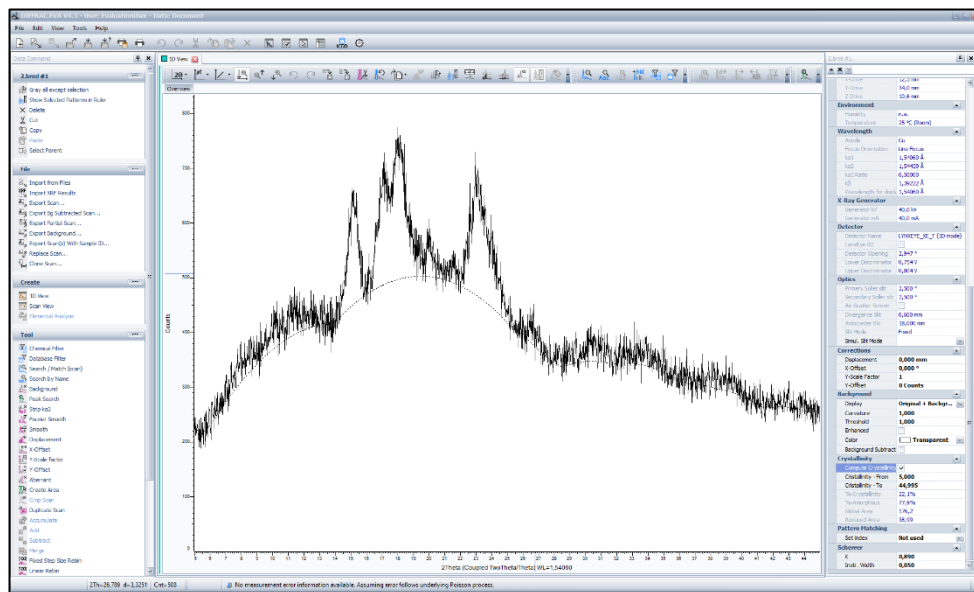
Kesimpulan :

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

Lampiran 10. Grafik Analisis *XRD* (*X-Ray Diffraction*) Berbagai Konsentrasi Ozon

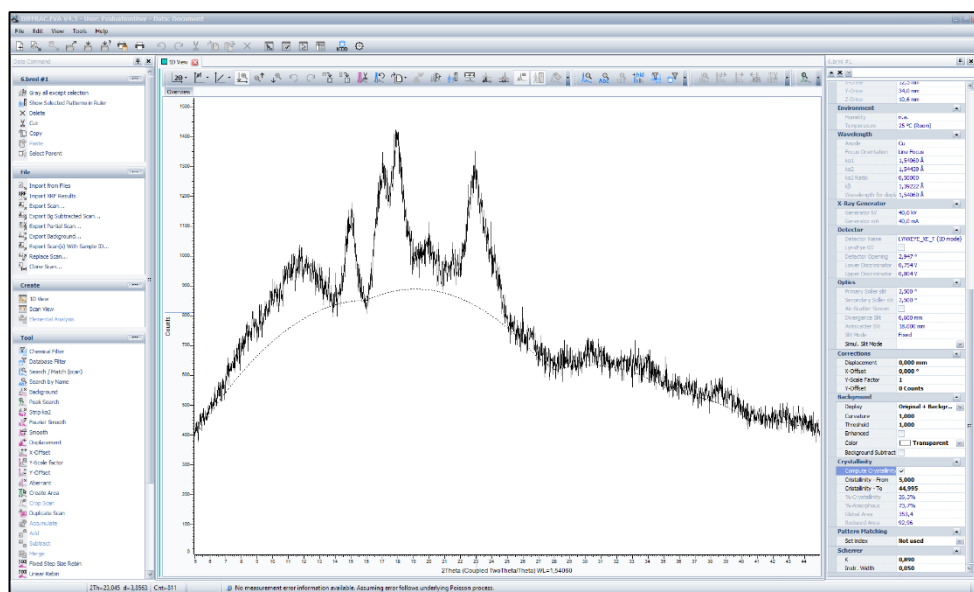


Gambar 12. Grafik Hasil Analisis Respon Fisik *XRD* (*X-Ray Diffraction*)
Konsentrasi 0 ppm (a1)

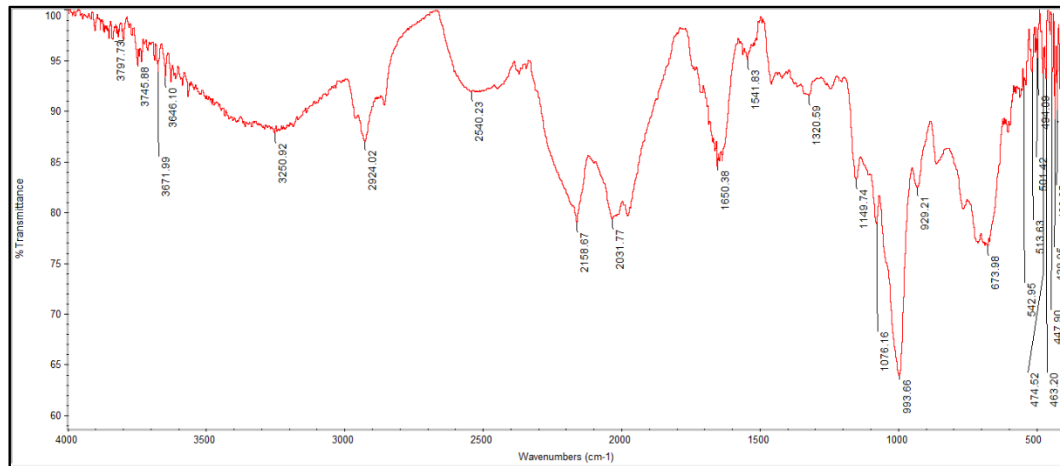


Gambar 13. Grafik Hasil Analisis Respon Fisik *XRD* (*X-Ray Diffraction*)
Konsentrasi 2 ppm (a2)

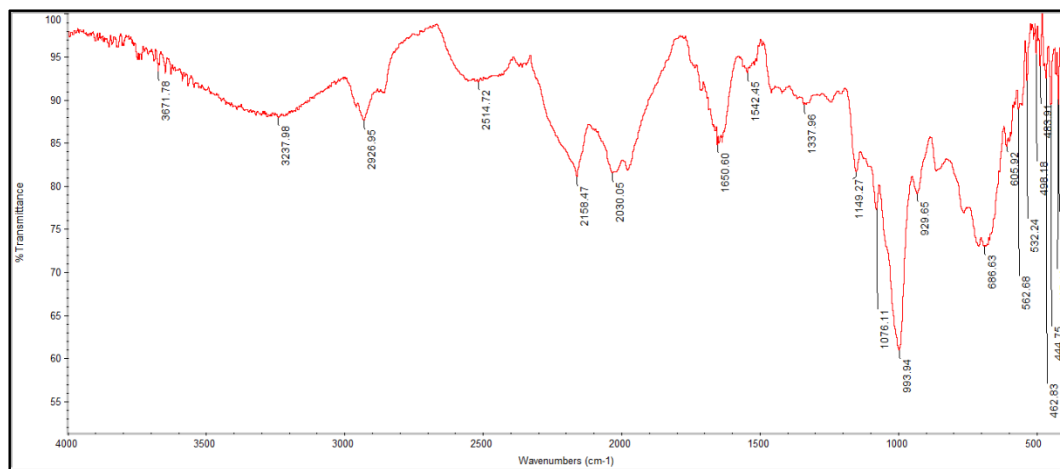
Gambar 15. Grafik Hasil Analisis Respon Fisik *XRD* (*X-Ray Diffraction*) Konsentrasi 6 ppm (a4)



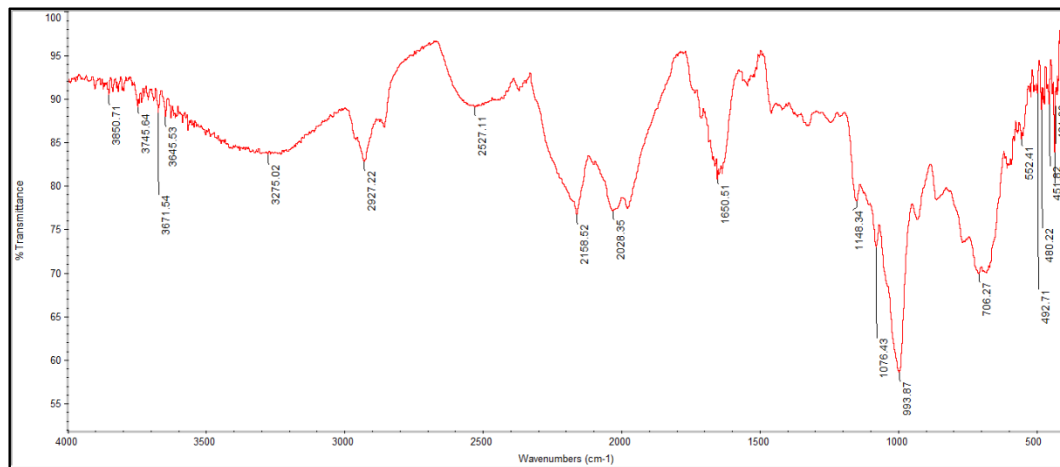
Lampiran 11. Grafik Analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) Beras Hitam Pecah Kulit Berbagai Konsentrasi Ozon.



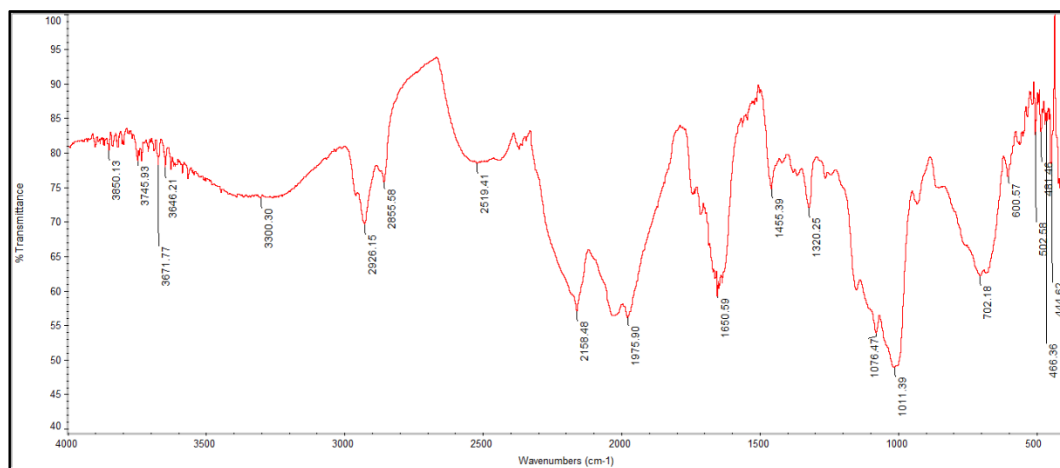
Gambar 17. Grafik Analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) Beras Hitam Pecah Kulit pada Konsentrasi Ozon 0 ppm (a1)



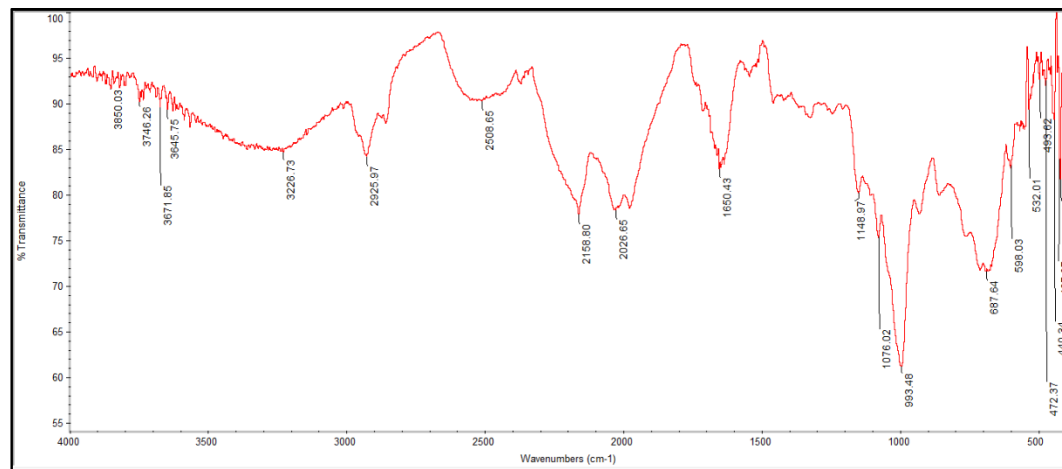
Gambar 18. Grafik Analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) Beras Hitam Pecah Kulit pada Konsentrasi Ozon 2 ppm (a2)



Gambar 19. Grafik Analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) Beras Hitam Pecah Kulit pada Konsentrasi Ozon 4 ppm (a3)



Gambar 20. Grafik Analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) Beras Hitam Pecah Kulit pada Konsentrasi Ozon 6 ppm (a4)

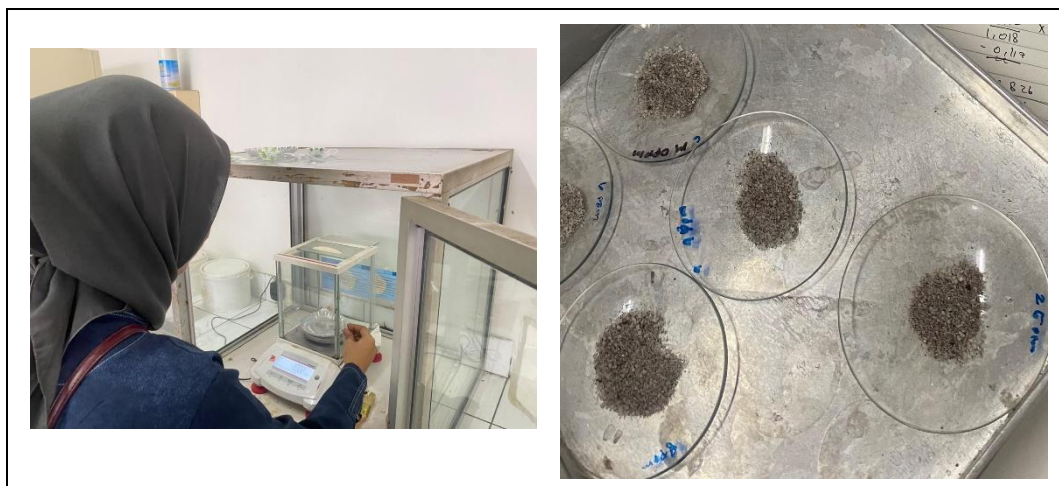


Gambar 21. Grafik Analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) Beras Hitam Pecah Kulit pada Konsentrasi Ozon 8 ppm (a5)

Lampiran 12. Dokumentasi penelitian



Gambar 22. Proses Ozonisasi Beras Hitam Pecah Kulit



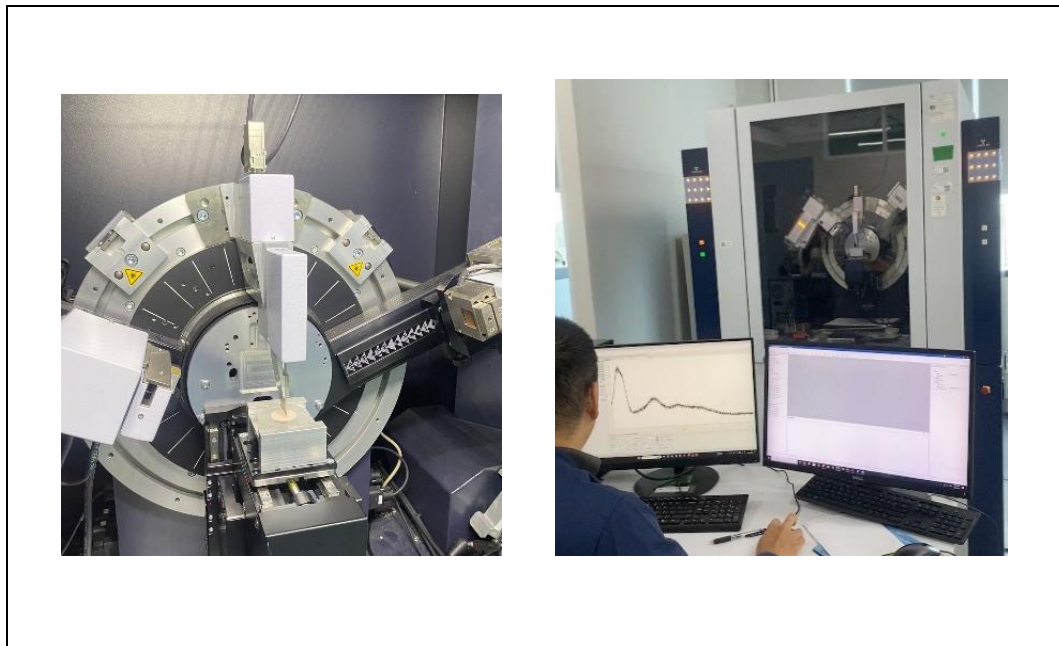
Gambar 23. Pengujian Analisis Kadar Air Metode Gravimetri



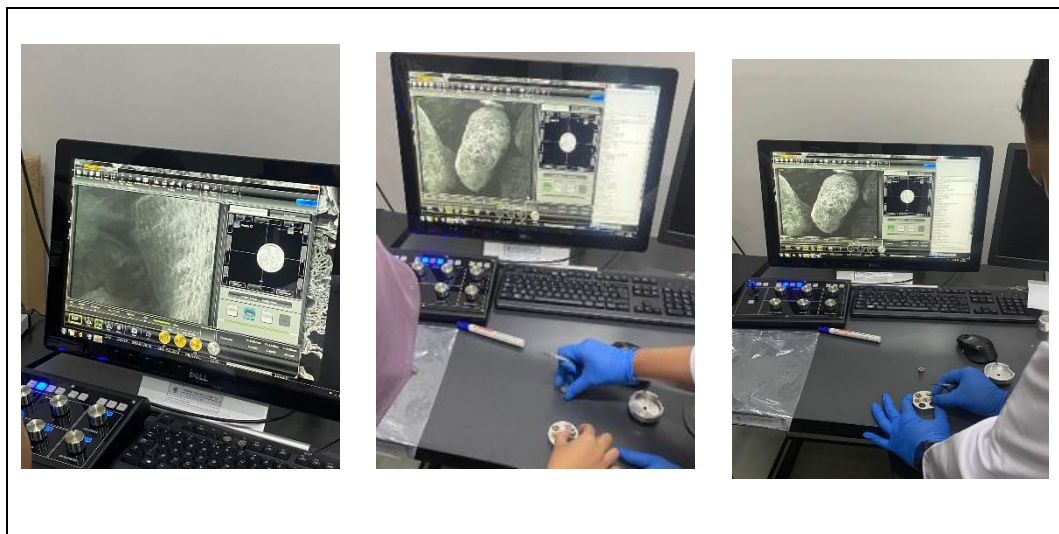
Gambar 24. Pengujian Analisis Kadar Pati Metode Luff Scrool



Gambar 25. Pengujian Analisis Kadar Antosianin pH Differensial



Gambar 26. Pengujian Analisis XRD (*X-Ray Diffraction*) di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Cisititu Bandung.



Gambar 27. Pengujian Analisis SEM *Scanning Electron Microscope* (SEM) di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Cisititu Bandung.



Gambar 28. Pengujian Analisis Aktivitas Air di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Cisititu Bandung.