

**PENGARUH KONSENTRASI OZON TERHADAP
KARAKTERISTIK FISIK DAN KIMIA
BERAS MERAH (*Oryza nivara*) PECAH KULIT**

TUGAS AKHIR

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

Oleh

Nazmi Ghita Fauziah

223020034



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

ABSTRAK

PENGARUH KONSENTRASI OZON TERHADAP KARAKTERISTIK FISIK DAN KIMIA BERAS MERAH (*Oryza nivara*) PECAH KULIT

Oleh :

Nazmi Ghita Fauziah

NPM : 223020034

(Program Studi Teknologi Pangan)

Beras merah pecah kulit merupakan pangan fungsional kaya antosianin, serat, vitamin, dan mineral. Ozon, sebagai oksidator kuat yang tidak meninggalkan residu kimia, berpotensi digunakan sebagai teknologi pascapanen untuk memodifikasi karakteristik pati serta meningkatkan mutu beras. Penelitian ini menggunakan beras merah pecah kulit varietas Inpari 24 dan bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisik dan kimianya serta menentukan konsentrasi ozon dengan karakteristik terbaik. Penelitian menggunakan Rancangan Acak Kelompok (RAK) satu faktor dengan lima taraf konsentrasi ozon (0, 2, 4, 6, dan 8 ppm) dan tiga kali ulangan. Kadar air, kadar pati, aktivitas air (a_w), dan kadar antosianin dianalisis secara statistik menggunakan ANAVA dan uji lanjut Duncan, sedangkan karakteristik fisik dan struktur pati dianalisis secara deskriptif menggunakan *Rapid Visco Analyzer* (RVA), *X-Ray Diffraction* (XRD), *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa ozon tidak berpengaruh nyata ($p > 0,05$) terhadap kadar air dan aktivitas air, tetapi berpengaruh nyata ($p < 0,05$) terhadap kadar pati dan kadar antosianin; kadar pati menurun dari 65,82% (0 ppm) menjadi 55,78% (8 ppm), sedangkan kadar antosianin menunjukkan pola fluktuatif dengan nilai tertinggi pada 4 ppm (49,56 mg/100 g) dan terendah pada 6 ppm (21,70 mg/100 g). Berdasarkan analisis RVA, XRD, FTIR, dan SEM menunjukkan bahwa ozon memodifikasi profil gelatinisasi serta derajat kristalinitas pati secara tidak linear, dengan nilai kristalinitas tertinggi pada konsentrasi 4 ppm (29,3%), disertai pembentukan gugus karbonil dan perubahan morfologi permukaan granula, tanpa merusak struktur kristal utama tipe A. Konsentrasi ozon 4 ppm menghasilkan karakteristik terbaik dan direkomendasikan sebagai kondisi perlakuan optimum untuk memodifikasi beras merah pecah kulit tanpa menyebabkan penurunan mutu yang berlebih.

Kata kunci: beras merah pecah kulit, ozonisasi, karakteristik pati, antosianin, RVA, XRD, FTIR, SEM

ABSTRACT

THE EFFECT OF OZONE CONCENTRATION ON THE PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF DEHULLED RED RICE (*Oryza nivara*)

By

Nazmi Ghita Fauziah

NPM : 223020034

(Department of Food Technology)

Dehulled brown rice is a functional food rich in anthocyanins, dietary fiber, vitamins, and minerals. Ozone, a strong oxidizing agent that leaves no chemical residue, has potential as a non-thermal postharvest technology to modify starch characteristics and improve rice quality. This study used the Inpari 24 variety of dehulled brown rice and aimed to evaluate the effect of different ozone concentrations on its physicochemical characteristics and to determine the ozone concentration producing the most favorable characteristics. A single-factor Randomized Complete Block Design (RCBD) was applied using five ozone concentrations (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 ANOVA followed by Duncan's Multiple Range Test, while starch physical characteristics and microstructure were examined descriptively using a Rapid Visco Analyzer (RVA), X-ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), and Scanning Electron Microscopy (SEM). The results of the study showed that ozone had no significant effect ($p > 0.05$) on moisture content and water activity, but had a significant effect ($p < 0.05$) on starch content and anthocyanin content; starch content decreased from 65.82% (0 ppm) to 55.78% (8 ppm), while anthocyanin content showed a fluctuating pattern with the highest value at 4 ppm (49.56 mg/100 g) and the lowest at 6 ppm (21.70 mg/100 g). Based on RVA, XRD, FTIR, and SEM analyses, ozone was found to modify the gelatinization profile and degree of starch crystallinity in a nonlinear manner, with the highest crystallinity value observed at a concentration of 4 ppm (29.3%), accompanied by the formation of carbonyl groups and changes in granule surface morphology, without damaging the primary type A crystal structure. An ozone concentration of 4 ppm produced the best characteristics and is recommended as the optimal treatment condition for modifying hulled brown rice without causing excessive quality loss.

Keywords: *dehulled brown rice, ozonation, starch characteristics, anthocyanins, RVA, XRD, FTIR, SEM*

**PENGARUH KONSENTRASI OZON TERHADAP
KARAKTERISTIK FISIK DAN KIMIA
BERAS MERAH (*Oryza nivara*) PECAH KULIT**

Oleh :

Nazmi Ghita Fauziah

223020034

(Program Studi Teknologi Pangan)

Fakultas Teknik
Universitas Pasundan

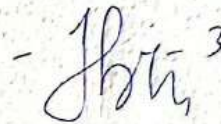
Menyetujui,
Tim Pembimbing
Tanggal:

Pembimbing I

Pembimbing II



(Dr. Istiyati Inayah, S.Si., M.Si.)



(Dr. Hari Hariardi, S.T.P., M.T)

**PENGARUH KONSENTRASI OZON TERHADAP
KARAKTERISTIK FISIK DAN KIMIA
BERAS MERAH (*Oryza nivara*) PECAH KULIT**

Oleh :

Nazmi Ghita Fauziah
223020034
(Program Studi Teknologi Pangan)

Fakultas Teknik
Universitas Pasundan

Menyetujui :

Koordinator BELMAWABUD, Tugas Akhir dan Kerja Praktek dan
Kemahasiswaan
Program Studi Teknologi Pangan
Fakultas Teknik
Universitas Pasundan



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

PEDOMAN PENGGUNAAN TUGAS AKHIR

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

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

Fauziah, N.G. (2026). Pengaruh Konsentrasi Ozon terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Beras Merah (*Oryza nivara*) Pecah Kulit. Tugas Akhir Program Sarjana, Universitas Pasundan.

Dan dalam bahasa Inggris sebagai berikut :

Fauziah, N.G. (2026). *The Effect of Ozone Concentration on the Physical and Chemical Characteristics of Dehulled Red Rice (Oryza nivara), Bachelor's Thesis, Pasundan University.*

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis sampaikan kepada Allah SWT. berkat rahmatnya penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan judul **“Pengaruh Konsentrasi Ozon terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Beras Merah (*Oryza nivara*) Pecah Kulit”**. Selama proses Tugas Akhir ini, penulis mendapat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Istiyati Inayah, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing utama yang telah memberikan ilmu, motivasi, dan membimbing penulis dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Dr. Hari Hariadi, S.TP., M.T. selaku dosen pembimbing pendamping yang telah membimbing dan memberikan ilmu yang bermanfaat bagi penulis selama penulisan Tugas Akhir.
3. Dosen penguji I Tugas Akhir, Ibu Dr. Ira Endah Rohima, S.T., M.Si. yang telah bersedia menjadi penguji dan memberikan masukan maupun saran dalam penulisan Tugas Akhir.
4. Ketua Program Studi Teknologi Pangan Universitas Pasundan Bandung, Bapak Jaka Rukmana, S.T., M.T. dan Sekretaris Program Studi Teknologi Pangan Universitas Pasundan.
5. Koordinator Belmawabud Program Studi Teknologi Pangan Universitas Pasundan, Bapak Rizal Maulana Ghaffar, S.T., M.T.
6. Dosen beserta segenap civitas akademik di lingkup Program Studi Teknologi Pangan Universitas Pasundan, Bandung.
7. Kepada kedua orang tua penulis yaitu Bapak Agus Hermawan dan Ibu Elni Cahya; kedua kakak penulis, yaitu Fakhriya Nur Annisa dan Syifa Selviani, serta keluarga besar penulis yang telah memberikan kasih sayang, dukungan, doa serta motivasi, baik materil maupun moril, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik.

8. Kepada Deastri Tazkia, Dhara Nabila, Hani Uswatun, Nazwa Ismi, Nindya Aulia, Putri Aulia, Salwa Afiyah, dan Siska Andriyani, yang telah memberikan dukungan dan kebersamaan bagi penulis.
9. Kepada Nazwa Amelia, Riafanny Agustin, Muhammad Ismail, Zahra Putri sebagai teman satu topik penelitian beras yang telah memotivasi dan membantu selama penulisan Tugas Akhir ini.
10. Teh Elvia Rachmawati, Teh Widia, dan Kang Fakhrizal Mujni yang telah membantu, memberikan masukan, saran dan kritik kepada penulis selama penulisan Tugas Akhir usulan penelitian.
11. Kepada seluruh pihak terlibat yang tidak bisa disebutkan oleh penulis satu persatu.

Penulis menyadari bahwa penulisan Tugas Akhir ini masih belum sempurna dan dapat lebih disempurnakan, penulis terbuka atas segala kritik dan saran mengenai Tugas Akhir ini. Penulis berharap laporan ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan pengembangan ilmu pengetahuan.

DAFTAR ISI

ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
PEDOMAN PENGGUNAAN TUGAS AKHIR	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Identifikasi Masalah	3
1.3. Maksud dan Tujuan Penelitian	3
1.4. Manfaat penelitian	3
1.5. Kerangka pemikiran	4
1.6. Hipotesis Penelitian	8
1.7. Tempat dan Waktu Penelitian	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.1. Beras Merah	9
2.2. Kualitas Beras.....	11
2.2.1. Gelatinisasi Pati	12
2.3. Beras Pecah Kulit	13
2.4 Ozon	17

2.5 Ozonisasi	20
2.6 <i>Rapid Visco Analyzer (RVA)</i>	23
2.7 <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	28
2.8 <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>	30
2.9 <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)</i>	32
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	34
3.1 Bahan dan Alat	34
3.1.1 Bahan	34
3.1.2 Alat.....	34
3.2 Metode Penelitian.....	35
3.2.1 Penelitian Utama.....	35
3.2.2 Penentuan Perlakuan Terbaik Metode <i>De Garmo</i>	38
3.3 Prosedur Penelitian.....	39
3.4 Jadwal Penelitian.....	42
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	43
4.1 Hasil Analisis Parameter Pengamatan yang Dianalisis Secara Statistik	43
4.1.1 Analisis Kimia	43
4.1.2 Respon Fisik	53
4.2 Parameter Pengamatan yang Dianalisis Secara Deskriptif.....	60
4.2.1 Respon Fisik	60
4.2.2 Respon Kimia	67
4.3 Pemilihan Perlakuan Konsentrasi Ozon yang Optimum	72
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	74
5.1 Kesimpulan.....	74
5.2 Saran.....	74
DAFTAR PUSTAKA.....	75
LAMPIRAN.....	81

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Beras Merah.....	10
Gambar 2.	Beras Merah Pecah Kulit	14
Gambar 3.	Struktur Beras	15
Gambar 4.	Pembentukan gas ozon melalui proses tumbukan	19
Gambar 5.	<i>Ozon Chamber</i>	21
Gambar 6.	<i>Profil Rapid Visco Analyser (RVA)</i>	24
Gambar 7.	Struktur Pati	27
Gambar 8.	<i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	28
Gambar 9.	Skema prinsip kerja difraksi sinar-X (XRD).	28
Gambar 10.	Instrumen <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>	30
Gambar 11.	Instrumen <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)</i>	32
Gambar 12.	Diagram Alir Prosedur Penelitian.....	41
Gambar 13.	Kurva Amilografi RVA	56
Gambar 14.	Difratrogram Beras Merah Pecah Kulit	61
Gambar 15.	a-e Morfologi Permukaan Konsentrasi 0 ppm (a), Konsentrasi 2 ppm (b),.....	65
Gambar 16.	Grafik Spektrum FT-IR pada Beras Merah Pecah Kulit.....	68
Gambar 17.	Grafik Analisis XRD Konsentrasi 0 ppm	105
Gambar 18.	Grafik Analisis XRD Konsentrasi 2 ppm	105
Gambar 19.	Grafik Analisis XRD Konsentrasi 4 ppm	106
Gambar 20.	Grafik Analisis XRD Konsentrasi 6 ppm	106
Gambar 21.	Grafik Analisis XRD Konsentrasi 8 ppm	107

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Kandungan Gizi 100 Gram pada Beras Merah.....	10
Tabel 2. Komposisi kimia beras pecah kulit per 100 g.....	16
Tabel 3. Komposisi beras pecah kulit dan beras sosoh	17
Tabel 4. Sifat-Sifat Ozon	18
Tabel 5. Parameter <i>Rapid Visco Analyser</i> (RVA)	24
Tabel 6. Daerah Gugus Fungsi pada IR :.....	33
Tabel 7. Rancangan Percobaan Faktorial	36
Tabel 8. Kelompok Ulangan Rancangan Percobaan	36
Tabel 9. Analisis Variansi Konsentrasi Ozon terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Beras Merah Pecah Kulit	37
Tabel 10. Rencana Jadwal Penelitian	42
Tabel 11. Hasil Penelitian Kadar Air.....	43
Tabel 12. Hasil Penelitian Kadar Pati.....	45
Tabel 13. Hasil Penelitian Analisis Aktivitas air (a_w)	48
Tabel 14. Hasil Penelitian Kadar Antosianin	51
Tabel 15. Hasil Analisis RVA	55
Tabel 16. Sudut Difraksi Beras Merah Pecah Kulit	61
Tabel 17. Daerah Kristalinitas (%) dan daerah Amorf (%) Beras Merah Pecah Kulit	62
Tabel 18. Hasil Pembacaan Analisis FTIR.....	69
Tabel 19. Nilai Hasil (Nr) Total Pengaruh Konsentrasi Ozon terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Beras Merah Pecah Kulit	72
Tabel 20. Perhitungan Kebutuhan Sampel	85
Tabel 21. Hasil Data Analisis Uji Kadar Air.....	86
Tabel 22. Analisis Variansi (ANAVA) Kadar Air	87
Tabel 23. Hasil Data Kadar Pati	87
Tabel 24. Analisis Variansi (ANAVA) Kadar Pati	88
Tabel 25. Uji Lanjut Duncan Analisis Kadar Pati	88

Tabel 26. Hasil Data Aktivitas Air (a_w).....	89
Tabel 27. Analisis Variansi (ANAVA) Aktivitas Air (a_w).....	90
Tabel 28. Hasil Perhitungan Nilai Absorban Kadar Antosianin.....	91
Tabel 29. Hasil Data Analisis Kadar Antosianin.....	91
Tabel 30. Analisis Variansi (ANAVA) Kadar Antosianin	92
Tabel 31. Uji Lanjut Duncan Analisis Kadar Antosianin.....	93
Tabel 32. Data <i>Peak Viscosity</i>	94
Tabel 33. Analisis Variansi (ANAVA) <i>Peak Viscosity</i>	94
Tabel 34. Uji Lanjut Duncan <i>Peak Viscosity</i>	94
Tabel 35. Data <i>Trough Viscosity</i>	95
Tabel 36. Analisis Variansi (ANAVA) <i>Trough Viscosity</i>	95
Tabel 37. Uji Lanjut Duncan <i>Trough Viscosity</i>	96
Tabel 38. Data <i>Breakdown</i>	96
Tabel 39. Analisis Variansi (ANAVA) <i>Breakdown</i>	97
Tabel 40. Uji Lanjut Duncan <i>Breakdown</i>	97
Tabel 41. Data <i>Final Viscosity</i>	98
Tabel 42. Analisis Variansi (ANAVA) <i>Final Viscosity</i>	98
Tabel 43. Uji Lanjut Duncan <i>Final Viscosity</i>	98
Tabel 44. Data <i>Setback</i>	99
Tabel 45. Analisis Variansi (ANAVA) <i>Setback</i>	99
Tabel 46. Uji Lanjut Duncan <i>Setback</i>	100
Tabel 47. Data <i>Peak Time</i>	100
Tabel 48. Analisis Variansi (ANAVA) <i>Peak Time</i>	101
Tabel 49. Uji Lanjut Duncan <i>Peak Time</i>	101
Tabel 50. Data <i>Pasting Time</i>	102
Tabel 51. Analisis Variansi (ANAVA) <i>Pasting Time</i>	102
Tabel 52. Uji Lanjut Duncan <i>Pasting Time</i>	102
Tabel 53. Penentuan Konsentrasi Optimum Metode <i>De Garmo</i>	103

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Analisis Kadar Air Metode Gravimetri (AOAC, 2005)	81
Lampiran 2.	Analisis Kadar Pati Metode Luff Schrool (AOAC, 1970)	81
Lampiran 3.	Analisis Antosianin menggunakan Metode pH <i>Differential</i> (Pasaribu et al., 2021)	82
Lampiran 4.	Analisis Nilai Aktivitas Air (a_w)	83
Lampiran 5.	Analisis Profil Gelatinisasi Pati Metode <i>Rapid Visco</i> <i>Analyzer</i> (RVA) (Munarko et al., 2022)	83
Lampiran 6.	Analisis Gugus Fungsi Metode <i>Fourier Transform Infrared</i> <i>Spectroscopy</i> (FTIR)	84
Lampiran 7.	Analisis Struktur Kristalin Pati Metode XRD (X-Ray Diffraction)	84
Lampiran 8.	Analisis Morfologi Permukaan Metode <i>Scanning Electron</i> <i>Microscope</i> (SEM) (Rohmah et al., 2022)	85
Lampiran 9.	Perhitungan Kebutuhan Sampel, Kebutuhan Bahan Penelitian, dan Rancangan Anggaran Biaya Penelitian	85
Lampiran 10.	Hasil Analisis Kadar Air Beras Merah Pecah Kulit	86
Lampiran 11.	Hasil Analisis Kadar Pati Beras Merah Pecah Kulit	87
Lampiran 12.	Hasil Analisis Aktivitas Air (a_w) Beras Merah Pecah Kulit	89
Lampiran 13.	Hasil Analisis Kadar Antosianin Beras Merah Pecah Kulit	90
Lampiran 14.	Hasil Data Analisis <i>Rapid Visco Analyzer</i> (RVA)	94
Lampiran 15.	Hasil Penentuan Konsentrasi Optimum Menggunakan Metode De Garmo	103
Lampiran 16.	Hasil Data Analisis <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	105
Lampiran 17.	Dokumentasi Proses Ozonisasi Beras Hitam Pecah Kulit	107
Lampiran 18.	Dokumentasi Penelitian	108

BAB I

PENDAHULUAN

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

1.1.Latar Belakang

Beras merupakan salah satu bahan pangan pokok yang paling banyak dikonsumsi oleh masyarakat Indonesia dan memiliki peran penting dalam memenuhi kebutuhan energi harian. Sebagian besar penduduk Indonesia menjadikan beras sebagai sumber utama karbohidrat sehingga keberadaan dan kualitas beras menjadi aspek yang sangat penting dalam sistem pangan nasional. Data Badan Pusat Statistik (BPS) menunjukkan bahwa produksi beras di Indonesia pada tahun 2025 diperkirakan mencapai sekitar 34,7 juta ton, sedangkan konsumsi beras nasional berada pada kisaran 31 juta ton per tahun (BPS, 2025). Hal tersebut menunjukkan bahwa beras masih menjadi komoditas pangan utama yang sangat dibutuhkan oleh masyarakat Indonesia. Tingginya tingkat konsumsi beras tersebut menuntut adanya upaya untuk menjaga ketersediaan serta kualitas beras yang dikonsumsi oleh masyarakat, baik dari segi nilai gizi maupun kualitas berasnya.

Sebagai sumber karbohidrat utama, beras tidak hanya berperan dalam memenuhi kebutuhan energi harian tetapi juga perlu diperhatikan dari aspek kesehatannya terutama melalui varietas beras berwarna seperti beras merah. Beras merah dikenal sebagai pangan fungsional karena mengandung senyawa bioaktif yang bermanfaat bagi kesehatan. Warna merah pada beras ini berasal dari kandungan antosianin yang terdapat pada lapisan aleuron. Senyawa tersebut memiliki aktivitas biologis sebagai antioksidan serta berpotensi memberikan efek antikanker dan membantu mengontrol indeks glikemik (Sumartini et al., 2018).

Secara umum, beras merah memiliki kandungan nutrisi yang lebih tinggi dibandingkan beras putih, seperti kalsium, seng, magnesium, protein, dan serat. Beras merah merupakan beras yang tidak mengalami proses penyosohan sempurna,

melainkan hanya melalui penggilingan menjadi beras pecah kulit sehingga lapisan kulit ari masih melekat pada endosperm. Lapisan tersebut kaya akan minyak alami, lemak esensial, dan serat yang berkontribusi terhadap nilai gizi beras. Kandungan nutrisi tersebut menjadikan beras merah sebagai salah satu alternatif pangan yang lebih sehat dibandingkan beras putih (Akbar & Rejeki, 2024; Santika, 2010).

Beras merah pecah kulit mengandung berbagai komponen bioaktif seperti fenolik, flavonoid, dan pigmen alami yang berfungsi sebagai antioksidan. Senyawa antioksidan ini berperan dalam menangkal radikal bebas. Selain itu, kandungan serat yang tinggi pada beras merah juga berperan dalam meningkatkan kesehatan sistem pencernaan. Dengan demikian, beras merah memiliki potensi yang besar sebagai pangan fungsional yang tidak hanya memenuhi kebutuhan energi, tetapi juga memberikan manfaat kesehatan tambahan (Akbar & Rejeki, 2024).

Beras merah pecah kulit juga memiliki kelemahan, terutama terkait dengan karakteristik fisik dan kimianya. Kandungan lemak yang relatif tinggi pada lapisan kulit ari menyebabkan beras lebih rentan mengalami perubahan kimia, seperti oksidasi lipid yang dapat menurunkan kualitas produk. Selain itu, perubahan komposisi kimia seperti protein dan pati juga dapat memengaruhi sifat fisik beras, termasuk tekstur dan sifat gelatinisasi. Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk mempertahankan karakteristik fisik dan kimia beras merah tanpa mengurangi nilai gizinya (Hasnelly et al., 2020).

Upaya menjaga dan meningkatkan kualitas beras merah dapat dilakukan melalui penerapan teknologi ozonisasi menggunakan ozon (O_3) sebagai agen oksidasi terkendali. Ozon merupakan oksidator kuat dengan potensial oksidasi sebesar 2,07 V yang mampu bereaksi dengan berbagai komponen organik serta terurai kembali menjadi oksigen sehingga tidak meninggalkan residu berbahaya pada bahan pangan. Paparan ozon dalam konsentrasi yang tepat dapat memodifikasi struktur lapisan aleuron dan bran, memengaruhi kemampuan penyerapan air dan oksigen, serta menyebabkan perubahan pada kestabilan lipid dan pati yang berpengaruh terhadap sifat fisik dan kimia beras, seperti viskositas *pasting* dan kadar asam lemak bebas. Selain itu, ozonisasi juga berpotensi meningkatkan ketersediaan senyawa bioaktif dan aktivitas antioksidan melalui mekanisme

oksidasi terkontrol. Namun, penggunaan ozon dengan konsentrasi terlalu tinggi dapat menyebabkan oksidasi berlebih yang merusak komponen penting dalam beras, sehingga pengendalian konsentrasi ozon diperlukan untuk memperoleh efek yang optimal (Kaur et al., 2022).

Meskipun potensi ozon dalam memodifikasi karakteristik bahan pangan telah banyak dikaji, penelitian mengenai pengaruh variasi konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisik dan kimia beras merah pecah kulit masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh konsentrasi ozon serta menentukan kondisi optimal yang dapat mempertahankan mutu beras. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi ilmiah mengenai perubahan karakteristik beras merah akibat perlakuan ozon dan menjadi dasar dalam pengembangan teknologi pengolahan beras merah yang lebih efektif serta bernilai tambah sebagai pangan fungsional.

1.2. Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah yang didapat dari penelitian ini adalah bagaimana pengaruh konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisik dan kimia dari beras merah pecah kulit?

1.3. Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dari penelitian ini yaitu melakukan analisis fisik dan kimia terhadap beras merah pecah kulit dengan berbagai konsentrasi ozon.

Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui pengaruh konsentrasi ozon terhadap karakteristik beras merah pecah kulit

1.4. Manfaat penelitian

Manfaat penelitian yang akan dilakukan sebagai berikut:

1. Menambah pengetahuan ilmiah mengenai pengaruh konsentrasi ozon (0, 2, 4, 6, 8 ppm) terhadap perubahan karakteristik fisik serta karakteristik kimia pada beras merah pecah kulit.
2. Memberikan rekomendasi konsentrasi ozon yang paling optimal untuk meningkatkan sifat fungsional pada beras merah pecah kulit.
3. Menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya terkait pemanfaatan ozon dalam modifikasi bahan pangan.

4. Mendukung pengembangan teknologi pengolahan non-termal yang ramah lingkungan untuk menghasilkan beras merah pecah kulit dengan sifat fungsional yang lebih baik.

1.5.Kerangka pemikiran

Beras pecah kulit (BPK) adalah beras yang hanya dihilangkan sekamnya tanpa melalui proses penyosohan, sehingga masih mempertahankan sebagian besar komponen penyusunnya seperti pericarp (1–2%), aleuron dan testa (4–6%), embrio (2–3%), serta endosperm (89–94%). Aleuron dan embrio merupakan bagian yang paling kaya nutrisi karena mengandung protein, lemak, vitamin B, mineral, serat pangan, dan senyawa bioaktif, sedangkan endosperm didominasi oleh pati dan protein. Keberadaan lapisan luar ini menjadikan beras pecah kulit memiliki nilai gizi yang lebih tinggi dibandingkan beras putih (Bao, 2019). Selain itu, struktur lapisan kulit ari yang relatif kedap terhadap oksigen, karbon dioksida, dan uap air berfungsi sebagai pelindung alami terhadap kerusakan oksidatif dan enzimatik. Dengan demikian, struktur fisik beras pecah kulit sangat berperan dalam menentukan karakteristik kimia dan kestabilan mutunya (Muchtadi, 2015).

Beras merah pecah kulit (BMPK) kaya nutrisi fungsional karena masih mempertahankan lapisan bran dan aleuron yang mengandung serat pangan, antioksidan, vitamin B kompleks, serta mineral. Meskipun kaya nutrisi, keberadaan lapisan bran membuat BMPK lebih rentan mengalami degradasi selama penyimpanan dibandingkan beras putih (Wang et al., 2021). Paparan oksigen dan kelembaban dapat menurunkan kualitas butir beras merah, termasuk berkurangnya kadar protein serta pati yang dapat dicerna (Frei et al., 2012).

Kualitas beras merah pecah kulit sangat dipengaruhi oleh parameter fisik dan kimia yang saling berkaitan. Kadar air merupakan indikator terpenting dalam menilai kesegaran dan kualitas beras merah, kadar air yang sesuai dapat berikatan erat dengan pati, protein, dan koloid hidrofilik lainnya sehingga meningkatkan kualitas pangan. Selama penyimpanan, kadar air cenderung menurun lebih cepat pada suhu tinggi, sementara nilai asam lemak bebas meningkat secara bertahap dan paling cepat pada suhu tinggi, yang akhirnya menyebabkan beras menjadi tengik dan menurunkan kualitas. 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 (Wang et al., 2021).

Dalam upaya mempertahankan dan memodifikasi karakteristik mutu tersebut, diperlukan teknologi yang mampu bekerja secara efektif tanpa merusak komponen nutrisi. Salah satu teknologi yang berkembang adalah penggunaan ozon. Penggunaan ozon telah dilaporkan efektif untuk menangani permasalahan penting seperti penumpukan mikotoksin dan residu pestisida, serta berfungsi sebagai agen disinfeksi benih yang tidak meninggalkan residu berbahaya karena sifatnya yang cepat terurai menjadi oksigen (Pandiselvam et al., 2020).

Ozon merupakan pengoksidasi terkuat kedua setelah fluor dengan potensial oksidasi 2,07 V. Ozon bekerja melalui dua mekanisme utama yaitu, reaksi langsung yang bersifat selektif terhadap ikatan tidak jenuh, serta reaksi tidak langsung melalui pembentukan radikal hidroksil yang sangat reaktif (Kaur et al., 2023). 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). Namun, 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).

Perubahan mutu fisik dan kimia akibat perlakuan ozon berkaitan erat dengan mekanisme oksidasi terhadap komponen makromolekul penyusun beras. Pada pati, ozonasi menyebabkan terjadinya depolimerisasi rantai amilosa dan amilopektin serta pembentukan gugus karbonil dan karboksil. Proses ini juga mengubah struktur lamela pada daerah amorf dan kristalin dalam granula pati. Perubahan struktur tersebut berdampak langsung terhadap sifat reologi pati, seperti viskositas, daya kembang, kapasitas penyerapan air, serta karakteristik gelatinisasi. Penurunan berat molekul pati akibat oksidasi juga meningkatkan kemampuan hidrasi granula dan mempercepat proses pemasakan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi ozon dapat meningkatkan

kemampuan penyerapan air serta perubahan dimensi butir beras selama pemasakan yang menyerupai karakteristik beras yang telah mengalami proses aging (Kaur et al., 2023).

Ozon juga dapat mengoksidasi gugus sulfhidril (-SH) dan memengaruhi pembentukan ikatan disulfida, sehingga menyebabkan perubahan pada struktur sekunder dan tersier protein. Perubahan ini dapat meningkatkan kapasitas pengikatan air dan fleksibilitas molekul protein. Namun, pada paparan ozon yang berlebihan, protein dapat mengalami agregasi yang menyebabkan penurunan kelarutan. Di sisi lain, komponen lipid juga dapat mengalami oksidasi yang menghasilkan senyawa turunan seperti peroksida dan aldehida, yang dapat memengaruhi stabilitas oksidatif bahan (Kaur et al., 2023).

Pada tingkat tertentu, perlakuan ozon juga memengaruhi komponen bioaktif dalam beras merah pecah kulit, khususnya senyawa fenolik yang berperan sebagai antioksidan. Paparan ozon dalam konsentrasi terkendali dapat menginduksi stres oksidatif ringan yang merangsang peningkatan kandungan senyawa fenolik dan aktivitas antioksidan. Namun, apabila paparan ozon terlalu tinggi, senyawa fenolik dapat mengalami degradasi akibat reaksi oksidasi lanjutan. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan nilai fungsional bahan sangat bergantung pada keseimbangan antara pembentukan dan degradasi senyawa bioaktif selama proses ozonasi (Kaur et al., 2023).

Efektivitas ozon pada biji-bijian sangat dipengaruhi oleh konsentrasi, dosis, waktu paparan, dan laju alir. Konsep CT ($\text{konsentrasi} \times \text{waktu}$) menjadi parameter penting dalam menentukan tingkat reaksi ozonasi. Kombinasi dosis rendah dengan waktu paparan lama dapat memberikan efek yang setara dengan dosis tinggi dalam waktu singkat, namun penggunaan dosis tinggi cenderung meningkatkan risiko kerusakan bahan (Kaur et al., 2023).

Menurut (Shah et al., 2011), menunjukkan bahwa ozon dengan dosis 0,1 hingga 0,4 ppm efektif mengurangi jumlah *Bacillus cereus* pada beras mentah dan matang. Namun, perlakuan tersebut menyebabkan perubahan fisikokimia pada beras putih mentah, yaitu penurunan pH, perubahan nilai warna L^* dan b^* , serta peningkatan total padatan yang larut ($P < 0,05$), sementara kadar air, daya rekat, serta kekerasan

beras mentah dan matang tidak mengalami perubahan signifikan ($P > 0,05$). Analisis ini membuktikan bahwa batasan harus diterapkan pada konsentrasi ozon dan waktu paparan untuk meminimalkan efek merugikan terhadap karakteristik fisikokimia beras.

Menurut (Kaur et al., 2023), menyatakan bahwa perlakuan ozon pada gandum dapat meningkatkan nilai kecerahan (L^*) dari 96,9 menjadi 97,4 serta meningkatkan kapasitas penyerapan air sebesar 17-24%. Perubahan viskositas dan indikasi degradasi pati juga diamati pada produk berbasis tepung akibat paparan ozon, yang menunjukkan adanya modifikasi struktur makromolekul.

Perlakuan ozon pada tingkat intensitas sedang diketahui dapat meningkatkan kemampuan pati untuk mengembang dan menaikkan viskositasnya selama proses gelatinisasi. Namun, apabila perlakuan ozon dilakukan secara berlebihan, kedua sifat tersebut justru mengalami penurunan (Çatal, 2015). Selain itu, proses ozonasi juga mampu mengurangi tingkat retrogradasi sekaligus meningkatkan kejernihan pasta pati yang menunjukkan terjadinya perubahan struktur molekul pati yang memengaruhi karakteristik gelatinisasi dan sifat pastingnya (Castanha et al., 2017).

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa perlakuan ozon memiliki potensi yang besar dalam memodifikasi karakteristik fisik dan kimia beras merah pecah kulit. Oleh karena itu, penelitian mengenai pengaruh variasi konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisik dan kimia beras merah pecah kulit perlu dilakukan untuk memperoleh kondisi perlakuan yang optimal serta menghasilkan produk dengan mutu dan nilai fungsional yang lebih baik.

Metode Rancangan Acak Kelompok (RAK) dilakukan dengan 1 faktor dan masing-masing 5 taraf sehingga didapat hasil 5 perlakuan dengan 5 kali ulangan dan 25 satuan percobaan. Data yang didapatkan kemudian diolah dan apabila analisis yang dilakukan terdapat pengaruh antara rata-rata dari masing-masing perlakuan ($F_{hitung} \geq F_{tabel}$), maka harus dilakukan uji menggunakan uji jarak berganda Duncan yang bertujuan untuk mengetahui kelompok sampel yang memiliki perbedaan yang nyata (Gaspersz, 1995).

1.6.Hipotesis Penelitian

Berdasarkan kerangka pemikiran diatas, maka diperoleh hipotesis yang didapat yaitu perlakuan ozon dengan konsentrasi yang berbeda dapat berpengaruh terhadap karakteristik fisik dan kimia beras merah pecah kulit.

1.7.Tempat dan Waktu Penelitian

Tempat penelitian dilaksanakan di dua tempat yaitu di 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 dan waktu pelaksanaan penelitian dimulai pada bulan April hingga selesai.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menguraikan mengenai : (2.1) Beras Merah, (2.2) Kualitas Beras (2.3) Beras Pecah Kulit (2.4), Ozon, (2.5) Ozonisasi, (2.6) *Rapid Visco Analyzer* (RVA), (2.7) X-Ray Diffraction (XRD), (2.8) *Scanning Electron Microscope* (SEM), (2.9) *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR).

2.1. Beras Merah

Beras merah (*Oryza nivara*) merupakan salah satu sumber pangan pokok di Indonesia selain beras putih, yang memiliki nilai kesehatan tinggi. Beras merah mengandung berbagai nutrisi esensial, termasuk karbohidrat, lemak, protein, serat, mineral, serta antosianin yang berperan sebagai antioksidan. Antosianin sebagai pigmen merah terdapat pada pericarp dan tegmen (lapisan kulit) beras, atau juga pada setiap bagian gabah. Kandungan antosianin ini memberikan fungsi antioksidan yang dapat menangkal radikal bebas dalam tubuh (Hernawan, 2016).

Beras merah termasuk biji-bijian utuh yang hanya melalui sekali proses pengelupasan kulit, sehingga nutrisi yang terkandung tidak banyak hilang, membuatnya memiliki kandungan nutrisi lebih tinggi dan lebih sehat dibandingkan beras putih (Susanti et al., 2019). Keunggulan nutrisi beras merah dibandingkan beras putih terletak pada komposisi seperti serat kasar, vitamin B kompleks, asam lemak esensial, dan mineral (Suliartini et al., 2021). Selain itu, komponen antioksidan dalam beras merah berperan dalam menangkal radikal bebas (Puspitasari, 2022). Warna merah pada beras ini berasal dari lapisan aleuron, yang mengandung gen penghasil antosianin sebagai pigmen penghasil warna merah sekaligus antioksidan (Susanti et al., 2019).

Klasifikasi beras merah menurut Puspitasari (2022) sebagai berikut :

Kingdom	: <i>Plantae</i>
Subkingdom	: <i>Tracheobionta</i>
Super Divisi	: <i>Spermatophyta</i>
Divisi	: <i>Magnoliophyta</i>
Kelas	: <i>Liliopsida</i>

Sub Kelas : *Commelinidae*
 Ordo : *Poales*
 Famili : *Poaceae*
 Genus : *Oryza*
 Spesies : *Oryza Nivara*



Gambar 1. Beras Merah

Tabel 1. Kandungan Gizi 100 Gram pada Beras Merah

Kandungan gizi	Beras Merah
Protein (g)	9,4
Kalori (kal)	356
Karbohidrat (mg)	76
Lemak	3,3
Serat (g)	6,7
Kalsium (mg)	15
Fosfor (mg)	257
Zat besi (mg)	0,8
Vitamin B1 (mg)	0,34
Air (g)	11,3

Sumber: (USDA Food Composition Database Standard Reference, 2021)

Penelitian ini menggunakan beras dengan varietas Inpari 24, yang merupakan salah satu varietas padi fungsional dengan warna beras merah yang unggul nasional yang memiliki kombinasi antara produktivitas tinggi, mutu

konsumsi baik, serta kandungan fungsional khas beras merah. Inpari 24 memiliki potensi hasil hingga 7,7 ton/ha dengan produktivitas lapang berkisar 5,5–8,0 ton/ha, lebih tinggi dibanding banyak varietas beras merah lokal yang umumnya hanya sekitar 2–3 ton/ha. Selain itu, Inpari 24 memiliki tekstur nasi yang lebih pulen, sehingga lebih diterima konsumen dibanding beras merah lain yang cenderung pera. Varietas ini juga dikenal cukup adaptif dan memiliki ketahanan terhadap beberapa hama dan penyakit, sehingga kualitas bahan bakunya lebih stabil untuk penelitian. (Margaret, 2020; Sasmita, 2019).

Varietas Inpari-24 Gabusan juga mengandung thiamin (vitamin B1) cukup tinggi, yaitu 0,59 mg/100g, tahan penyakit hawar daun bakteri dan mempunyai mutu beras yang baik. Bentuk beras merah varietas Inpari-24 Gabusan langsing dengan tekstur nasi pulen. Kandungan antosianin beras varietas Inpari-24 Gabusan lebih tinggi dari Aek Sibundong, baik dalam bentuk beras pecah kulit (BPK) maupun beras giling derajat sosoh (BGDS) 100%, serta warna merah pada beras varietas Inpari-24 Gabusan tidak hanya di lapisan luar tetapi sampai ke dalam endosperma

2.2. Kualitas Beras

Kualitas beras menjadi faktor yang sangat penting karena berpengaruh terhadap nilai gizi, keamanan pangan, serta tingkat penerimaan konsumen. Berdasarkan SNI 6128:2020 Beras harus memenuhi persyaratan mutu umum dan mutu khusus. Syarat mutu umum diantaranya meliputi:

1. bebas hama dan penyakit
2. bebas bau apak, asam atau bau asing lainnya
3. bebas dari campuran dedak dan bekatul, untuk beras sosoh
4. derajat sosoh minimal 95%, untuk beras sosoh
5. kadar air maksimal 14 %
6. bebas dari bahan kimia yang membahayakan dan merugikan, serta aman bagi konsumen mengacu pada ketentuan peraturan yang berlaku.

Sifat-sifat fisikokimia beras sangat menentukan mutu tanak dan mutu rasa nasi yang dihasilkan. Lebih khusus lagi, mutu ditentukan oleh kandungan amilosa, kandungan protein dan kandungan lemak. Pengaruh lemak terutama muncul setelah

gabah atau beras disimpan. Kerusakan lemak mengakibatkan penurunan mutu beras. Kandungan amilosa berkorelasi positif dengan aroma nasi dan berkorelasi negatif dengan tingkat kelunakan, warna dan kilap (Hernawan & Meylani, 2016).

Kualitas beras merupakan faktor penting dalam menentukan nilai guna dan daya terima konsumen terhadap produk pangan ini. Kualitas beras merah beras pecah kulit (BMPK) dievaluasi berdasarkan serangkaian parameter fisik dan kimia yang mencerminkan kesegaran, nilai gizi, serta sifat fungsionalnya. Kadar air menjadi indikator kesegaran beras merah, karena kadar air yang optimal (12–14 %) dapat berikatan erat dengan pati, protein, dan koloid hidrofilik lainnya, sehingga meningkatkan kualitas makan dan mencegah ketengikan. Penurunan kadar air selama penyimpanan, terutama pada suhu tinggi, mempercepat degradasi dan menurunkan kualitas beras secara keseluruhan. Kadar air merupakan komponen yang mempengaruhi mutu fisik beras hasil penggilingan. Baik buruknya beras yang dihasilkan saat penggilingan dipengaruhi oleh tinggi rendahnya kadar air dalam gabah. Kadar mempengaruhi proses penggilingan gabah karena bila kadar air terlalu tinggi lebih dari 14%, padi akan terlalu lunak atau lembek sehingga menghasilkan beras yang patah (Wang et al., 2021).

Kualitas beras juga dievaluasi dari perubahan gelatinisasi pati, yang merupakan proses pembengkakan granula pati saat dipanaskan dalam air. Gelatinisasi pati memengaruhi sifat reologi nasi, seperti viskositas dan daya cerna, di mana suhu gelatinisasi yang lebih tinggi menunjukkan ketahanan kristalin pati yang baik (Jiang et al., 2022)

Pati pada beras merah selama penyimpanan dapat mengalami perubahan melalui proses retrogradasi, yaitu terbentuknya kembali struktur kristalin pada granula pati yang menyebabkan peningkatan kekerasan nasi (Patindol, 2004). Perubahan pada sifat gelatinisasi pati tersebut juga dapat digunakan sebagai salah satu indikator utama dalam menilai terjadinya penuaan pada beras merah (Wang et al., 2021).

2.2.1. Gelatinisasi Pati

Gelatinisasi pati adalah proses di mana granula pati menyerap air dan membengkak saat dipanaskan, menyebabkan perubahan dari struktur kristalin ke

amorf. Suhu gelatinisasi (GT) dan sifat pasting (diukur dengan RVA) sangat bergantung pada kandungan amilosa, di mana amilosa tinggi cenderung memiliki GT tinggi dan viskositas pasting rendah, sementara amilosa rendah memiliki GT rendah dan viskositas tinggi (Pang et al., 2016). Penelitian Pang et al. (2016) menemukan bahwa beras dengan amilosa tinggi (AAC tinggi) cenderung memiliki suhu gelatinisasi tinggi (GT tinggi) dan viskositas pasting rendah, yang memengaruhi kualitas memasak beras menjadi lebih keras dan kurang rekat.

Suhu gelatinisasi digunakan sebagai parameter dalam menduga waktu yang dibutuhkan untuk memasak beras menjadi nasi. Suhu gelatinisasi adalah suhu di mana beras menyerap air dan butiran granula pati membengkak secara *irreversibel* (Parker dan Ring, 2001)

Suhu gelatinisasi merupakan salah satu parameter untuk mengetahui kesempurnaan struktur kristal pati. Tekstur nasi yang tidak seragam dapat disebabkan karena suhu gelatinisasi yang tinggi karena suhu gelatinisasi mempengaruhi tekstur tengah (*core*) nasi (Mestres et al., 2011). Konsistensi gel menunjukkan kecenderungan tekstur nasi untuk mengeras setelah dingin. Semakin keras konsistensi gel maka nasi akan cenderung menjadi lebih pera. Konsistensi gel berkorelasi positif dengan penyerapan air dan pengembangan butir beras saat dimasak (Malini et al., 2011)

Tekstur nasi, termasuk kekerasan, daya rekat, dan kekenyalan, menjadi parameter penting lain dalam evaluasi kualitas beras. Tekstur dipengaruhi oleh interaksi antara pati, protein, dan kadar air, di mana penurunan kadar air menyebabkan peningkatan kekerasan akibat pembentukan ikatan hidrogen yang lebih kuat antar molekul pati. Pada suhu penyimpanan tinggi, tekstur nasi beras merah menjadi lebih keras dan kurang rekat, yang menurunkan daya terima sensoris (Wang et al. 2021).

2.3. Beras Pecah Kulit

Beras berasal dari tanaman padi yang kaya akan kandungan karbohidrat. Penggilingan gabah kering dapat menghasilkan beras pecah kulit (BPK). Tahapan pengupasan kulit gabah dilakukan untuk menghilangkan sekam dengan tetap

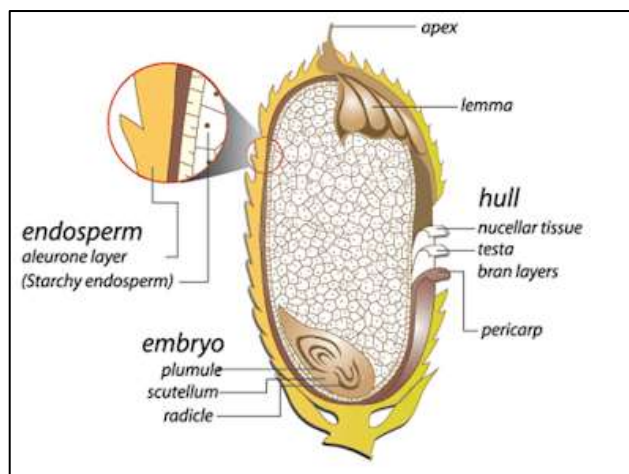
menjaga kerusakan pada lapisan dedak seminimal mungkin serta mengurangi tingkat kepatahan pada beras yang dihasilkan (Nur,2014).



Gambar 2. Beras Merah Pecah Kulit

Beras pecah kulit adalah biji-bijian utuh yang tidak disempurnakan, kasar, dan tidak dipoles. BPK diperoleh dengan melepaskan bagian kulit terluarnya yang dikenal sebagai hull sehingga BPK dapat mempertahankan zat gizi sedangkan penggilingan sempurna menyebabkan BPK menjadi beras putih dengan kandungan zat gizi yang menurun. BPK dapat menjadi beras putih apabila lapisan dedaknya dihilangkan selama proses penggilingan. BPK mengandung lapisan dedak dan embrio yang kaya akan nutrisi, termasuk vitamin, serat pangan, mineral, serta komponen bioaktif lainnya. Beras pecah kulit mengandung zat gizi dan senyawa bioaktif yang lebih tinggi daripada beras putih, BPK memiliki beberapa manfaat dibandingkan dengan beras sosoh/beras putih karena memiliki kandungan serat tinggi yang bermanfaat untuk mencegah penyakit gastrointestinal, kaya akan vitamin B untuk mencegah beri-beri, juga tinggi lemak sebagai sumber energi yang baik (Suarti et al., 2024) (Zahra & Jabeen, 2020). Sehingga beras pecah kulit dapat dijadikan makanan pokok yang lebih bernutrisi dan berpotensi lebih sehat (Wu et al., 2022).

Penggilingan menghilangkan bagian dedak dan embrio biji-bijian, yang kaya akan serat, protein, mineral, dan vitamin. Hal ini juga menyebabkan kehilangan tiamin hingga 80%. Penggilingan menghilangkan bagian dedak dan embrio biji-bijian, yang mengakibatkan kehilangan kandungan nutrisi, karena nutrisi tersebut tidak terdistribusi secara merata dalam biji-bijian. Nutrisi dan fitokimia terdapat dalam konsentrasi yang lebih tinggi pada bagian luar biji-bijian (Zahra & Jabeen, 2020)



Gambar 3. Struktur Beras

Beras pecah kulit merupakan gabah yang sudah dikupas kulitnya (sekam) namun masih terdapat lapisan pericarp, aleuron, embrio dan endosperm (Juliano, 1972). Beras pecah kulit mengandung 1.9% lemak. Sekitar 80% lemak diantaranya berada didalam dedak dan bekatul, dimana sepertiga dari bagian tersebut berada dalam embrio (Juliano, 1972).

Komponen dedak atau bekatul pada beras pecah kulit sejumlah 6-7% dapat berkontribusi pada kadar lemak yang lebih tinggi mengingat bekatul sendiri mempunyai kadar lemak berkisar 15-19,7%(Damayanthi E et al., 2007).

Beras pecah kulit mengandung lemak yang cukup tinggi. Menurut (Damayanthi et al., 2007), kandungan lemak bekatul yang tinggi (15-16%) menyebabkan terjadinya kerusakan hidrolitik dan oksidatif yang dapat menimbulkan bau tengik. Untuk menghindari terjadinya kerusakan tersebut dapat dilakukan memberi batas kritis pada kadar air yaitu maksimum 14%

Kandungan hemiselulosa pada dedak (bran), katul (polish), dan embrio mengandung lebih banyak hemiselulosa dibanding beras sosoh (Juliano, 1972). Beras pecah kulit mengandung pentosan sebesar 1.42-2.08 jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kandungan pentosan beras sosoh. Kandungan pentosan tertinggi terdapat pada dedak 8.59-10.9%, embrio 4.8-7.4%, dan katul 3.15-6.01%. Kandungan gula pada beras pecah kulit, lebih tinggi dari kandungan beras sosoh, yaitu 0.83-1.39% dengan total gula pereduksi 0.09-0.13%. Beras pecah kulit mengandung sebanyak 8% protein (Juliano, 1972). Komposisi kimia pada beras pecah kulit dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Komposisi kimia beras pecah kulit per 100 g

Keterangan	Nilai
Energi	1,527 kJ (365 kcal)
Karbohidrat	74,9 g
Gula	0,12 g
Serat pangan	1,3 g
Lemak	1,90 g
Protein	7,13 g
Air	11,62 g
Thiamin (Vit. B ₁)	0,070 mg (5%)
Riboflavin (Vit. B ₂)	0,049 mg (3%)
Niasin (Vit. B ₃)	1,96 mg (11%)
Asam pantotenat (B ₅)	1,014 mg (20%)
Vitamin B ₆	0,164 mg (13%)
Folat (Vit. B ₉)	8 µg (2%)
Kalsium	28 mg (3%)
Besi	0,80 mg (6%)
Magnesium	25 mg (7%)
Mangan	1,088 mg (54%)
Fosfor	115 mg (16%)
Kalium	115 mg (2%)
Seng	1,09 mg (11%)

Sumber: Sumber Data Nutrisi USDA

Asam lemak esensial yang terkandung pada brown rice dapat menurunkan kolesterol LDL (bad cholesterol) sampai 7%. Ditambah kandungan serat, Mg dan vitamin B, maka BPK juga melindungi terhadap penyakit kardiovaskuler. BPK juga kaya fitonutrien yang merupakan antioksidan dan sebagainya. Lebih dari 80% fitonutrien terdapat pada kulit ari, maka proses penggilingan dan pemolesan telah membuang sebagian besar fitonutrien. Berikut perbandingan beras pecah kulit dengan beras sosoh pada tabel 3.

Tabel 3. Komposisi beras pecah kulit dan beras sosoh

Komposisi	Satuan	Beras pecah kulit	Beras giling
Kadar air	(%)	14,0	14,0
Kalori	(g/100 g)	352	354
Protein	(g/100 g)	7,1	7,8
Lemak	(g/100 g)	1,9	0,5
Karbohidrat	(g/100 g)	74,9	77,8
Serat kasar	(g/100 g)	1,3	0,4
Abu	(g/100 g)	1,0	0,6
Kalsium	(mg/100 g)	28	10,4
Fosfor	(mg/100 g)	183	104
Riboflavin	(mg/100 g)	0,05	0,02
Besi	(mg/100 g)	1,6	1,2
Thiamin	(mg/100 g)	0,39	0,10
Niacin	(mg/100 g)	3,9	2,3

Sumber: (Kusumaningtyas, 2004).

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 (Yusuf, 2008).

Ozon (O_3) dibentuk dari atom oksigen (O). Dalam keadaan paling stabil, atom oksigen berada dalam bentuk diatomic molekul O_2 atau yang biasa disebut dengan oksigen. Molekul ozon mengandung tiga atom oksigen dan lebih tidak stabil jika dibandingkan dengan molekul oksigen (O_2). Ozon merupakan gas yang sangat reaktif dan dalam konsentrasi tertentu bersifat racun dan dapat menyebabkan iritasi. Untuk lebih lengkapnya sifat-sifat ozon dapat dilihat seperti tabel 1. dibawah ini :

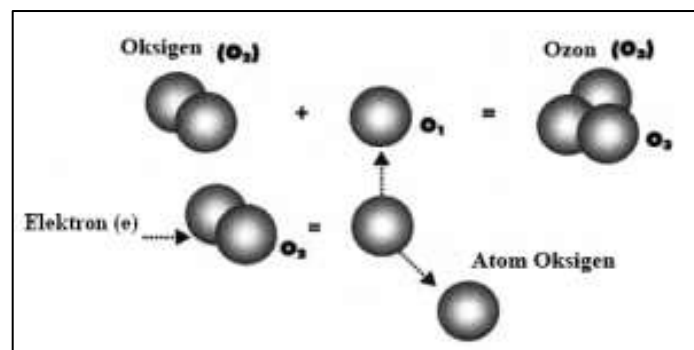
Tabel 4. Sifat-Sifat Ozon

No.	Keterangan	
1.	Nama Sistematis	Trioxxygen
2.	Formula Molekul	O_3
3.	Penampakan	Gas berwarna kebiru-biruan
4.	Kepadatan	2.144 g.L ⁻¹ (0°C)
5.	Bentuk Zat	Gas
6.	Daya Larut Dalam Air	0.105 g-100ml ⁻¹ (0°C)
7.	Titik Beku	80.7 K. – 192.5°C
8.	Titik Didih	161.3 K, - 111.9°C
9.	Standar Entalpi ($\Delta_f H^\circ$) solid	+142.3 kJ.mol ⁻¹
10.	Standar Entropi (S°) solid	237.7 J.K ⁻¹ .mol ⁻¹

Ozon juga terbentuk pada kadar rendah dalam udara akibat arus listrik seperti kilat, dan oleh tenaga tinggi seperti radiasi elektromagnetik. Ozon pada muka bumi terbentuk oleh cahaya lampu ungu yang menguraikan molekul O_2 membentuk ion-ion oksigen (O^*). Unsur oksigen ini bergabung dengan molekul yang tidak terurai dan membentuk ozon (O_3). Ozon dapat terbentuk melalui dua proses yang berbeda, yaitu melalui proses tumbukan dan melalui proses penyerapan cahaya (Syafarudin & Novia, 2013).

Ozon dapat dibuat dengan melewati gas oksigen (O_2) pada daerah yang dikenai tegangan tinggi. Molekul oksigen (O_2) yang dikenai tegangan tinggi ini akan mengalami ionisasi yaitu proses terlepasnya suatu atom atau molekul dari ikatannya menjadi ion-ion oksigen (O^*). Molekul-molekul oksigen (O_2) yang

terionisasi ini biasa disebut dalam kondisi plasma. Dimana plasma adalah partikel gas bermuatan yang terdiri dari pembawa muatan atau biasa yang disebut dengan ion yang terdiri dari ion positif, ion negatif, elektron dan radikal bebas. Plasma juga biasa disebut dengan materi fase keempat setelah padat, cair dan gas. Jenis-jenis dari ion oksigen (O^*) adalah O^+ , O_2^+ , O^- , O^- dan O_3^- . Kombinasi dari kesemuanya dapat menghasilkan ozon (Syafarudin & Novia, 2013). Dibawah ini merupakan gambar dari perubahan bentuk susunan atom oksigen menjadi molekul ozon (O_3) :



Sumber: (Syafarudin & Novia, 2013)

Gambar 4. Pembentukan gas ozon melalui proses tumbukan

Ozon merupakan pengoksidasi terkuat kedua setelah flour, serta lebih kuat dibanding oksigen. Sifat pengoksidasi yang kuat ini ditunjukkan dengan potensial yang tinggi. Ozon sebagai oksidator kuat dapat mengoksidasi hampir semua senyawa. Dengan oksidasi potensial yang tinggi ozon dapat dimanfaatkan untuk membunuh bakteri (*sterilization*), menghilangkan warna (*decoloration*), menghilangkan bau (*deodorization*), dan menguraikan senyawa organik (*degradation*). Ozon membunuh bakteri dengan cara merusak dinding sel bakteri sekaligus menguraikan bakteri tersebut (Yusuf et al., 2008).

Produksi gas ozon dipengaruhi oleh waktu ozonasi, tegangan, dan laju alir udara. Semakin lama waktu ozonasi dan semakin besar tegangan yang digunakan, maka produksi gas ozon akan semakin banyak. Laju alir udara yang semakin besar menurunkan produksi ozon karena semakin banyak gas yang mengalir ke dalam tabung reaktor, sehingga mengurangi waktu interaksi molekul gas dengan lucutan plasma. Mekanisme ini didasarkan pada proses lucutan plasma yang menghasilkan energi tinggi untuk memecah molekul oksigen menjadi ozon (Anggraini, 2011).

Keamanan dan pemanfaatan pengolahan makanan dari ozon telah ditinjau oleh para ahli sejak tahun 1997 dan ozon diakui aman untuk digunakan dalam makanan dan pengolahan makanan (GRAS) (Cullen et al., 2009). Ozon sering disebut sebagai green technology atau teknologi ramah lingkungan, karena cepat terurai menjadi oksigen dan tidak meninggalkan residu (Castanha et al., 2017).

Ozon mengoksidasi asam lemak tak jenuh sehingga terjadi lisis (Shah et al., 2011). Ozon sebagai zat pengoksidasi mampu mengoksidasi gugus-gugus hidroksil pada posisi C-2, C-3, dan C-6 menjadi gugus karboksil dan karbonil pada pati sehingga dapat meningkatkan sifat fisik pati (Chan et al., 2009).

Proses oksidasi pati menggunakan ozon (O_3) bertujuan memberikan viskositas yang lebih rendah, sifat pengikatan yang lebih baik dan stabilitas, menghindari retrogradasi dan kecenderungan gel untuk properti memasak yang lebih baik dan kemampuan penyimpanan produk makanan (Gozé et al., 2017).

Hasil penelitian Chan et al. (2009) menyatakan bahwa oksidasi menggunakan ozon menghasilkan lebih banyak gugus karbonil daripada gugus karboksil dalam rantai amilosa dan amilopektin. Terbentuknya gugus karboksil pada pati mampu meningkatkan daya kembang pada pati. Selanjutnya, bagian dari amilosa mengalami degradasi sehingga memungkinkan granula pati dapat menyerap air dan lebih mudah membengkak saat mengalami pemanasan (Chan et al., 2009).

2.5 Ozonisasi

Ozonisasi menjadi metode pengawetan yang efektif karena ozon mampu mendegradasi senyawa-senyawa organik, menghilangkan warna, bau, dan rasa serta ramah lingkungan karena sebelum atau setelah bereaksi dengan unsur lain, ozon akan menghasilkan oksigen (Zahro et al., 2025)



Sumber: Dokumentasi Pribadi

Gambar 5. Ozon Chamber

Prinsip kerja proses ozonisasi pada alat plasma chamber didasarkan pada pembentukan gas ozon (O_3) melalui teknologi plasma dingin (*cold plasma*) atau lucutan listrik bertegangan tinggi. Udara bebas dari lingkungan dihisap masuk ke unit pembangkit ozon, kemudian dialirkan menuju reaktor plasma. Di dalam reaktor tersebut terjadi pelepasan muatan listrik yang menghasilkan energi tinggi sehingga molekul oksigen (O_2) terpecah menjadi atom oksigen bebas ($O\bullet$). Atom oksigen ini kemudian bereaksi kembali dengan molekul oksigen lain membentuk ozon (O_3). Gas ozon yang terbentuk selanjutnya dialirkan ke dalam ruang chamber tertutup dan disirkulasikan secara merata menggunakan kipas internal sehingga seluruh permukaan bahan pangan terkena paparan ozon secara homogen (Hartoyo & Rachma, 2022; Paten Sikomobuas, 2021).

Perhitungan konsentrasi ozon pada alat ozon chamber dilakukan menggunakan sensor ozon yang dipasang di dalam chamber. Sensor membaca kadar ozon dalam satuan ppm (*parts per million*) di udara chamber, lalu mengubahnya menjadi sinyal listrik yang dikirim ke mikrokontroler. Mikrokontroler membandingkan konsentrasi aktual dengan nilai acuan (*set point*), kemudian selisih keduanya (*error*) digunakan untuk mengatur intensitas kerja reaktor plasma. Jika konsentrasi masih di bawah target, sistem akan meningkatkan produksi ozon, sedangkan jika melebihi target, daya reaktor dikurangi atau

dihentikan sementara hingga kembali sesuai nilai acuan. Berdasarkan paten alat tersebut, konsentrasi ozon dapat dipertahankan dalam rentang toleransi $\pm 5\%$ dari *set point*. Konsentrasi ozon ditentukan berdasarkan kadar gas di udara chamber, bukan langsung dari berat sampel. Namun, jumlah bahan tetap memengaruhi proses karena semakin banyak sampel maka ruang udara berkurang, aliran ozon terhambat, dan ozon lebih cepat terurai. Oleh karena itu, kapasitas pengisian chamber perlu disesuaikan agar sirkulasi ozon dan paparan gas tetap merata. (Paten Sikomobuas, 2021).

Ozon (O_3) bersifat tidak stabil dan mudah terurai menjadi oksigen (O_2), terutama pada suhu tinggi, kelembapan tinggi, dan saat bereaksi dengan permukaan bahan organik, maka konsentrasi ozon akan terus menurun selama proses berlangsung. Maka gunakan kontrol tertutup (*closed-loop control*), dimana sensor ozon membaca kadar aktual setiap saat, kemudian mikrokontroler menghitung selisih dengan *set point*. Bila konsentrasi turun, reaktor plasma dinyalakan kembali atau daya ditingkatkan. Bila terlalu tinggi, pembangkit dihentikan sementara. Sistem seperti ini umum digunakan pada generator ozon industri dan ruang desinfeksi untuk menjaga konsentrasi stabil meskipun ozon terus terdekomposisi (Tanaka et al., 2022)

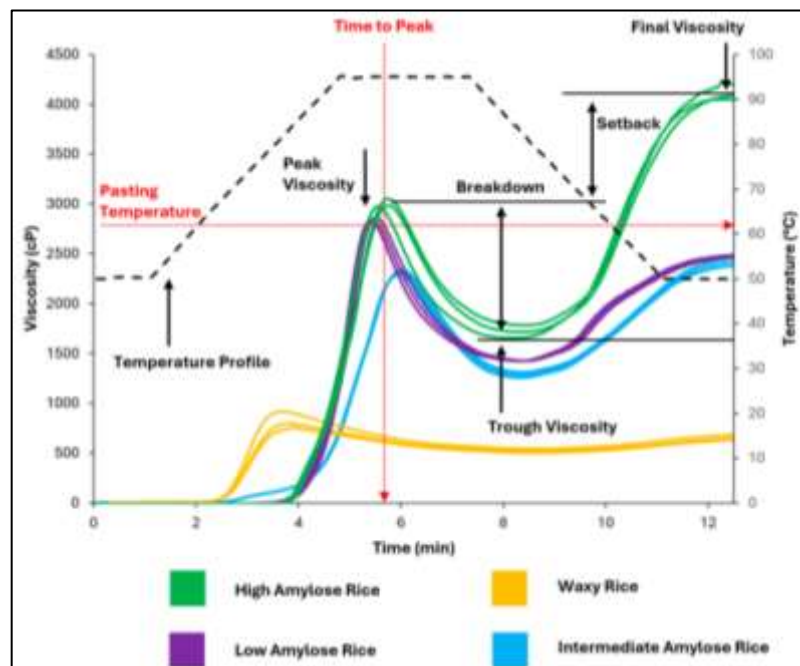
Dalam aplikasinya terhadap bahan pangan, konsentrasi ozon harus dikontrol secara tepat karena berpengaruh langsung terhadap efektivitas dan mutu produk. Konsentrasi terlalu rendah dapat tidak dapat memodifikasi struktur lapisan alueron dan bran, serta belum mampu untuk mempengaruhi kemampuan penyerapan air dan oksigen yang berpengaruh terhadap sifat pastingnya, sedangkan konsentrasi terlalu tinggi berpotensi memicu oksidasi berlebih pada lipid, pigmen, protein, maupun senyawa bioaktif bahan pangan. Oleh sebab itu, kombinasi antara konsentrasi ozon, lama paparan, suhu, kelembapan, dan volume chamber menjadi faktor penting dalam menentukan keberhasilan proses ozonisasi sebagai teknologi pengawetan modern yang aman dan ramah lingkungan (Cullen et al., 2009; Kaur, et al., 2022; Zahro et al., 2025)

2.6 Rapid Visco Analyzer (RVA)

Rapid Visco Analyzer (RVA) merupakan alat analisis yang banyak digunakan untuk mengukur sifat pasting, gelatinisasi, dan retrogradasi pati dalam bahan pangan seperti beras. RVA bekerja dengan mensimulasikan proses pemanasan dan pendinginan sampel pati dalam suspensi air, sehingga menghasilkan profil viskositas yang mencerminkan perubahan struktural pati. Teknik ini sangat penting dalam evaluasi kualitas beras karena dapat mendeteksi variasi kadar amilosa, suhu gelatinisasi, dan viskositas pasting yang memengaruhi tekstur nasi (Pang et al., 2016).

Pengukuran menggunakan RVA berfokus pada sifat fungsional pati, seperti kemampuan granula pati menyerap air, membengkak, serta membentuk gel selama pemanasan. Ketika pati dipanaskan bersama air, granula pati akan menyerap air dan mengalami pembengkakan yang menyebabkan viskositas meningkat. Perubahan ini menggambarkan proses yang juga terjadi pada pengolahan pangan seperti pembuatan roti, saus, maupun produk berbasis sereal lainnya. Selain itu, sifat pasting pati dapat dipengaruhi oleh faktor genetik, kondisi lingkungan, maupun proses pengolahan bahan pangan. Pada beras, perbedaan kandungan amilosa dan protein diketahui dapat memengaruhi karakteristik viskositas serta kualitas nasi yang dihasilkan (Shi et al., 2022).

RVA mengukur viskositas sampel selama mengalami siklus pemanasan dan pendinginan dengan memberikan gaya geser konstan pada suspensi sampel. Pengujian biasanya dimulai pada suhu sekitar 50°C, kemudian suhu dinaikkan hingga sekitar 95°C, dipertahankan selama beberapa waktu, dan selanjutnya didinginkan kembali. Selama proses ini, perubahan viskositas dicatat dan ditampilkan dalam bentuk kurva yang disebut viskogram. Kurva tersebut menunjukkan bagaimana granula pati mengalami pembengkakan, pecah, dan pembentukan gel selama pemanasan dan pendinginan. Dengan demikian, viskogram RVA memberikan gambaran yang jelas mengenai perilaku pati selama proses pengolahan panas (Nastasi et al., 2025).



Sumber: (Nastasi et al., 2025).

Gambar 6. *Profil Rapid Visco Analyser (RVA)*

Parameter-parameter dibawah ini dapat digunakan untuk memprediksi sifat tekstur dan kualitas produk pangan berbasis pati (Shi et al., 2022).

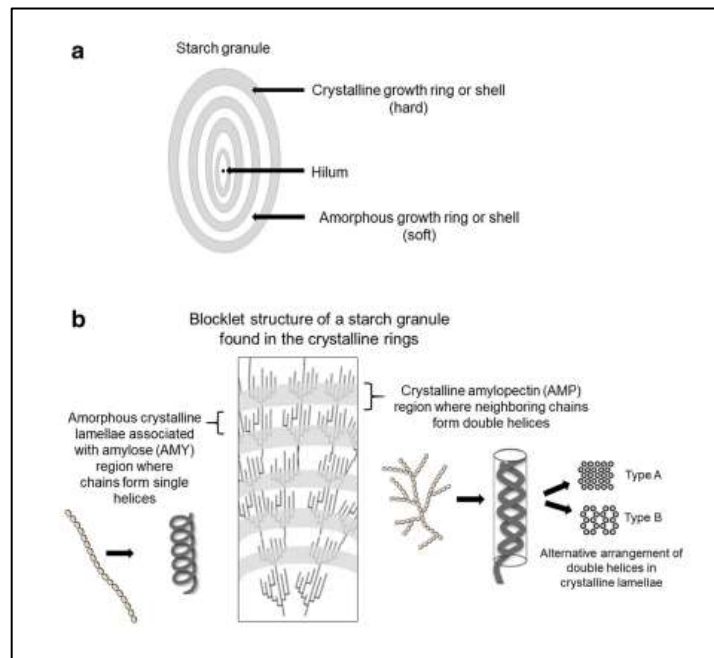
Tabel 5. Parameter *Rapid Visco Analyser (RVA)*

Parameter	Abvs.	Definisi	Arti
Pasting Temperature	PT, PTemp	Suhu saat sampel mulai mengental dan viskositas mulai meningkat. Parameter ini menandai awal proses gelatinisasi pati ketika granula pati mulai menyerap air, mengembang, dan mulai mengalami disrupti.	PT menunjukkan suhu gelatinisasi pati, yang penting untuk memahami kondisi pengolahan yang diperlukan pada produk berbasis pati.
Peak Viscosity	PV	Viskositas tertinggi yang dicapai selama fase pemanasan pada analisis	PV mencerminkan kapasitas maksimum granula pati dalam

Parameter	Abvs.	Definisi	Arti
		RVA. Hal ini terjadi ketika granula pati mengembang secara maksimal sebelum mulai mengalami kerusakan atau pecah.	menahan air serta tingkat pengembangannya. Parameter ini penting untuk menentukan potensi pengentalan pati dalam suatu produk.
Time to Peak	PTi, TTP, Tpeak	Waktu yang diperlukan untuk mencapai viskositas puncak selama proses analisis.	PTi memberikan informasi mengenai seberapa cepat pati mencapai viskositas maksimum, yang berguna untuk mengevaluasi waktu proses pengolahan.
Breakdown	BD, BVis, BKD	Selisih antara viskositas puncak (PV) dan viskositas lembah/minimum (TV). Parameter ini menunjukkan penurunan viskositas akibat kerusakan granula pati selama pemanasan dan gaya geser.	BD atau BKD menunjukkan stabilitas pati terhadap panas dan gaya geser. Nilai breakdown yang tinggi menunjukkan pati kurang stabil dan lebih mudah mengalami degradasi, yang dapat mempengaruhi tekstur dan viskositas produk pangan.
Trough / Minimum Viscosity	TV, Tmin, Trough, TH	Viskositas terendah setelah viskositas puncak selama periode penahanan suhu tinggi, yang menunjukkan titik ketika granula pati	TV atau TH memberikan gambaran mengenai tingkat kerusakan granula pati serta kemampuan pati dalam mempertahankan

Parameter	Abvs.	Definisi	Arti
		paling banyak mengalami kerusakan.	viskositas selama proses pengolahan.
Setback	SB, STB	Selisih antara viskositas akhir (FV) dan viskositas minimum (TV). Parameter ini mengukur peningkatan viskositas selama fase pendinginan ketika molekul pati mulai berasosiasi kembali dan membentuk struktur gel.	SB atau STB penting untuk memahami kecenderungan retrogradasi pati, yang berpengaruh terhadap tekstur, kekerasan, dan umur simpan produk berbasis pati.
Final Viscosity	FV	Viskositas pada akhir pengujian RVA selama fase pendinginan. Parameter ini mencerminkan viskositas gel pati setelah mengalami proses pemanasan dan kemudian pendinginan.	FV merupakan indikator penting dari tekstur akhir dan stabilitas produk berbasis pati seperti saus, gel, dan produk bakery, serta memberikan gambaran mengenai tingkat retrogradasi pati.

Sumber: (Nastasi et al., 2025).



Sumber: (Balet et al., 2019).

Gambar 7. Struktur Pati

Keterangan: (a) Skema struktur butiran pati, dengan daerah amorf dan kristalin yang berselang-seling. (b) Struktur butiran pati, yang ditemukan di daerah kristalin dan terdiri dari lamela amorf yang mewakili amilosa, serta struktur kristalin yang terkait dengan amilopektin.

Struktur pati sendiri terdiri dari granula semi-kristalin yang tersusun atas dua komponen utama, yaitu amilosa dan amilopektin. Amilopektin membentuk struktur kristalin yang memberikan kestabilan pada granula pati, sedangkan amilosa lebih banyak terdapat pada wilayah amorf yang mudah menyerap air. Struktur ini sangat memengaruhi perilaku pati selama pemanasan yang kemudian tercermin pada kurva viskogram RVA. Perubahan struktur pati akibat perlakuan tertentu, seperti ozonasi pada beras merah, dapat memengaruhi parameter viskositas yang dihasilkan oleh RVA. Oleh karena itu, analisis RVA dapat digunakan untuk mengevaluasi perubahan sifat fungsional pati akibat perlakuan teknologi pada bahan pangan (Balet et al., 2019).

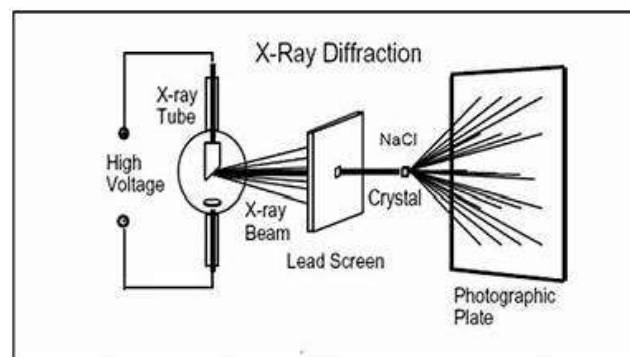
2.7 X-Ray Diffraction (XRD)



Gambar 8. *X-Ray Diffraction (XRD)*

X-Ray Diffraction (XRD) merupakan alat yang digunakan untuk mengkarakterisasi struktur kristal, ukuran kristal dari suatu bahan padat. Semua bahan yang mengandung kristal tertentu ketika dianalisa menggunakan XRD akan memunculkan puncak-puncak yang spesifik. Sehingga kelemahan alat ini tidak dapat untuk mengkarakterisasi bahan yang bersifat amorf (Ilham, 2020).

Difraksi sinar-x merupakan metode analisa yang memanfaatkan interaksi antara sinar-x dengan atom yang tersusun dalam sebuah sistem kristal. Struktur kristal merupakan susunan atom-atom atau kumpulan atom yang teratur dan berulang dalam ruang tiga dimensi. Keteraturan susunan tersebut disebabkan oleh kondisi geometris yang dipengaruhi oleh ikatan atom yang memiliki arah (Setiabudi et al., 2012).



Gambar 9. Skema prinsip kerja difraksi sinar-X (XRD).

Analisa XRD merupakan contoh analisa yang digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan suatu senyawa dengan mengamati pola pembiasan cahaya sebagai akibat dari berkas cahaya yang dibiaskan oleh material yang memiliki susunan atom pada kisi kristalnya. Secara sederhana, prinsip kerja dari XRD dapat dijelaskan sebagai berikut. Setiap senyawa terdiri dari susunan atom-atom yang membentuk bidang tertentu. Jika sebuah bidang memiliki bentuk yang tertentu, maka partikel cahaya (foton) yang datang dengan sudut tertentu hanya akan menghasilkan pola pantulan maupun pembiasan yang khas. Dengan kata lain, tidak mungkin foton yang datang dengan sudut tertentu pada sebuah bidang dengan bentuk tertentu akan menghasilkan pola pantulan ataupun pembiasan yang bermacam-macam. Sebagai gambaran, bayangan sebuah objek akan membentuk pola yang sama seandainya cahaya berasal dari sudut datang yang sama. Kekhasan pola difraksi yang tercipta inilah yang dijadikan landasan dalam analisa kualitatif untuk membedakan suatu senyawa dengan senyawa yang lain menggunakan instrumen XRD. Pola unik yang terbentuk untuk setiap difraksi cahaya pada suatu material seperti halnya fingerprint (sidik jari) yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi senyawa yang berbeda (Setiabudi et al., 2012).

Pada XRD, pola difraksi dinyatakan dengan besar sudut-sudut yang terbentuk sebagai hasil dari difraksi berkas cahaya oleh kristal pada material. Nilai sudut tersebut dinyatakan dalam 2θ , dimana θ merepresentasikan sudut datang cahaya. Sedangkan nilai 2θ merupakan besar sudut datang dengan sudut difraksi yang terdeteksi oleh detector (Setiabudi et al., 2012).

Teknik ini bersifat non-destruktif sehingga sampel tetap utuh setelah dianalisis. XRD dapat membedakan dengan jelas antara daerah kristalin dan daerah amorf. Daerah kristalin menghasilkan puncak tajam dan simetris pada grafik difraksi karena susunan molekul amilosa dan amilopektin yang teratur. Sebaliknya, daerah amorf menghasilkan latar belakang yang lebar dan tidak beraturan karena rantai pati saling acak (Ali et al., 2022).

XRD sangat efektif untuk mengidentifikasi fase kristal dan perubahan fase pada pati. Setiap mineral atau pati memiliki pola difraksi unik yang berfungsi sebagai sidik jari. Dengan membandingkan pola difraksi sampel sebelum dan

sesudah perlakuan, kita dapat mengetahui apakah terjadi transformasi fase dari kristalin menjadi lebih amorf. XRD juga dapat mengukur perubahan parameter kisi (lattice parameters) dan derajat kristalinitas secara akurat. XRD juga dapat digunakan untuk mengukur ukuran kristal pati. Prinsip yang digunakan adalah semakin kecil ukuran kristal, semakin lebar puncak difraksi yang dihasilkan (peak broadening) (Ali et al., 2022).

2.8 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) digunakan untuk mengamati morfologi bentuk dan ukuran granula pati baik pati alami maupun pati termodifikasi. SEM merupakan jenis mikroskop elektron yang menggunakan berkas elektron dalam menggambarkan bentuk permukaan dari suatu sampel (Novita et al., 2021).

Prinsipnya adalah sifat gelombang dari elektron yakni difraksi pada sudut yang sangat kecil. Elektron dihamburkan oleh sampel yang bermuatan (karena sifat listriknya). Jika sampel yang digunakan tidak bersifat konduktif, maka sampel terlebih dahulu harus dilapisi (*coating*) dengan emas. Citra yang terbentuk menunjukkan struktur dari sampel yang diuji (Amelia, 2016).



Gambar 10. Instrumen *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Prinsip dasar SEM adalah pemindaian permukaan sampel menggunakan berkas elektron berenergi tinggi yang dihasilkan dari sumber elektron dalam tabung mikroskop. Ketika berkas elektron tersebut mengenai permukaan sampel, akan

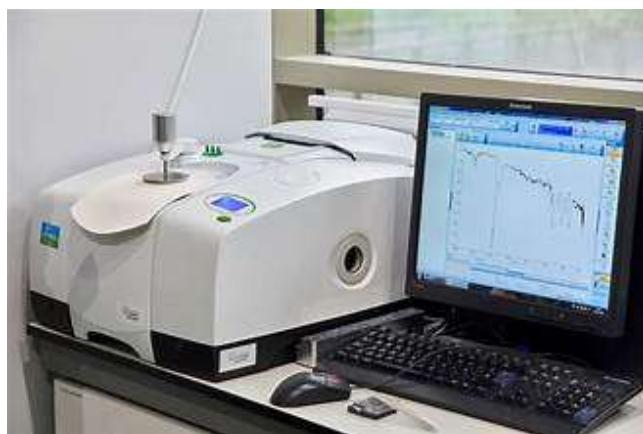
terjadi interaksi yang menghasilkan berbagai sinyal seperti elektron sekunder dan elektron pantul yang kemudian ditangkap oleh detektor untuk membentuk citra permukaan material. Karena panjang gelombang elektron jauh lebih pendek dibandingkan cahaya tampak, SEM mampu menghasilkan citra dengan resolusi yang jauh lebih tinggi dibandingkan mikroskop optik. Teknik ini banyak digunakan dalam penelitian material, biologi, maupun ilmu pangan untuk mempelajari struktur mikro suatu bahan (Banerjee et al., 2025).

SEM bekerja berdasarkan prinsip scan sinar elektron pada permukaan sampel, yang selanjutnya informasi yang didapatkan diubah menjadi gambar. Imajinasi mudahnya gambar yang didapat mirip sebagaimana gambar pada televisi. Pada SEM, gambar dibuat berdasarkan deteksi elektron baru (elektron sekunder) atau elektron pantul yang muncul dari permukaan sampel ketika permukaan sampel tersebut discan dengan sinar elektron. Elektron sekunder atau elektron pantul yang terdeteksi selanjutnya diperkuat sinyalnya, kemudian besar amplitudonya ditampilkan dalam gradasi gelap-terang pada layar monitor CRT (cathode ray tube). Di layar CRT inilah gambar struktur obyek yang sudah diperbesar bisa dilihat. Pada proses operasinya, SEM tidak memerlukan sampel yang ditipiskan, sehingga bisa digunakan untuk melihat obyek dari sudut pandang 3 dimensi. Dengan menggunakan scanning electron microscope maka dapat dilihat gambaran dari permukaan, susunan mineral, ukuran dan bentuk bulir dari suatu bahan atau batuan (Amelia, 2016).

Scanning Electron Microscopy (SEM) telah banyak digunakan untuk mengamati morfologi granula pati dan struktur mikro bahan pangan, termasuk beras dan hasil modifikasinya. Melalui SEM dapat diamati perubahan bentuk, ukuran, dan tekstur permukaan granula pati akibat perlakuan fisik maupun kimia. Hasil citra SEM yang menunjukkan adanya retakan, kerusakan permukaan, atau perubahan densitas granula sering kali dihubungkan dengan terjadinya oksidasi atau degradasi struktur akibat perlakuan teknologi seperti pengeringan, iradiasi, atau ozonisasi (Chen et al., 2003).

2.9 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) merupakan salah satu teknik spektroskopi yang banyak digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi dan struktur kimia suatu bahan melalui interaksi antara radiasi inframerah dengan molekul sampel. Prinsip dasar FTIR adalah penyerapan radiasi inframerah oleh molekul yang menyebabkan perubahan energi vibrasi pada ikatan kimia. Setiap jenis ikatan kimia memiliki frekuensi serapan yang khas sehingga menghasilkan spektrum yang spesifik bagi suatu senyawa. Oleh karena itu, FTIR sering digunakan untuk mengidentifikasi komposisi kimia bahan pangan maupun biomaterial seperti pati. Teknik ini juga memungkinkan analisis cepat dan relatif sederhana tanpa memerlukan perlakuan sampel yang kompleks (Wei et al., 2021).



Gambar 11. Instrumen *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

Spektrum yang dihasilkan berupa grafik hubungan antara bilangan gelombang (cm^{-1}) dengan intensitas absorbansi atau transmitansi. Spektrum ini memberikan informasi mengenai jenis gugus fungsi yang terdapat dalam sampel berdasarkan posisi puncak serapan yang muncul pada spektrum tersebut (Ishikawa et al., 2021).

Interpretasi hasil analisis FTIR dilakukan dengan mengamati posisi dan intensitas puncak serapan pada spektrum inframerah. Setiap gugus fungsi memiliki daerah serapan khas, misalnya gugus hidroksil (O–H) biasanya muncul pada daerah sekitar $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$, sedangkan gugus karbonil (C=O) muncul pada kisaran

1700 cm^{-1} . Pada bahan pangan yang kaya pati, daerah spektrum antara 1200–900 cm^{-1} sering dikaitkan dengan getaran ikatan C–O dan C–O–C dari struktur polisakarida. Perubahan intensitas atau pergeseran puncak pada daerah tersebut dapat menunjukkan adanya perubahan struktur kimia atau interaksi antar molekul dalam pati. Dengan demikian, analisis FTIR tidak hanya digunakan untuk identifikasi gugus fungsi, tetapi juga untuk mempelajari perubahan struktur molekuler akibat perlakuan tertentu pada bahan pangan (Lončarić et al., 2026).

Tabel 6. Daerah Gugus Fungsi pada IR :

Ikatan	Tipe Senyawa	Daerah frekuensi (cm^{-1})	Intensitas
C - H	Alkana	2850 – 2970 1340 - 1470	Kuat Kuat
C - H	Alkena 	3010 - 3095 675 - 995	Sedang Kuat
C - H	Alkuna 	3300	Kuat
C - H	Cincin Aromatik	3010 – 3100 690 – 900	Sedang Kuat
O - H	Fenol, monomer alkohol, alkohol ikatan hidrogen, fenol	3590 – 3650 3200 – 3600	Berubah-ubah Berubah-ubah, terkadang melebar
	monomer asam karboksilat, ikatan hidrogen asam karboksilat	3500 – 3650 2500 – 2700	Sedang Melebar
N - H	Amina, Amida	3300 – 3500	Sedang
C=C	Alkena	1610 – 1680	Berubah-ubah
C=C	Cincin Aromatik	1500 – 1600	Berubah-ubah
C≡C	Alkuna	2100 – 2260	Berubah-ubah
C - N	Amina, Amida	1180 – 1360	Kuat
C≡N	Nitril	2210 – 2280	Kuat
C - O	Alkohol, Eter, Asam Karboksilat, Ester	1050 – 1300	Kuat
C=O	Aldehid, Keton, Asam Karboksilat, Ester	1690 – 1760	Kuat
NO ₂	Senyawa Nitro	1500 – 1570 1300 - 1370	Kuat Kuat

Sumber : *Principle of Instrumental Analysis*, Skoog, Holler, Nieman, 1998.

FTIR sering digunakan untuk mengevaluasi struktur molekul dan perubahan ikatan hidrogen selama proses seperti gelatinisasi atau retrogradasi pati. Studi menunjukkan bahwa rasio puncak serapan tertentu berkaitan dengan tingkat kristalinitas atau keteraturan struktur molekul dalam granula pati. Semakin tinggi rasio tersebut, semakin tinggi pula tingkat keteraturan struktur kristalin dalam pati. Analisis ini membantu memahami perubahan struktur pati selama penyimpanan atau pengolahan bahan pangan (Lu et al., 2021).

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

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

3.1 Bahan dan Alat

3.1.1 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam proses penelitian ini antara lain yaitu sampel beras merah varietas Inpari 24, 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, H₂SO₄ pekat, 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, KBr, silikon (Si) sebagai bahan kalibrasi alat XRD.

3.1.2 Alat

Alat yang digunakan yaitu *Ozon Chamber*, Timbangan, Cawan, Desikator, Tang krus, Oven, Tanur, Erlenmeyer 500 mL, Gelas ukur (50 mL, 100 mL, 25 mL), Pemanas, Termometer, Pipet volume (10 mL), Labu takar 500 mL, Buret, Statif dan klem, refluks, Corong, Gelas Kimia, Bunsen, Klem dan Statif, Batu Didih, Labu Erlenmeyer (100 mL, 250 mL, 300 mL), Kertas Saring, Labu Vakum, labu ukur 100 mL, alat Spektrofotometer Shimadzu 4300 FT-IR, Spektrofotometer UV-Vis, kuvet, mikropipet, Gelas beker, Tabung reaksi, dan pH meter, *X-Ray Diffractometer*, komputer dengan software pengolah data XRD, dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM).

3.2 Metode Penelitian

3.2.1 Penelitian Utama

Pada penelitian utama ini beras merah pecah kulit varietas Inpari 24 dilakukan analisis pada 5 taraf konsentrasi ozon yaitu 0, 2, 4, 6, 8 ppm menggunakan ozon *generator* dengan kapasitas 150 gram per tray untuk menjamin keseragaman paparan ozon dengan waktu paparan ozon selama 30 menit setiap konsentrasinya. Pengujian setiap respon yang terdiri dari respon fisik yaitu analisis struktur kristalin pati menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan analisis morfologi permukaan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM), dan analisis profil gelatinisasi pati menggunakan *Rapid Visco Analyzer* (RVA).

Pada respon kimia pengujian terdiri dari kadar air, kadar pati, kadar antosianin, Aw meter, dan analisis profil gugus fungsi menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR).

3.2.1.1 Rancangan Perlakuan

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

a1= 0 ppm

a2= 2 ppm

a3= 4 ppm

a4= 6 ppm

a5= 8 ppm

Rancangan percobaan ini diterapkan pada parameter penelitian yang menghasilkan data kuantitatif berupa nilai numerik. Data yang diperoleh dianalisis menggunakan sidik ragam (ANAVA). Apabila hasil analisis menunjukkan pengaruh nyata antar perlakuan, maka dilanjutkan dengan uji Duncan pada taraf 5%.

Sedangkan parameter penelitian yang menghasilkan data berupa citra, spektrum, dan profil pola dianalisis secara deskriptif komparatif sebagai data pendukung untuk menjelaskan perubahan karakteristik beras merah pecah kulit akibat perlakuan ozon.

3.2.1.2 Rancangan Percobaan

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

Model percobaan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

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

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 7. Rancangan Percobaan Faktorial

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

Berdasarkan rancangan diatas dapat dibuat denah (*lay out*) percobaan faktorial dengan 3 kali ulangan sebagai berikut:

Tabel 8. Kelompok Ulangan Rancangan Percobaan

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

3.2.1.3 Rancangan Analisis

Berdasarkan rancangan percobaan di atas, maka dapat dibuat analisis variansi (ANAVA) untuk mendapatkan kesimpulan mengenai pengaruh perlakuan terhadap respon seperti yang dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 9. Analisis Variansi Konsentrasi Ozon terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Beras Merah 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	(t-1)(r-1)	JKG	KTG	-	-
Total	(rt)-1	JKT	-	-	-

(Sumber: Gaspersz, 1995)

Keterangan:

r = Replikasi (ulangan)

t = Konsentrasi Ozon

Berdasarkan Tabel 3 diatas, Analisis Variansi (ANAVA), selanjutnya dapat ditentukan daerah penolakan hipotesis, yaitu:

1. Hipotesis ditolak, jika $F \text{ hitung} \leq F \text{ tabel}$ pada taraf 5% maka konsentrasi ozon tidak berpengaruh terhadap karakteristik beras merah pecah kulit masing-masing pada perlakuan pada taraf 5%
2. Hipotesis diterima, jika $F \text{ hitung} > F \text{ tabel}$ pada taraf nyata 5% maka konsentrasi ozon berpengaruh nyata terhadap karakteristik beras merah pecah kulit, 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 merah pecah kulit terdiri dari respon fisik dan respon kimia:

A. Parameter Pengamatan yang Dianalisis Secara Statistik

a. Respon Kimia

Analisis respon kimia terhadap beras merah pecah kulit yaitu uji kadar air menggunakan metode gravimetri, kadar pati menggunakan metode *Luff SchoorI*, kadar antosianin menggunakan metode pH *Differential*, dan analisis aktivitas air (Aw) menggunakan Aw Meter.

b. Respon Fisik

Analisis profil gelatinisasi pati menggunakan *Rapid Visco Analyzer* (RVA)

B. Parameter Pengamatan yang Dianalisis Secara Deskriptif

a. Respon Fisik

analisis struktur kristalin pati menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan analisis morfologi permukaan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM).

b. Respon Kimia

Analisis profil gugus fungsi menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR).

3.2.2 Penentuan Perlakuan Terbaik Metode De Garmo

Penentuan perlakuan terbaik pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode *De Garmo*. Metode ini merupakan salah satu metode pengambilan keputusan yang digunakan untuk memilih alternatif terbaik berdasarkan beberapa parameter atau kriteria yang telah ditetapkan (Muzaqi dan Wahyuni, 2015). Setiap parameter diberikan bobot sesuai dengan tingkat kepentingannya menggunakan nilai relatif pada rentang 0–1. Bobot yang telah ditentukan kemudian dinormalisasi sehingga mencerminkan kontribusi masing-masing parameter terhadap penilaian akhir. Selanjutnya, dilakukan perhitungan nilai efektivitas untuk setiap perlakuan pada masing-masing parameter. Tahap terakhir adalah menghitung nilai hasil (overall score) dengan mengombinasikan bobot normal dan nilai efektivitas. Perlakuan yang memperoleh nilai hasil tertinggi ditetapkan sebagai perlakuan terbaik. Adapun rumus yang digunakan dalam metode *De Garmo* meliputi perhitungan bobot normal, nilai efektivitas, dan nilai hasil.

Prosedur penentuan penelitian sebagai berikut:

1. Variabel diurutkan berdasarkan prioritas dan kontribusi terhadap hasil
2. Memberikan bobot nilai (BV) pada masing – masing variabel sesuai dengan kontribusinya dengan angka relative 0 – 1
3. Menentukan bobot normal (BN) dengan membagi BV dengan jumlah semua bobot variable
4. Mengelompokkan variabel – variabel yang dianalisis menjadi 2 kelompok yaitu (a) variabel yang semakin besar reratanya semakin baik (b) variabel yang semakin kecil reratanya semakin jelek
5. Menentukan Nilai Efektivitas (ne) yaitu :

$$Ne = \frac{\text{Nilai Perlakuan} - \text{nilai terendah}}{\text{Nilai tertinggi} - \text{nilai terendah}}$$

Nilai hasil = Ne x Bobot Normal

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan meliputi beberapa tahapan sebagai berikut:

1. Sortasi dan Pembersihan

Sortasi dan pembersihan untuk memisahkan kotoran, batu kecil, sekam, dan butiran beras yang rusak.

2. Proses Ozonisasi

Mengalirkan ozon gas dengan variasi konsentrasi 0, 2, 4, 6, dan 8 ppm selama 30 menit secara tidak langsung (*indirect*) pada sampel menggunakan gas oksigen (O₂) sebagai bahan baku pembentuk ozon.

3. Pengemasan Vakum

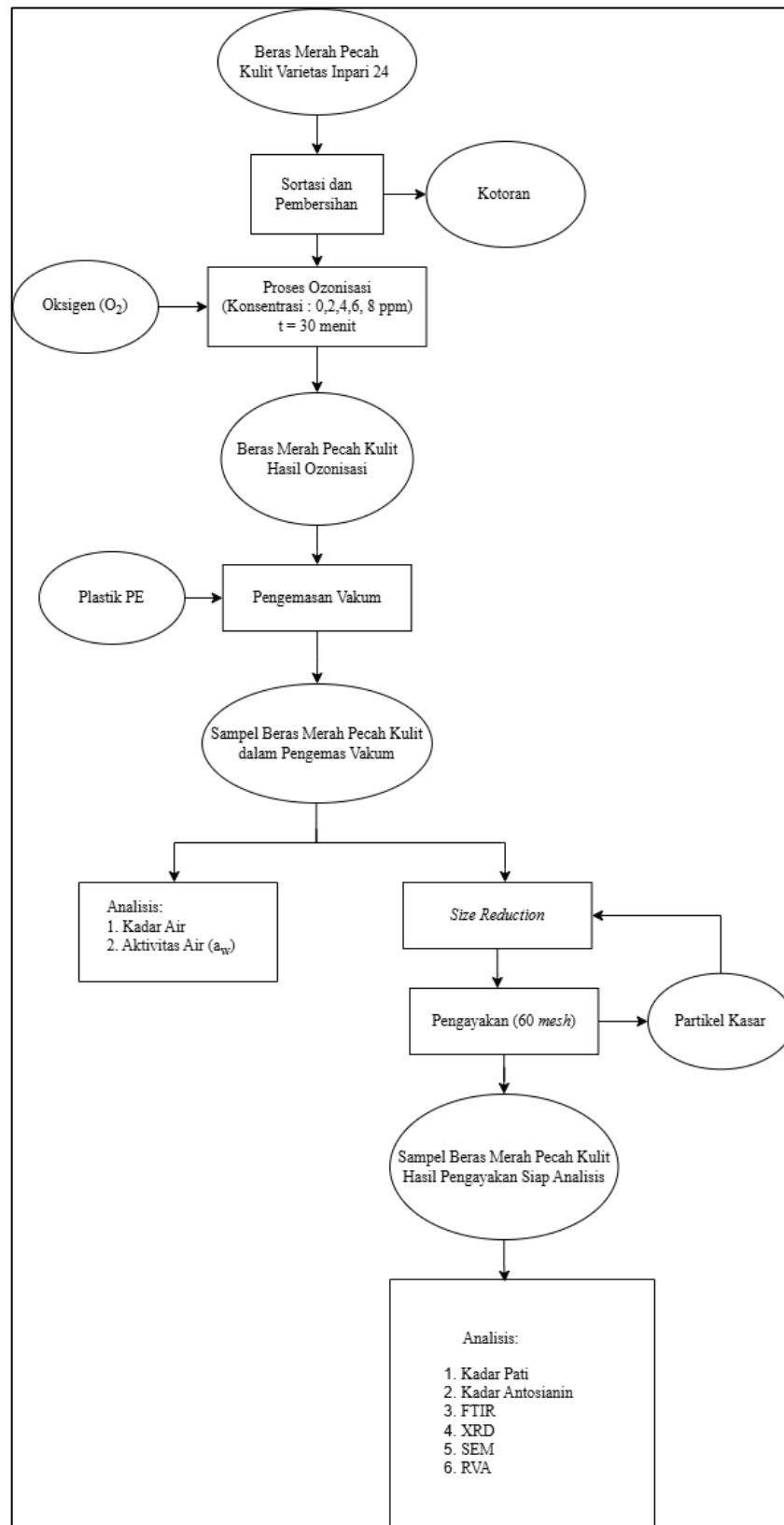
Sampel dikemas menggunakan plastik polyethylene (PE) melalui metode pengemasan vakum bertujuan mengurangi kandungan oksigen di dalam kemasan sehingga dapat meminimalkan oksidasi lanjutan, menghambat pertumbuhan mikroba, serta mempertahankan mutu sampel selama penyimpanan sebelum analisis dilakukan.

4. Analisis dengan Sampel Beras Utuh

Sampel beras merah pecah kulit yang telah diozonisasi dan disimpan dalam pengemas vakum dilanjut analisis Kadar Air dan Aktivitas Air terhadap beras berbentuk utuh,

5. Analisis dengan Sampel Setelah *Size Reduction*

Sampel beras merah pecah kulit yang telah diozonisasi dan disimpan dalam pengemas vakum digiling dan diayak dengan menggunakan *mesh* 60 hingga menjadi bentuk tepung agar homogen dan memudahkan pengujian. Tujuan tahap ini adalah memperbesar luas permukaan sampel dan menghasilkan partikel yang seragam. Terdiri dari analisis: Kadar Pati, Kadar Antosianin, FTIR, XRD, SEM, RVA.



Gambar 12. Diagram Alir Prosedur Penelitian

3.4 Jadwal Penelitian

Tabel 10. Rencana Jadwal Penelitian

No	Kegiatan	Januari 2026	Februari 2026	Maret 2026	April 2026	Mei 2026	Juni 2026	Juli 2026
1.	Penyusunan dan Bimbingan Proposal							
2.	Seminar Usulan Penelitian							
3.	Penelitian							
4	Pengolahan Data dan Penyusunan Tugas Akhir							
5.	Sidang Tugas Akhir							

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menguraikan mengenai: (4.1) Hasil Analisis Parameter yang Dianalisis Secara Statistik, (4.2) Hasil Analisis Parameter yang Dianalisis Secara Deskriptif

4.1 Hasil Analisis Parameter Pengamatan yang Dianalisis Secara Statistik

4.1.1 Analisis Kimia

Analisis kimia yang di analisis secara statistik meliputi uji kadar air metode gravimetri, kadar pati metode Luff Schoorl, aktivitas air (A_w) menggunakan A_w Meter, dan kadar antosianin metode pH *Differential*.

4.1.1.1 Analisis Kadar Air

Analisis kadar air dilakukan untuk mengetahui pengaruh perlakuan ozon terhadap kandungan air pada beras merah pecah kulit sebagai salah satu parameter mutu kimia beras. Pengujian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi kestabilan mutu beras setelah proses ozonisasi serta memastikan kadar air beras masih memenuhi standar mutu beras berdasarkan SNI 6128:2020 dengan kadar air maksimum sebesar 14%.

Berdasarkan hasil analisis Tabel ANAVA (Lampiran 11) menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon terhadap beras merah pecah kulit tidak berpengaruh nyata terhadap kadar air, dimana nilai F hitung lebih kecil dibandingkan F tabel 5% sehingga perlakuan dinyatakan tidak berbeda nyata.

Tabel 11. Hasil Penelitian Kadar Air

Konsentrasi Ozon	Rata-Rata
0 ppm (a1)	11,26 ^a ± 0,07
2 ppm (a2)	11,42 ^a ± 0,15
4 ppm (a3)	11,48 ^a ± 0,30
6 ppm (a4)	11,58 ^a ± 0,57
8 ppm (a5)	11,31 ^a ± 0,06

Keterangan: Tidak berpengaruh nyata ditandai dengan huruf notasi yang sama

Berdasarkan Tabel 11, nilai kadar air sampel kontrol (tanpa perlakuan ozon) tercatat sebesar 11,26%. Seiring dengan meningkatnya konsentrasi ozon dari 0 ppm hingga 8 ppm, rata-rata kadar air beras merah pecah kulit menunjukkan sedikit variasi, dengan nilai berkisar antara 11,25% hingga 11,58%. Meskipun terdapat variasi antar perlakuan, semua nilai kadar air yang diamati masih berada di bawah batas maksimum yang ditetapkan SNI 6128:2020, sehingga mutu beras merah pecah kulit berdasarkan parameter kadar air masih memenuhi persyaratan mutu beras.

Hal ini didukung oleh (Shah et al., 2015) yang melaporkan bahwa perlakuan ozon pada beras putih mentah dengan konsentrasi 0,1–0,4 ppm tidak menyebabkan perubahan yang signifikan terhadap kadar air ($P > 0,05$). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa ozon lebih berpengaruh terhadap karakteristik lain, seperti warna dan pH, sedangkan kadar air cenderung tetap stabil setelah proses ozonisasi.

Tidak berubahnya kadar air secara nyata diduga karena ozon bekerja sebagai oksidator kuat yang terutama bereaksi dengan senyawa organik pada permukaan bahan, seperti lipid, protein, pigmen, dan mikroorganisme, tanpa mempengaruhi kandungan air yang terikat dalam matriks beras. Selain itu, perubahan kadar air selama proses ozonisasi lebih dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan sifat fisik bahan dibandingkan oleh konsentrasi ozon yang diberikan (Rodarte Sanchez et al., 2025). Oleh karena itu, peningkatan konsentrasi ozon pada penelitian ini tidak menyebabkan perubahan kadar air yang signifikan pada beras merah pecah kulit

4.1.1.2 Analisis Kadar Pati

Analisis kadar pati dilakukan untuk mengetahui pengaruh perlakuan ozon terhadap kandungan pati beras merah pecah kulit sebagai komponen utama penyusun endosperma beras. Pati merupakan polisakarida yang tersusun atas dua fraksi utama, yaitu amilosa dan amilopektin. Amilosa memiliki struktur rantai lurus yang didominasi oleh ikatan α -(1→4), sedangkan amilopektin mempunyai struktur bercabang melalui ikatan α -(1→6). Perbedaan struktur kedua komponen tersebut menentukan sifat fisikokimia pati, seperti kemampuan menyerap air, gelatinisasi,

viskositas, retrogradasi, serta karakteristik tekstur produk pangan (Lang et al., 2025).

Tabel 12. Hasil Penelitian Kadar Pati

Konsentrasi Ozon	Rata-Rata
0 ppm (a1)	65,82 ^d $\pm$ 0,65
2 ppm (a2)	62,66 ^c $\pm$ 0,54
4 ppm (a3)	58,89 ^b $\pm$ 0,74
6 ppm (a4)	55,78 ^a $\pm$ 0,69
8 ppm (a5)	57,21 ^{ab} $\pm$ 1.32

Keterangan: Nilai yang ditandai dengan huruf yang berbeda menunjukkan berbeda nyata pada taraf 5% menurut Uji Lanjut Duncan

Berdasarkan hasil analisis ragam (Lampiran 12), perlakuan konsentrasi ozon memberikan pengaruh nyata ($p < 0,05$) terhadap kadar pati beras merah pecah kulit. Hasil uji lanjut Duncan menunjukkan bahwa hampir seluruh perlakuan memberikan perbedaan nyata terhadap kadar pati. Nilai kadar pati mengalami kecenderungan menurun dari 65,82% pada perlakuan tanpa ozon (0 ppm) menjadi 62,66% pada perlakuan 2 ppm, kemudian menurun kembali menjadi 58,89% pada perlakuan 4 ppm dan mencapai nilai terendah sebesar 55,78% pada perlakuan 6 ppm. Pada perlakuan 8 ppm terjadi sedikit peningkatan menjadi 57,21%, namun nilainya masih lebih rendah dibandingkan perlakuan kontrol. Secara umum, hasil tersebut menunjukkan bahwa perlakuan ozon mampu menurunkan kadar pati beras merah pecah kulit, meskipun respons yang dihasilkan tidak sepenuhnya bersifat linier.

Kadar pati beras merah pecah kulit pada penelitian ini berada pada kisaran 55,78–65,82%. Nilai tersebut masih berada dalam rentang kadar pati beras merah yang dilaporkan oleh Farooq & Yu (2025) yaitu sekitar 60–75%. Perbedaan nilai kadar pati antar varietas beras dapat dipengaruhi oleh faktor genetik, kandungan amilosa dan amilopektin, serta keberadaan komponen penyusun lainnya seperti protein, lipid, dan serat pangan. Pada penelitian ini, penurunan kadar pati terutama

terjadi akibat adanya perlakuan ozon yang menyebabkan modifikasi kimia terhadap struktur pati.

Pada penelitian ini penentuan kadar pati menggunakan metode Luff-Schoorl yang bekerja berdasarkan prinsip hidrolisis lengkap pati menjadi gula pereduksi (terutama glukosa), dilanjutkan dengan pengukuran jumlah gula pereduksi melalui reaksi dengan reagen tembaga, lalu dikonversi kembali menjadi kadar pati. Dengan demikian, nilai yang diperoleh mencerminkan ekuivalen unit glukosa yang berhasil dihidrolisis dan terdeteksi sebagai gula pereduksi.

Penurunan kadar pati yang telah terlihat pada perlakuan 2 ppm menunjukkan bahwa ozon mulai bereaksi dengan molekul pati meskipun pada tingkat oksidasi yang relatif rendah. Ozon sebagai oksidator kuat bereaksi dengan molekul pati melalui dua mekanisme utama. Pertama, ozon memutus ikatan glikosidik α -(1 $\rightarrow$ 4) dan α -(1 $\rightarrow$ 6) pada rantai amilosa dan amilopektin sehingga terjadi depolimerisasi dan terbentuk fragmen rantai yang lebih pendek. Kedua, ozon mengoksidasi gugus hidroksil (-OH) yang terdapat pada unit anhidroglukosa, khususnya pada posisi C-2 dan C-3, menjadi gugus karbonil (-C=O) dan selanjutnya dapat berlanjut menjadi gugus karboksil (-COOH) (Chan et al., 2009; He et al., 2023; Sumardiono et al., 2021).

Akibat pembentukan gugus karbonil dan karboksil, sebagian unit glukosa dalam rantai pati mengalami perubahan struktur dan tidak lagi merupakan unit glukosa murni. Ketika pati yang telah teroksidasi dihidrolisis dalam prosedur Luff-Schoorl, produk hidrolisis yang dihasilkan bukan sepenuhnya glukosa, melainkan campuran senyawa gula yang telah dimodifikasi. Perubahan struktur tersebut memengaruhi kemampuan senyawa hasil hidrolisis dalam mereduksi ion tembaga (Cu^{2+}) pada reagen Luff. Pada prinsipnya, gula pereduksi mereduksi Cu^{2+} menjadi Cu^+ melalui gugus karbonil bebas (aldehida) yang terbentuk pada bentuk rantai terbuka. Namun, apabila sebagian unit glukosa telah mengalami oksidasi lebih lanjut menjadi gugus karboksil atau mengalami modifikasi struktur akibat oksidasi, kemampuan senyawa tersebut untuk mendonorkan elektron menjadi berkurang atau bahkan hilang. Akibatnya, jumlah ion Cu^{2+} yang direduksi menjadi Cu^+ lebih sedikit dibandingkan apabila seluruh produk hidrolisis berupa glukosa utuh. Karena

perhitungan kadar pati pada metode Luff-Schoorl didasarkan pada jumlah gula pereduksi yang dinyatakan sebagai ekuivalen glukosa, berkurangnya kemampuan reduksi tersebut menyebabkan nilai kadar pati yang terukur menjadi lebih rendah (Maqbool et al., 2024; Pratiwi et al., 2019).

Penurunan kadar pati semakin nyata pada perlakuan 4 ppm hingga mencapai nilai terendah pada perlakuan 6 ppm. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi ozon meningkatkan intensitas reaksi oksidasi terhadap molekul pati. Semakin tinggi konsentrasi ozon, semakin banyak gugus hidroksil yang mengalami oksidasi sehingga pemutusan ikatan α -(1 $\rightarrow$ 4) dan α -(1 $\rightarrow$ 6) glikosidik pada molekul amilosa maupun amilopektin berlangsung lebih intensif. Pada perlakuan 8 ppm ada sedikit peningkatan dibandingkan 6 ppm, namun nilainya masih rendah dibandingkan control. Hal tersebut menunjukkan bahwa respons pati terhadap perlakuan ozon tidak sepenuhnya linier. Variasi tersebut diduga berkaitan dengan kompleksitas proses oksidasi pati yang dipengaruhi oleh struktur granula, daerah amorf dan kristalin, serta kondisi reaksi ozonisasi. Secara umum, perlakuan ozon tetap menunjukkan kecenderungan menurunkan kadar pati melalui proses oksidasi dan depolimerisasi.

Penurunan kadar pati juga dapat dikaitkan dengan perubahan sifat pemastan berdasarkan analisis RVA. Pati dengan struktur molekul yang lebih pendek akibat oksidasi cenderung memiliki kemampuan pembentukan viskositas yang berbeda dibandingkan pati alami. Modifikasi struktur pati akibat ozon dapat menyebabkan perubahan kemampuan granula dalam menyerap air, mengembang, dan mempertahankan struktur selama proses pemanasan. Ozonisasi diketahui dapat mempengaruhi sifat reologi pati melalui perubahan struktur molekul, termasuk perubahan viskositas dan karakteristik gelatinisasi (Khan et al., 2019).

4.1.2.3. Analisis Aktivitas Air (a_w)

Aktivitas air (a_w) merupakan parameter penting dalam menilai kestabilan dan keamanan pangan, khususnya pada beras merah pecah kulit yang masih mempertahankan lapisan bran kaya nutrisi dan lemak. Aktivitas air merupakan parameter yang menggambarkan jumlah air bebas (*free water*) yang tersedia di

dalam bahan pangan. Berbeda dengan kadar air yang menunjukkan jumlah total air, nilai a_w lebih mencerminkan mobilitas air dan kemampuannya untuk berinteraksi dengan komponen penyusun bahan, seperti pati, protein, dan senyawa fenolik. Oleh karena itu, perubahan nilai a_w dapat digunakan sebagai indikator kestabilan sifat fisikokimia bahan setelah suatu perlakuan (Rodarte Sanchez et al., 2025).

Berdasarkan pada hasil penelitian data ANAVA pada (Lampiran 13) menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi ozon tidak berpengaruh nyata terhadap nilai a_w pada beras merah pecah kulit ditandai dengan $F_{hitung} < F_{tabel}$ 5%.

Tabel 13. Hasil Penelitian Analisis Aktivitas air (a_w)

Konsentrasi Ozon	Rata-Rata
0 ppm (a1)	$0,762^a \pm 0,02$
2 ppm (a2)	$0,754^a \pm 0,03$
4 ppm (a3)	$0,744^a \pm 0,02$
6 ppm (a4)	$0,742^a \pm 0,02$
8 ppm (a5)	$0,758^a \pm 0,03$

Keterangan: Tidak berpengaruh nyata ditandai dengan huruf notasi yang sama

Berdasarkan hasil penelitian, nilai rata-rata aktivitas air (a_w) beras merah pecah kulit pada kontrol (0 ppm) sebesar 0,762, kemudian menurun menjadi 0,754 pada perlakuan ozon 2 ppm, 0,744 pada 4 ppm, dan 0,742 pada 6 ppm. Pada perlakuan 8 ppm, nilai a_w sedikit meningkat menjadi 0,758. Secara umum, hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi ozon hingga 6 ppm cenderung menurunkan nilai a_w , sedangkan pada konsentrasi 8 ppm terjadi sedikit kenaikan. Namun, perubahan tersebut relatif kecil sehingga menunjukkan bahwa aktivitas air beras merah pecah kulit tetap berada pada kisaran yang stabil setelah perlakuan ozon.

Tidak adanya perubahan aktivitas air yang signifikan diduga karena ozon sebagai oksidator kuat lebih banyak bereaksi dengan komponen organik, seperti pati, protein, lipid, dan senyawa bioaktif, dibandingkan dengan air yang terdapat di dalam matriks bahan. Aktivitas air lebih dipengaruhi oleh kekuatan ikatan air dengan komponen penyusun bahan, kelembapan lingkungan, suhu, serta struktur matriks pangan dibandingkan oleh perlakuan ozon itu sendiri (Labuza & Altunakar,

2007). Pada bahan pangan berkadar air rendah seperti beras, ozon (O_3) yang bereaksi dengan air hanya menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet OH$) dalam jumlah terbatas sehingga tidak menyebabkan perubahan yang berarti terhadap keseimbangan air bebas maupun air terikat. Selain itu, ozon lebih cenderung terdekomposisi menjadi oksigen daripada menyebabkan evaporasi ataupun perubahan ikatan hidrogen yang signifikan (Shah et al., 2015; (Sarron et al., 2021)).

Oleh karena itu, perlakuan ozon pada penelitian ini tidak menyebabkan perubahan aktivitas air yang nyata meskipun mampu memodifikasi komponen kimia lainnya, seperti pati. Mengingat sampel yang digunakan telah mengalami penyimpanan sebelum analisis, kenaikan kecil tersebut diduga merupakan bentuk penyesuaian kadar air bebas terhadap kondisi lingkungan hingga mencapai keseimbangan kelembapan (*equilibrium moisture*), bukan menunjukkan perubahan sifat fisik yang drastis. Liu et al. (2021) menjelaskan bahwa selama penyimpanan, aktivitas air bahan akan menyesuaikan dengan kelembapan relatif lingkungan sehingga dapat mengalami fluktuasi meskipun perubahan komposisi bahan sangat kecil.

Hasil penelitian ini sejalan dengan hasil analisis kadar air yang juga menunjukkan tidak adanya perbedaan nyata antar perlakuan. Kadar air dan aktivitas air merupakan parameter yang saling berkaitan, tetapi keduanya tidak menunjukkan hubungan yang bersifat linier. Kadar air menggambarkan jumlah air total dalam bahan, sedangkan aktivitas air menggambarkan fraksi air bebas yang tersedia untuk reaksi kimia maupun pertumbuhan mikroorganisme (Karuppuchamy et al., 2024). Oleh karena itu, kadar air yang relatif konstan pada seluruh perlakuan mendukung kestabilan nilai aktivitas air, sehingga ozonisasi hingga konsentrasi 8 ppm tidak menyebabkan perubahan keseimbangan air dalam beras merah pecah kulit.

Secara mikrobiologis, nilai aktivitas air pada penelitian ini masih berada pada kisaran 0,74–0,76, yaitu lebih rendah dibandingkan batas minimum pertumbuhan sebagian besar bakteri patogen yang umumnya memerlukan aktivitas air di atas 0,90. Namun demikian, beberapa kapang dan khamir masih dapat tumbuh pada aktivitas air yang lebih rendah. Oleh karena itu, meskipun perlakuan ozon tidak menurunkan aktivitas air secara nyata, nilai aktivitas air yang relatif rendah tetap

memberikan keuntungan dalam menjaga stabilitas penyimpanan beras merah pecah kulit apabila didukung oleh kondisi penyimpanan yang sesuai (Rifna et al., 2022)

4.1.2.4 Analisis Kadar Antosianin

Antosianin merupakan salah satu kelompok senyawa flavonoid yang memberi warna merah alami pada beras merah pecah kulit. Selain berperan sebagai pigmen, antosianin juga dikenal sebagai antioksidan kuat yang dapat membantu melindungi tubuh dari kerusakan akibat radikal bebas. Pada beras merah, sebagian besar antosianin terkonsentrasi di lapisan luar biji (pericarp dan aleuron), sehingga perlakuan seperti ozonasi dapat memengaruhi kestabilan senyawa ini (Kaur et al., 2022). Antosianin yang terdapat pada beras merah pecah kulit didominasi oleh Sianidin-3-O-glukosida (C3G), diikuti oleh peonidin-3-glukosida, sedangkan senyawa lain seperti malvidin, sianidin diglukosida, dan sianidin-3-(6-O-p-cumaryl) glukosida terdapat dalam jumlah yang lebih rendah. Selain antosianin, beras merah juga mengandung proantosianidin yang berkontribusi terhadap pembentukan warna merah pada lapisan (Zhao et al., 2025). Oleh karena itu, perubahan kadar antosianin akibat perlakuan ozon pada penelitian ini diduga terutama mencerminkan perubahan pada fraksi sianidin-3-O-glukosida karena senyawa tersebut merupakan antosianin dominan pada beras merah.

Penelitian ini mengukur kadar antosianin total menggunakan metode pH-differential karena antosianin memiliki struktur cincin flavilium yang stabilitasnya sangat dipengaruhi oleh pH, suhu, cahaya, dan keberadaan oksidator. Prinsip pengukuran dengan metode *pH differential* mengandalkan perbedaan absorbansi antosianin pada pH 1,0 (bentuk flavylium kation yang berwarna merah) dan pH 4,5 (bentuk hemiketal yang tidak berwarna) (Lee et al., 2005). Metode ini spesifik, sensitif, dan telah banyak digunakan untuk sampel berbasis matriks biji-bijian berpigmen

Menurut Tabel Anava (Lampiran 14) menunjukkan bahwa konsentrasi ozon yang berbeda dapat berpengaruh nyata terhadap kadar antosianin pada beras merah pecah kulit pada taraf nyata 5%.

Tabel 14. Hasil Penelitian Kadar Antosianin

Konsentrasi Ozon	Rata-Rata (mg/100g)
0 ppm (a1)	34,18 ^b ± 1,95
2 ppm (a2)	45,14 ^c ± 2,97
4 ppm (a3)	49,56 ^c ± 5,15
6 ppm (a4)	21,70 ^a ± 2,75
8 ppm (a5)	35,31 ^b ± 2,14

Keterangan: Nilai yang ditandai dengan huruf yang berbeda menunjukkan berbeda nyata pada taraf 5% menurut Uji Lanjut Duncan

Hasil analisis kadar antosianin pada (Tabel 14) menunjukkan pola non-linear yang meningkat dari 34,18 mg/100 g pada kontrol, kemudian menjadi puncaknya 49,56 mg/100 g pada 4 ppm, lalu turun tajam menjadi 21,70 mg/100 g pada 6 ppm, sebelum naik kembali menjadi 35,31 mg/100 g pada 8 ppm. Kadar antosianin yang diperoleh pada penelitian ini berkisar antara 21,70–49,56 mg/100 g. Nilai tersebut masih sebanding dengan kisaran kadar antosianin yang telah dilaporkan pada berbagai penelitian mengenai beras merah, meskipun nilainya sangat bergantung pada varietas yang digunakan juga dipengaruhi oleh faktor genetik, kondisi budidaya, proses pascapanen, metode ekstraksi, dan metode analisis yang digunakan (Zhao et al., 2025). Chen et al. (2012) melaporkan bahwa kadar antosianin pada beberapa kultivar beras merah berada pada kisaran 7,9–34,4 mg/100 g. Kristamtini et al. (2018) melaporkan bahwa kandungan antosianin pada beras merah dengan varietas yang sama yaitu Inpari 24 memiliki kandungan 0,4423 mg/g (44,23 mg/100g).

Peningkatan kadar antosianin pada 2–4 ppm diduga terjadi karena ozon pada konsentrasi rendah lebih banyak bereaksi dengan komponen permukaan dan dinding sel sehingga meningkatkan permeabilitas jaringan dan mempermudah pelepasan antosianin yang sebelumnya terikat pada matriks sel, tanpa menyebabkan kerusakan oksidatif yang besar terhadap senyawa bioaktif (Kaur et al., 2022). Ozon menyebabkan perubahan ringan pada struktur dinding sel sehingga permeabilitas jaringan meningkat dan pelarut lebih mudah mengekstraksi antosianin yang sebelumnya masih terikat pada matriks sel. Hasil tersebut juga didukung oleh

penelitian Malaiyandi & Natarajan (2014) yang melaporkan bahwa perlakuan ozon dosis rendah dapat meningkatkan kandungan senyawa fenolik pada kecambah kacang tunggak sebagai respons terhadap stres oksidatif ringan.

Terjadi penurunan pada perlakuan konsentrasi 6 ppm menjadi 21,70 mg/100g yang diduga menunjukkan ambang batas di mana efek degradasi mendominasi. Ozon sebagai oksidan kuat (potensial oksidasi 2,07 V) menyerang ikatan rangkap C=C pada struktur antosianin (terutama cyanidin-3-glucoside yang dominan pada beras merah), menyebabkan pembukaan cincin, pembentukan senyawa kuinon, dan degradasi menjadi produk yang tidak berwarna atau senyawa yang lebih sederhana), ozon dapat bereaksi langsung dengan ikatan rangkap pada senyawa organik melalui reaksi ozonolisis, sedangkan pada konsentrasi yang lebih tinggi ozon juga terurai membentuk radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) yang bersifat sangat reaktif yang mempercepat degradasi (Cullen et al., 2009). Reaksi tersebut dapat merusak struktur flavilium antosianin sehingga pigmen kehilangan kestabilannya dan mengalami degradasi. Akibatnya, jumlah antosianin yang masih dapat terukur dengan metode pH differential menjadi lebih rendah

Pada perlakuan 8 ppm kadar antosianin meningkat kembali menjadi 35,31 mg/100 g, meskipun belum mencapai nilai yang diperoleh pada perlakuan 2 ppm maupun 4 ppm. Peningkatan ini diduga karena sebagian ozon telah mengalami dekomposisi menjadi oksigen sebelum bereaksi lebih lanjut dengan pigmen, sehingga kemampuan oksidasinya berkurang. Pada penelitian (Sarron et al., 2021) menyatakan bahwa laju dekomposisi ozon dipengaruhi oleh karakteristik bahan dan keberadaan senyawa yang mudah bereaksi dengan ozon di permukaan sampel. Selain itu, oksidasi pada lapisan luar beras juga dapat menghambat penetrasi ozon ke bagian yang lebih dalam, sehingga kerusakan antosianin tidak sebesar yang terjadi pada konsentrasi 6 ppm.

Perubahan kadar antosianin pada penelitian ini menunjukkan bahwa ozon bekerja melalui dua mekanisme yang saling berkompetisi. Pada konsentrasi rendah, ozon lebih banyak bereaksi dengan komponen dinding sel sehingga meningkatkan pelepasan antosianin dari jaringan dan memperbesar jumlah pigmen yang dapat diekstraksi. Sebaliknya, pada konsentrasi yang lebih tinggi, ozon mulai terurai

membentuk radikal hidroksil yang sangat reaktif sehingga mengoksidasi struktur antosianin dan menyebabkan degradasi pigmen. Menurut (Kaur et al., 2023) keseimbangan antara kedua mekanisme tersebut sangat dipengaruhi oleh konsentrasi ozon, lama pemaparan, serta karakteristik bahan pangan. Oleh karena itu, kadar antosianin pada penelitian ini menunjukkan pola meningkat pada konsentrasi rendah, menurun tajam pada konsentrasi yang lebih tinggi, kemudian kembali meningkat ketika mekanisme reaksi ozon terhadap matriks beras mengalami perubahan.

4.1.2 Respon Fisik

Respon fisik yang di analisis secara statistik yaitu analisis profil gelatinisasi pati menggunakan *Rapid Visco Analyser* (RVA).

4.1.2.1 Analisis Profil Gelatinisasi Pati

Profil pasting beras merah pecah kulit (BMPK) dianalisis menggunakan *Rapid Visco Analyser* (RVA) untuk mengevaluasi perilaku gelatinisasi dan retrogradasi pati akibat perlakuan ozon dengan konsentrasi 0, 2, 4, 6, dan 8 ppm. Karakteristik pasting merupakan salah satu parameter penting dalam mengevaluasi perubahan sifat fungsional pati akibat perlakuan ozon. Analisis ini dilakukan menggunakan RVA, yang mengukur perubahan viskositas suspensi pati selama proses pemanasan, penahanan pada suhu tinggi, dan pendinginan. Kurva RVA menggambarkan perilaku granula pati ketika menyerap air, mengalami gelatinisasi, pecah akibat pemanasan dan pengadukan, kemudian membentuk kembali struktur gel selama proses pendinginan. Oleh karena itu, parameter RVA dapat digunakan untuk mengevaluasi kemampuan pengembangan granula pati (*swelling*), stabilitas pasta terhadap panas, serta kecenderungan retrogradasi setelah pendinginan (Shoukat et al., 2025). Dalam penelitian ini, analisis RVA digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana perlakuan ozon memodifikasi sifat fungsional pati beras merah pecah kulit melalui perubahan karakteristik gelatinisasi, stabilitas pasta selama pemanasan, dan kecenderungan retrogradasi selama pendinginan.

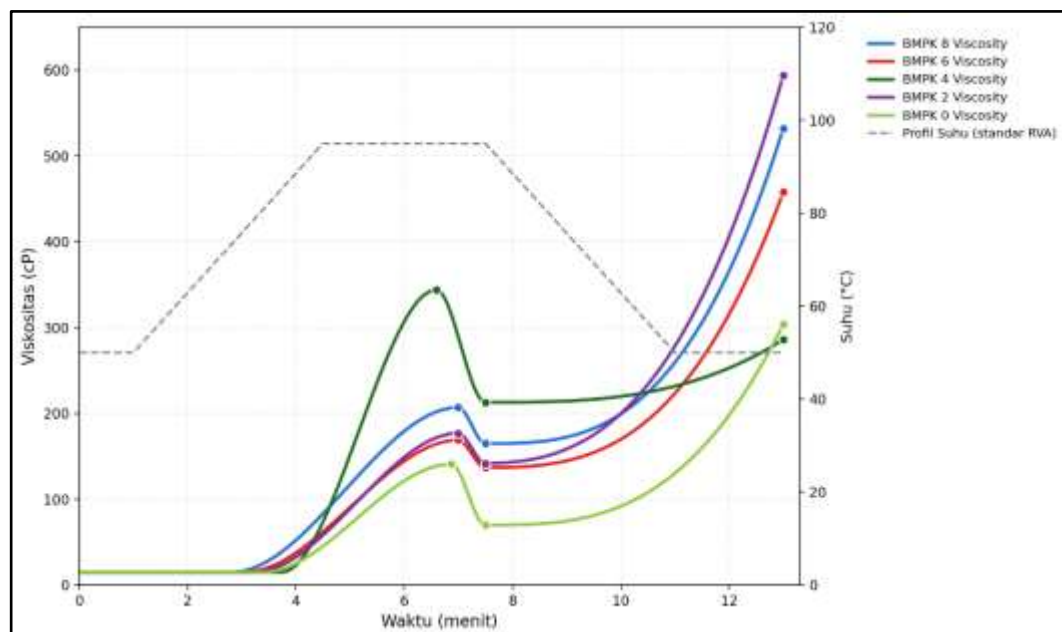
Hasil analisis menunjukkan variasi yang nyata antar perlakuan pada parameter utama RVA, yaitu *peak viscosity* (PV), *trough viscosity* (TV), *breakdown viscosity* (BD), *final viscosity* (FV), *setback viscosity* (SB), *peak time*,

dan *pasting temperature* (PT). Pola ini mencerminkan modifikasi struktur pati akibat oksidasi ozon. Ozon sebagai agen oksidatif kuat menyebabkan pembentukan gugus karbonil dan karboksil pada rantai amilosa serta amilopektin, yang mengubah hidrasi granula pati, serta memodifikasi ketahanan paste terhadap panas dan gesekan shear (Ding et al., 2015; Maqbool et al., 2024).

Tabel 15. Hasil Analisis RVA

Parameter	Konsentrasi Ozon				
	0 ppm	2 ppm	4 ppm	6 ppm	8 ppm
Peak viscosity (cP)	141 ^a ± 3,00	177 ^c ± 3,51	344 ^e ± 6,51	169 ^b ± 3,51	207 ^d ± 4,00
Trough viscosity (cP)	70 ^a ± 1,53	142 ^c ± 2,52	213 ^e ± 4,00	137 ^b ± 2,52	165 ^d ± 3,00
Breakdown viscosity (cP)	71 ^d ± 1,53	35 ^b ± 1,00	131 ^e ± 2,52	32 ^a ± 1,00	42 ^c ± 1,00
Final viscosity (cP)	304 ^b ± 5,00	594 ^e ± 8,00	286 ^a ± 5,51	459 ^c ± 7,02	533 ^d ± 7,02
Setback viscosity (cP)	234 ^b ± 3,51	452 ^e ± 5,51	73 ^a ± 1,53	321 ^c ± 4,51	368 ^d ± 4,04
Peak time (min)	6,87 ^b ± 0,03	7 ^c ± 0,02	6,6 ^c ± 0,03	7 ^c ± 0,03	7 ^c ± 0,03
Pasting temperature (°C)	84,6 ^d ± 0,10	82,45 ^c ± 0,07	88,96 ^e ± 0,06	80,16 ^b ± 0,06	77,25 ^a ± 0,07

Keterangan: Nilai yang ditandai dengan huruf yang berbeda dengan dibaca horizontal antar perlakuan menunjukkan berbeda nyata pada taraf 5% menurut Uji Lanjut Duncan



Gambar 13. Kurva Amilografi RVA

Berdasarkan (Tabel 15) perlakuan ozon memengaruhi karakteristik *pasting* beras merah pecah kulit yang ditunjukkan oleh perubahan nilai *peak viscosity*, *trough viscosity*, *breakdown viscosity*, *final viscosity*, *setback viscosity*, *peak time*, dan *pasting temperature*. Perubahan parameter-parameter tersebut mencerminkan adanya modifikasi terhadap sifat fungsional pati selama proses pemanasan dan pendinginan.

Setiap peningkatan konsentrasi ozon menghasilkan respons yang berbeda terhadap karakteristik *pasting* beras merah pecah kulit. Perlakuan 2 ppm menunjukkan peningkatan sebagian besar parameter viskositas dibandingkan kontrol, mengindikasikan bahwa oksidasi ringan mulai memodifikasi struktur granula pati. Pada perlakuan 4 ppm hampir seluruh parameter yang berkaitan dengan kemampuan pengembangan granula mencapai kondisi optimum, ditunjukkan oleh nilai *peak viscosity*, *trough viscosity*, dan *breakdown viscosity* tertinggi, serta *setback viscosity* terendah. Selanjutnya, peningkatan konsentrasi ozon menjadi 6 ppm menyebabkan penurunan sebagian besar parameter viskositas, sedangkan pada 8 ppm terjadi sedikit peningkatan kembali pada beberapa

parameter meskipun nilainya belum mencapai kondisi optimum seperti pada perlakuan 4 ppm. Pola tersebut menunjukkan bahwa respons pati terhadap perlakuan ozon tidak berlangsung secara linier, melainkan dipengaruhi oleh tingkat oksidasi yang terjadi pada granula pati.

Peak viscosity berkaitan dengan kemampuan granula pati menyerap air dan mengalami pembengkakan (*swelling*) selama gelatinisasi (Kong et al., 2015). Nilai *peak viscosity* meningkat dari 141 cP pada perlakuan 0 ppm menjadi 177 cP pada perlakuan 2 ppm. Peningkatan tersebut diduga menunjukkan bahwa oksidasi ringan mulai meningkatkan kemampuan granula menyerap air tanpa menyebabkan kerusakan struktur yang signifikan. Pada perlakuan 4 ppm nilai *peak viscosity* meningkat tajam menjadi 344 cP yang mengindikasikan bahwa granula pati mengalami *swelling* secara optimum. Setelah konsentrasi ozon ditingkatkan menjadi 6 ppm, nilai *peak viscosity* menurun menjadi 169 cP akibat meningkatnya degradasi molekul pati, sedangkan pada perlakuan 8 ppm terjadi sedikit peningkatan menjadi 207 cP, namun nilainya masih jauh lebih rendah dibandingkan perlakuan 4 ppm.

Perlakuan ozon pada konsentrasi sedang diduga mampu memodifikasi struktur granula tanpa menyebabkan kerusakan yang berlebihan, sehingga penetrasi air ke dalam granula meningkat dan proses *swelling* berlangsung lebih optimal. Sebaliknya, pada konsentrasi ozon yang lebih tinggi, proses oksidasi mulai menyebabkan pemutusan sebagian rantai molekul pati (depolimerisasi) sehingga kemampuan granula untuk mengembang menurun. Hal tersebut sesuai dengan penelitian An & King (2009), yang melaporkan bahwa perlakuan ozon menghasilkan tingkat *swelling* tertinggi dan kecenderungan retrogradasi terendah pada perlakuan optimum, sedangkan perubahan sifat *pasting* dipengaruhi oleh tingkat oksidasi pati.

Pola yang serupa juga terlihat pada *trough viscosity* dan *breakdown viscosity*. *Trough viscosity* menunjukkan kemampuan granula mempertahankan integritasnya setelah mengalami *swelling*, sedangkan *breakdown viscosity* menggambarkan penurunan viskositas akibat kerusakan granula selama pemanasan (Kong et al., 2015). *Trough viscosity* meningkat dari 70 cP (0 ppm) menjadi 142 cP

(2 ppm), mencapai puncaknya 213 cP pada 4 ppm, lalu turun menjadi 137 cP pada 6 ppm sebelum naik kembali menjadi 165 cP pada 8 ppm. Pada *breakdown viscosity*, nilai kontrol relatif tinggi (70 cP), menurun menjadi 35 cP di 2 ppm, melonjak menjadi 131 cP di 4 ppm, sejalan dengan tingginya *peak viscosity* pada konsentrasi tersebut, karena granula yang mengembang lebih besar lebih mudah pecah selama pemanasan, kemudian mencapai titik terendah 32 cP di 6 ppm sebelum naik menjadi 42 cP di 8 ppm. Nilai *trough viscosity* yang optimum pada perlakuan 4 ppm menunjukkan bahwa granula masih mampu mempertahankan kestabilannya setelah gelatinisasi. Sementara itu, tingginya nilai *breakdown viscosity* pada perlakuan yang sama merupakan hasil dari tingginya kemampuan granula untuk mengembang. Granula yang mengalami *swelling* lebih besar cenderung lebih mudah mengalami keretakan selama pemanasan, sehingga nilai *breakdown* yang tinggi pada kondisi ini tidak selalu menunjukkan kestabilan yang rendah, tetapi lebih mencerminkan kemampuan pengembangan granula yang lebih baik. Penurunan kedua parameter pada 6 ppm diduga menunjukkan bahwa degradasi molekul pati mulai mendominasi akibat oksidasi yang lebih intens, sedangkan peningkatan kembali pada 8 ppm mengindikasikan bahwa respons pati terhadap ozon tidak bersifat linier dan dipengaruhi oleh keseimbangan antara modifikasi struktur serta degradasi molekul pati.

Berbeda dengan parameter gelatinisasi lainnya, *final viscosity* dan *setback viscosity* lebih menggambarkan perilaku pati selama proses pendinginan. Karakteristik *final viscosity* dan *setback viscosity* dipengaruhi oleh struktur molekul pati, terutama kandungan amilosa dan organisasi amilopektin, yang berperan penting dalam proses gelatinisasi dan retrogradasi. *Final viscosity* menunjukkan kemampuan pati membentuk kembali jaringan gel, sedangkan *setback viscosity* berkaitan dengan kecenderungan molekul pati, terutama amilosa, untuk mengalami retrogradasi atau penyusunan kembali molekul pati selama pendinginan (Wani et al., 2012). Pada penelitian ini, nilai *final viscosity* meningkat tajam dari 304 cP (0 ppm) menjadi 594 cP (2 ppm) yang merupakan nilai tertinggi di antara seluruh perlakuan, lalu turun ke titik terendah 286 cP di 4 ppm, sebelum naik bertahap menjadi 459 cP (6 ppm) dan 533 cP (8 ppm). *Setback viscosity* menunjukkan pola

yang serupa, yaitu naik dari 234 cP (0 ppm) ke puncaknya sebesar 452 cP di 2 ppm, turun drastis menjadi hanya 73 cP di 4 ppm, lalu naik kembali menjadi 321 cP di 6 dan 368 cP pada 8 ppm.

Tingginya *final* dan *setback viscosity* pada konsentrasi 2 ppm diduga berkaitan dengan meningkatnya pelepasan (*leaching*) amilosa dari granula pada tahap oksidasi ringan. Pada kondisi tersebut, granula belum mengalami modifikasi struktural yang signifikan, sehingga amilosa yang keluar dapat lebih leluasa berasosiasi kembali membentuk jaringan gel selama pendinginan (Wani et al., 2012). Sebaliknya, perlakuan 4 ppm menghasilkan nilai *final viscosity* dan *setback viscosity* terendah dibandingkan seluruh perlakuan lainnya. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pasta yang terbentuk memiliki kecenderungan retrogradasi yang paling kecil. Dengan demikian, molekul pati tidak mudah menyusun kembali strukturnya selama pendinginan, sehingga diharapkan menghasilkan tekstur produk yang lebih stabil dan tidak mudah mengeras. Sementara itu, kenaikan kembali nilai kedua parameter pada konsentrasi 6 dan 8 ppm sejalan dengan menurunnya integritas granula akibat depolimerisasi lanjut yang turut melepaskan lebih banyak amilosa ke fase cair (Chan et al., 2011).

Parameter *peak time* menunjukkan variasi kecil antarperlakuan (6,6–7 menit) dan nilai tersingkat terjadi di 4 ppm (6,6 menit), mengindikasikan granula pada konsentrasi ini mencapai *swelling* maksimum lebih cepat (Kong et al., 2015). *Pasting temperature* menunjukkan suhu ketika granula pati mulai mengalami gelatinisasi dan dipengaruhi oleh kekuatan ikatan hidrogen di dalam granula pati (Wani et al., 2012). Perlakuan 4 ppm memiliki suhu awal gelatinisasi yang lebih tinggi, yang menunjukkan bahwa granula memerlukan energi lebih besar untuk memulai proses gelatinisasi. Namun, setelah proses tersebut dimulai, granula mampu mengalami *swelling* secara lebih optimal sehingga menghasilkan *peak viscosity* tertinggi. Hal ini menunjukkan bahwa suhu awal gelatinisasi tidak selalu berbanding lurus dengan kemampuan granula untuk mengembang, tetapi juga dipengaruhi oleh organisasi struktur molekul pati dan kekuatan ikatan hidrogen di dalam granula.

Secara keseluruhan hasil analisis RVA menunjukkan bahwa perlakuan ozon 4 ppm merupakan kondisi yang paling efektif dalam memodifikasi sifat fungsional pati beras merah pecah kulit. Pada konsentrasi tersebut, proses modifikasi struktur granula masih lebih dominan dibandingkan degradasi molekul pati sehingga menghasilkan kemampuan *swelling* yang tinggi, kestabilan pasta yang baik selama pemanasan, serta kecenderungan retrogradasi yang rendah. Ketika konsentrasi ozon ditingkatkan menjadi 6 ppm, oksidasi yang lebih intens mulai menyebabkan depolimerisasi sehingga sebagian karakteristik *pasting* menurun. Adanya peningkatan kembali pada beberapa parameter di perlakuan 8 ppm menunjukkan bahwa respons pati terhadap ozon tidak sepenuhnya linier, Chan et al. (2011) menjelaskan bahwa ozon dapat menyebabkan oksidasi sekaligus pemutusan rantai molekul pati, sehingga perubahan sifat reologi bergantung pada keseimbangan kedua proses tersebut serta jenis pati yang digunakan.

4.2 Parameter Pengamatan yang Dianalisis Secara Deskriptif

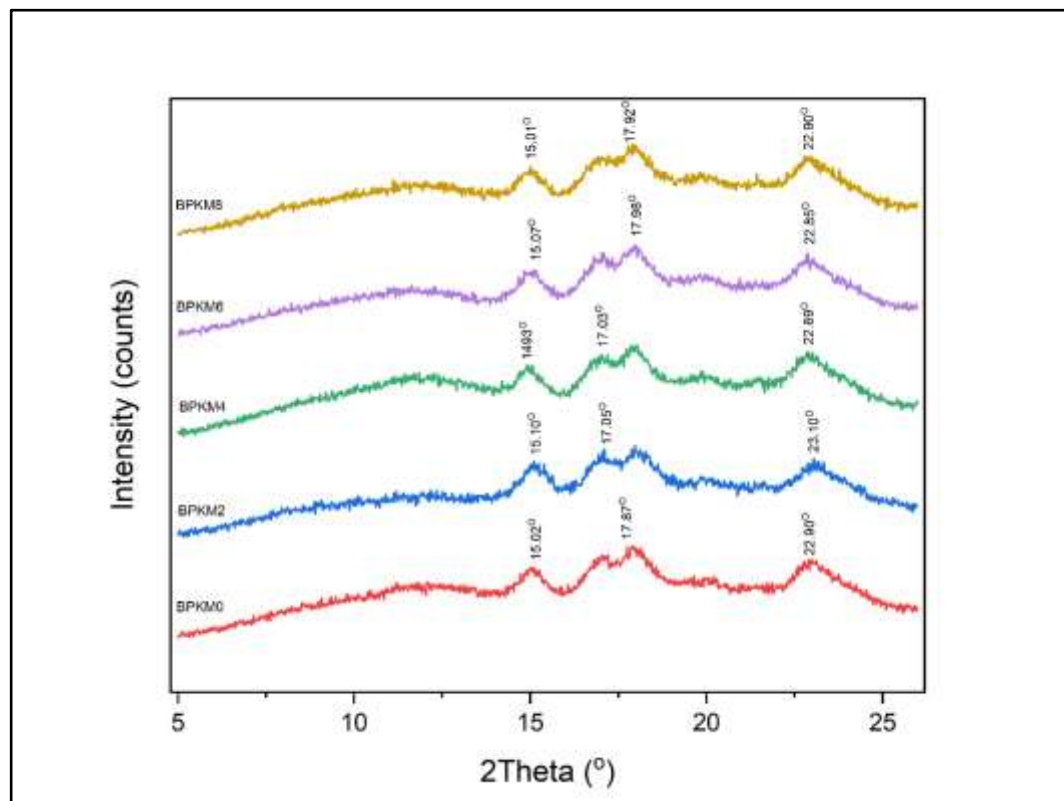
BMPK

4.2.1 Respon Fisik

Respon fisik yang di analisis secara statistik meliputi analisis struktur kristalin pati menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan analisis morfologi permukaan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM).

4.2.1.2 Analisis Struktur Kristalin Pati

Analisis struktur kristalin pati menggunakan X-Ray Diffraction (XRD) digunakan untuk mengidentifikasi struktur kristalin suatu bahan berdasarkan pola difraksi sinar-X yang dihasilkan. Analisis XRD dapat memberikan informasi mengenai tingkat kristalinitas dan amorfitas suatu material melalui perbandingan luas daerah kristalin dan amorf pada difraktogram. Daerah kristalin ditunjukkan oleh puncak difraksi yang tajam, sedangkan daerah amorf ditunjukkan oleh puncak yang melebar (*broad peak*) pada pola difraksi sinar-X (Zaiyar, 2015).



Gambar 14. Difratrogram Beras Merah Pecah Kulit

Tabel 16. Sudut Difraksi Beras Merah Pecah Kulit

Perlakuan	Sudut Difraksi 2θ (°)
0 ppm (a1)	15,0; 17,0; 18,0; 22,7
2 ppm (a2)	15,0; 17,0; 18,0; 23,1
4 ppm (a3)	15,0; 17,0; 18,0; 22,9
6 ppm (a4)	15,0; 17,0; 18,0; 22,8
8 ppm (a5)	15,0; 17,0; 18,0; 22,9

Berdasarkan hasil difraktogram pada Tabel 16, seluruh perlakuan menunjukkan puncak difraksi utama pada sudut 2θ sekitar 15° , 17° , 18° , dan $22,7-23,1^\circ$. Pola tersebut menunjukkan bahwa pati beras merah pecah kulit memiliki struktur kristal tipe A, yang merupakan karakteristik khas pati sereal. Menurut Šárka et al. (2023), pati beras dengan struktur kristal tipe A dicirikan oleh puncak difraksi pada sekitar 15° , 17° , 18° , dan 23° , yang berasal dari susunan *double helix* amilopektin pada daerah kristalin. Struktur kristal tipe A memiliki susunan molekul

yang lebih rapat dengan kandungan air dalam kisi kristal yang lebih rendah dibandingkan kristal tipe B (Bertoft, 2017). Oleh karena itu, kesesuaian posisi puncak difraksi antara hasil penelitian ini dengan karakteristik yang dilaporkan dalam literatur menunjukkan bahwa perlakuan ozon hingga konsentrasi 8 ppm tidak mengubah tipe kristal pati beras merah pecah kulit.

Tabel 17. Daerah Kristalinitas (%) dan daerah Amorf (%) Beras Merah Pecah Kulit

Perlakuan	Kristalinitas (%)	Amorphous (%)
0 ppm (a1)	23,3%	76,7%
2 ppm (a2)	22,3%	77,7%
4 ppm (a3)	29,3 %	70,7%
6 ppm (a4)	26,1%	73,9%
8 ppm (a5)	24,2%	75,8%

Tingkat kristalinitas butiran pati alami berkisar antara 15% hingga 45%, dan rata-rata tingkat daerah amorf adalah 70%. Daerah amorf merupakan bagian yang lebih tidak teratur memiliki banyak cabang amilopektin dan amilosa, sehingga lebih mudah dilalui dan bereaksi dengan zat kimia. Sementara daerah kristalin tersusun dari rantai amilopektin yang tersusun rapi dan stabil, sehingga lebih sulit untuk diubah (Satmalawati et al., 2020).

Ozon sebagai agen oksidasi kuat cenderung menyerang daerah amorf terlebih dahulu karena bagian ini memiliki ikatan hidrogen yang lebih lemah dan struktur yang lebih longgar. Hal ini memungkinkan molekul ozon lebih mudah menembus dan bereaksi dengan gugus hidroksil pada rantai pati di daerah amorf, menyebabkan pemutusan ikatan glikosidik dan pembentukan gugus karbonil atau karboksil. Setelah daerah amorf mengalami degradasi kemudian ozon dapat memasuki daerah kristalin secara bertahap (Li et al., 2023).

Perlakuan ozon 4 ppm menghasilkan nilai kristalinitas tertinggi sebesar 29,3% dengan proporsi daerah amorf terendah sebesar 70,7%. Peningkatan kristalinitas tersebut mengindikasikan bahwa ozonisasi pada konsentrasi tersebut mampu memodifikasi struktur pati secara optimum. Ozon sebagai oksidator kuat diduga lebih dahulu bereaksi pada daerah amorf karena wilayah tersebut memiliki

susunan molekul yang kurang teratur sehingga lebih mudah diakses dibandingkan daerah kristalin.

Pada perlakuan 6 ppm dan 8 ppm nilai kristalinitas kembali menurun menjadi masing-masing 26,1% dan 24,2%, sedangkan proporsi daerah amorf meningkat. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi ozon menyebabkan oksidasi berlangsung lebih intens sehingga tidak hanya menyerang daerah amorf, tetapi juga mulai memengaruhi susunan *double helix* amilopektin pada daerah semi-kristalin. Oksidasi yang berlebihan dapat menyebabkan pemutusan rantai molekul pati (demoliperasi) dan melemahnya ikatan hidrogen yang mempertahankan keteraturan struktur kristalin sehingga kristalinitas relatif menurun (Du et al., 2024). Dengan demikian, perubahan kristalinitas pada penelitian ini menunjukkan bahwa pengaruh ozon terhadap struktur pati berlangsung secara bertahap, yaitu meningkatkan keteraturan struktur pada tingkat oksidasi tertentu, kemudian menurunkannya kembali ketika oksidasi berlangsung lebih lanjut.

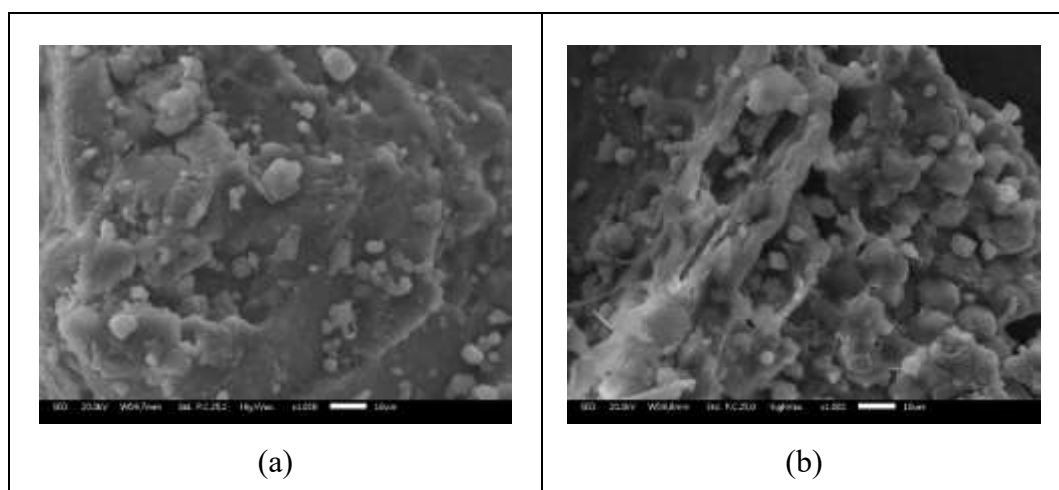
Hasil XRD tersebut sejalan dengan karakteristik *pasting* yang diperoleh melalui analisis RVA. Pada penelitian ini, perlakuan ozon 4 ppm tidak hanya menghasilkan kristalinitas tertinggi, tetapi juga menghasilkan *peak viscosity* tertinggi dibandingkan perlakuan lainnya. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa modifikasi struktur pati pada konsentrasi 4 ppm masih mampu mempertahankan integritas granula sehingga granula memiliki kemampuan menyerap air dan mengembang (*swelling*) secara optimum selama proses gelatinisasi. Meskipun daerah kristalin berperan mempertahankan kekuatan struktur granula, kristalinitas yang meningkat secara moderat dapat menunjukkan bahwa reorganisasi struktur akibat oksidasi berlangsung tanpa menyebabkan kerusakan yang berlebihan pada granula pati. Sebaliknya, pada konsentrasi ozon yang lebih tinggi, depolimerisasi molekul pati menyebabkan kemampuan granula mempertahankan pengembangan selama pemanasan mulai menurun sehingga nilai *peak viscosity* juga mengalami penurunan. Hubungan tersebut menunjukkan bahwa perlakuan ozon 4 ppm merupakan kondisi optimum yang menghasilkan keseimbangan antara keteraturan

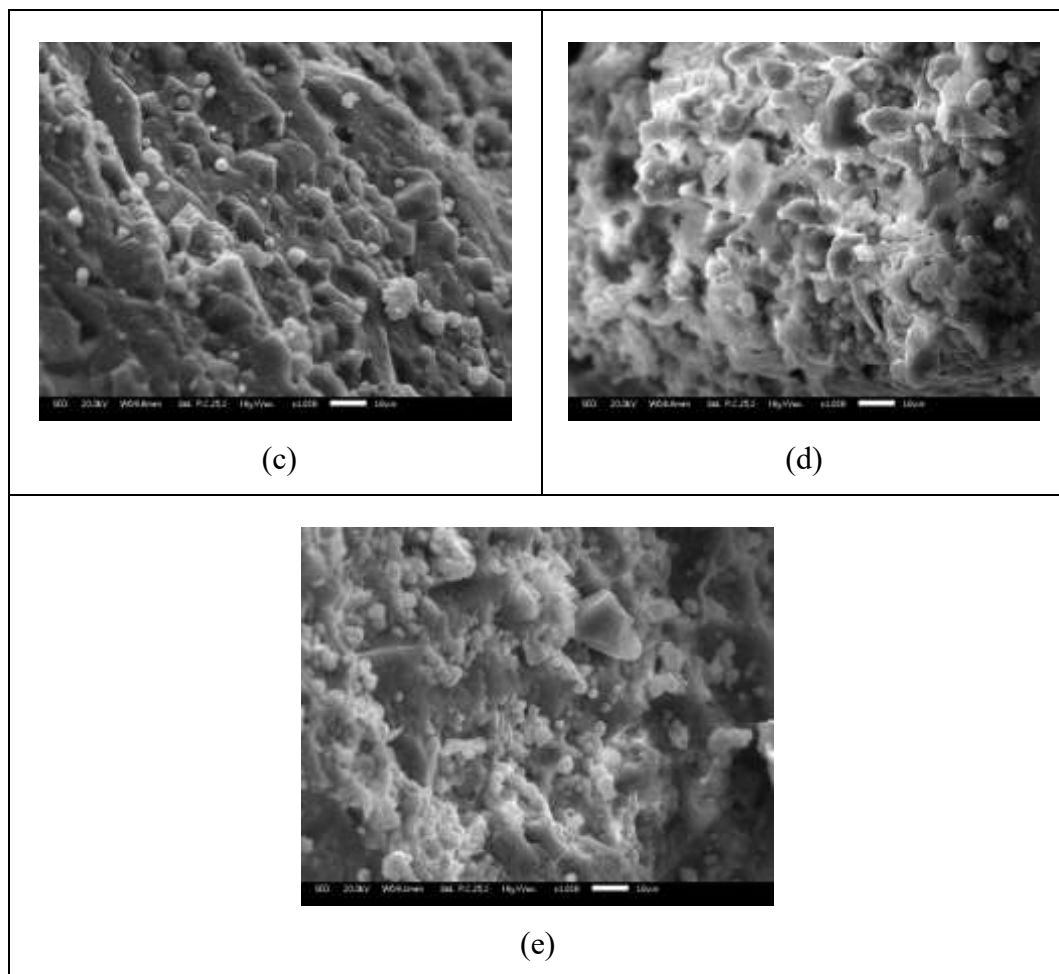
struktur kristalin dan integritas granula pati, sehingga memberikan sifat gelatinisasi yang paling baik.

4.2.1.3 Analisis Morfologi Permukaan

Analisis morfologi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur permukaan beras merah pecah kulit (BMPK) setelah perlakuan ozonasi. SEM merupakan metode karakterisasi yang mampu memberikan gambaran visual mengenai bentuk, ukuran, distribusi, serta perubahan permukaan granula pati pada tingkat mikroskopis. Melalui analisis SEM, perubahan seperti terbentuknya pori, retakan, kekasaran permukaan, maupun pelepasan sebagian struktur granula dapat diamati sebagai indikasi terjadinya modifikasi fisik maupun kimia pada bahan pangan (Wang et al., 2011).

Hasil pengamatan SEM pada perbesaran 1000 $\times$, menunjukkan perubahan morfologi yang bersifat progresif seiring peningkatan konsentrasi ozon (0, 2, 4, 6, dan 8 ppm) seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut.





Gambar 15 a-e. Konsentrasi 0 ppm (a), Konsentrasi 2 ppm (b), Konsentrasi 4 ppm (c), Konsentrasi 6 ppm (d), Konsentrasi 8 ppm (e).

Hasil pengamatan morfologi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menunjukkan bahwa perlakuan ozon menyebabkan perubahan struktur permukaan beras merah pecah kulit dibandingkan dengan kontrol tanpa ozonasi. Pada perlakuan 0 ppm (Gambar 14a), permukaan BMPK terlihat masih kompak, utuh, dan relatif halus. Granula pati tampak melekat rapat dengan sedikit retakan alami, tanpa adanya pori atau rongga yang signifikan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa struktur granula pati masih memiliki integritas yang baik sebelum mengalami modifikasi akibat proses oksidasi.

Pada perlakuan 2 ppm (Gambar 14b), mulai terlihat perubahan awal berupa meningkatnya jarak antargranula pati serta munculnya bagian permukaan

menyerupai serat yang mengalami pelepasan. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa ozon mulai memberikan pengaruh terhadap struktur permukaan pati, meskipun tingkat kerusakan masih relatif rendah. Ozon merupakan oksidator kuat yang dapat bereaksi dengan komponen pati melalui oksidasi gugus hidroksil ($-OH$) pada rantai glukosa, terutama pada daerah amorf yang memiliki susunan molekul lebih renggang. Proses oksidasi tersebut dapat menghasilkan gugus karbonil dan karboksil yang menyebabkan melemahnya interaksi antarrantai pati sehingga sebagian struktur permukaan mengalami perubahan (Li et al., 2023).

Perubahan morfologi semakin terlihat pada perlakuan 4 ppm (Gambar 14c), ditandai dengan munculnya alur memanjang, permukaan yang lebih kasar, serta terbentuknya beberapa rongga kecil pada permukaan granula. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses oksidasi mulai menyebabkan pengikisan pada bagian permukaan pati. Du et al. (2024) menjelaskan bahwa ozon cenderung menyerang daerah amorf terlebih dahulu karena bagian tersebut memiliki tingkat keteraturan molekul yang lebih rendah dibandingkan daerah kristalin. Hilangnya sebagian struktur amorf menyebabkan bagian kristalin menjadi relatif lebih dominan, sehingga dapat berpengaruh terhadap peningkatan nilai kristalinitas pati yang diamati melalui analisis XRD.

Pada perlakuan 6 ppm (Gambar 14d), permukaan granula menunjukkan perubahan yang lebih kompleks berupa terbentuknya kelompok-kelompok granula yang mengalami penggumpalan (aglomerasi) serta adanya rongga dengan ukuran lebih besar. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa intensitas oksidasi yang lebih tinggi tidak hanya menyebabkan pelepasan sebagian komponen pati, tetapi juga memungkinkan terjadinya interaksi kembali antarfragmen pati yang telah mengalami modifikasi. Dengan demikian, perubahan morfologi pada konsentrasi ozon tinggi tidak selalu menunjukkan degradasi yang semakin besar, tetapi juga dapat mencerminkan adanya reorganisasi struktur permukaan granula.

Perlakuan 8 ppm (Gambar 14e) menunjukkan permukaan paling tidak rata dibandingkan perlakuan lainnya, ditandai dengan banyaknya granula kecil yang menutupi permukaan, keberadaan fragmen pati berbentuk pipih, serta rongga yang lebih dalam. Peningkatan kekasaran permukaan akibat ozonasi juga dilaporkan oleh

(El-desouky, 2025) pada pati jagung, dimana perlakuan ozon menyebabkan perubahan permukaan granula menjadi lebih kasar dan meningkatkan luas permukaan akibat terbentuknya struktur yang lebih berpori. Selain itu, Subroto et al. (2022) melaporkan bahwa ozonasi pada pati adlay mampu menghasilkan granula dengan permukaan berpori akibat adanya modifikasi struktur pati, yang kemudian memengaruhi sifat fungsional seperti kemampuan menyerap air.

Perubahan morfologi yang diamati melalui SEM juga mendukung hasil analisis lainnya pada penelitian ini. Peningkatan kristalinitas pada perlakuan 4 ppm berdasarkan analisis XRD diduga berkaitan dengan berkurangnya bagian amorf akibat oksidasi ozon, yang terlihat dari terbentuknya alur dan pori pada permukaan granula. Selain itu, penurunan kadar pati terutama pada rentang perlakuan awal hingga 4 ppm menunjukkan adanya perubahan struktur pati akibat proses oksidasi. Perubahan permukaan granula juga berpotensi memengaruhi sifat gelatinisasi pati karena terbentuknya pori dapat meningkatkan aksesibilitas air menuju bagian internal granula sehingga memengaruhi karakteristik pemasakan pati.

Secara keseluruhan, hasil SEM menunjukkan bahwa ozonasi menyebabkan perubahan bertahap pada morfologi permukaan beras, mulai dari pelepasan komponen permukaan pada konsentrasi rendah hingga terbentuknya pori, rongga, dan perubahan agregasi pada konsentrasi yang lebih tinggi. Perubahan tersebut mengindikasikan bahwa ozon terutama memengaruhi bagian pati dengan struktur kurang teratur (daerah amorf), kemudian menyebabkan modifikasi lebih lanjut terhadap struktur permukaan granula seiring peningkatan konsentrasi ozon.

4.2.2 Respon Kimia

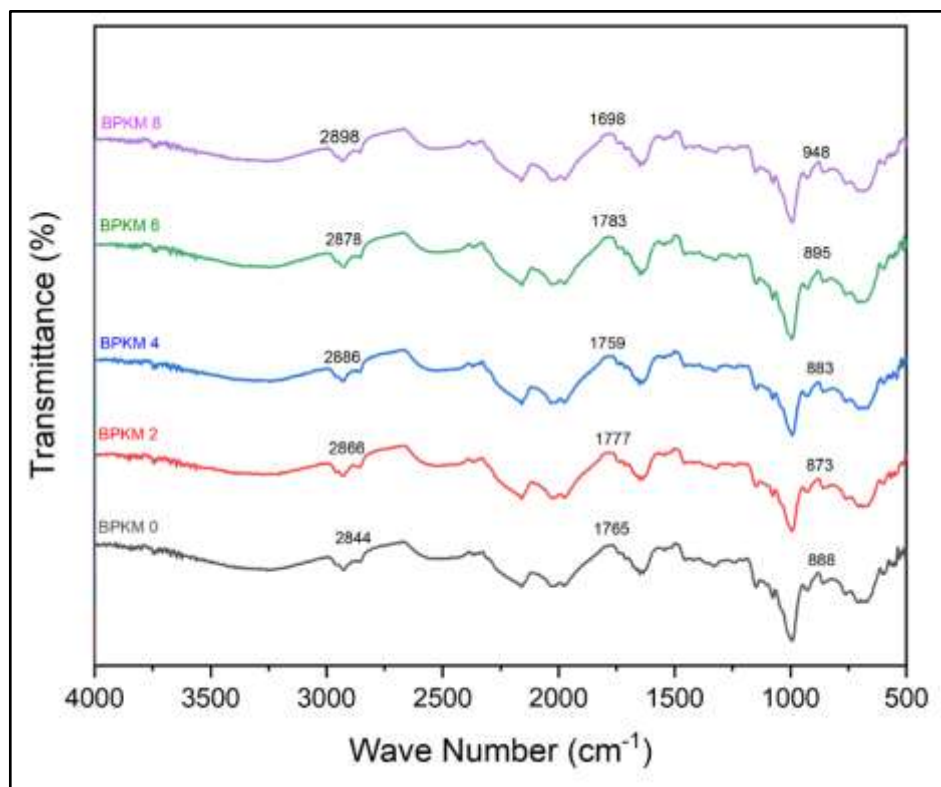
Analisis profil gugus fungsi menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR).

4.2.2.1 Analisis Gugus Fungsi

Analisis gugus fungsi pada analisis ini menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) merupakan teknik spektroskopi yang digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi pada suatu senyawa berdasarkan absorpsi radiasi inframerah oleh ikatan kimia dalam molekul. Teknik ini bekerja berdasarkan prinsip bahwa ikatan kimia dalam molekul bergetar pada frekuensi tertentu. Ketika

radiasi inframerah melewati sampel, sebagian energi diserap jika frekuensi radiasi sesuai dengan frekuensi vibrasi ikatan tersebut, sehingga menghasilkan spektrum berupa puncak-puncak absorpsi pada bilangan gelombang (cm^{-1}) tertentu (Silverstein & Bassler, 1962).

Analisis FTIR digunakan untuk mengetahui perubahan struktur kimia pati akibat perlakuan ozon, terutama perubahan pada gugus fungsi yang berkaitan dengan proses oksidasi, seperti gugus karbonil ($\text{C}=\text{O}$), ikatan $\text{C}-\text{H}$, serta ikatan glikosidik penyusun struktur pati. Melalui perubahan posisi dan intensitas pita serapan, dapat diketahui sejauh mana perlakuan ozon memengaruhi struktur molekul pati.



Gambar 16. Grafik Spektrum FT-IR pada Beras Merah Pecah Kulit

Tabel 18. Hasil Pembacaan Analisis FTIR

No.	Wavenumber (cm ⁻¹)					Gugus fungsi
	0 ppm	2 ppm	4 ppm	6 ppm	8 ppm	
1.	2844	2866	2886	2878	2898	C–H stretching (alifatik, CH ₂ /CH ₃ simetris/asimetris pada rantai glukosa)
2.	1765	1777	1759	1783	1698	C=O stretching (karbonil/karboksil dari oksidasi gugus hidroksil)
3.	888	873	883	895	948	C–O–C glikosidik, C–O stretching, dan wilayah sidik jari (anomerik α -1,4/ α -1,6)

Berdasarkan hasil spektrum FTIR pada Gambar 16, seluruh perlakuan menunjukkan pola spektrum yang relatif sama dengan pati alami. Hal tersebut menunjukkan bahwa perlakuan ozon tidak menyebabkan perubahan besar terhadap struktur utama pati. Menurut Chan et al. (2009), proses ozonisasi umumnya hanya memodifikasi gugus fungsi tertentu melalui reaksi oksidasi tanpa merusak struktur dasar pati secara keseluruhan. Namun, terdapat beberapa perubahan pada posisi pita serapan pada daerah tertentu yang menunjukkan adanya perubahan lingkungan kimia akibat proses ozonisasi. Pada penelitian ini, pembahasan FTIR difokuskan pada tiga daerah utama, yaitu daerah regangan C–H (sekitar 2850–2970 cm⁻¹), daerah gugus karbonil (C=O) (sekitar 1690–1780 cm⁻¹), dan daerah fingerprint region (sekitar 800–950 cm⁻¹) yang menjadi karakteristik senyawa polisakarida (Silverstein & Bassler, 1962).

Berdasarkan Tabel 18, pita serapan pada daerah 2844–2898 cm⁻¹ menunjukkan adanya vibrasi regangan ikatan C–H dari gugus alifatik CH₂ dan CH₃ pada rantai glukosa penyusun pati. Hasil penelitian menunjukkan adanya pergeseran pita serapan C–H menuju bilangan gelombang yang lebih tinggi seiring dengan peningkatan konsentrasi ozon. Perlakuan tanpa ozon (0 ppm) menunjukkan pita serapan pada 2844 cm⁻¹, sedangkan perlakuan ozon 8 ppm menunjukkan pergeseran hingga 2898 cm⁻¹. Pergeseran pita serapan tersebut menunjukkan adanya perubahan kondisi lingkungan kimia di sekitar ikatan C–H akibat perlakuan ozon. Menurut Silverstein et al. (1962), perubahan posisi pita serapan pada spektrum FTIR dapat terjadi karena adanya perubahan energi vibrasi akibat

perubahan struktur atau interaksi antar molekul. Pada penelitian ini, perubahan tersebut diduga terjadi akibat adanya proses oksidasi ringan yang menyebabkan perubahan sebagian struktur rantai pati. Meskipun demikian, pita serapan C–H masih tetap muncul pada seluruh perlakuan, yang menunjukkan bahwa struktur utama polisakarida penyusun pati masih tetap dipertahankan.

Daerah serapan pada bilangan gelombang 1698–1783 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus karbonil (C=O). Gugus karbonil pada pati umumnya terbentuk sebagai hasil oksidasi gugus hidroksil (-OH) pada unit glukosa penyusun pati (Chan et al., 2009). Perlakuan ozon menyebabkan perubahan posisi pita serapan karbonil, terutama pada perlakuan 8 ppm yang mengalami pergeseran hingga 1698 cm^{-1} . Perubahan tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi ozon, semakin besar kemungkinan terjadinya oksidasi pada struktur pati. Ozon merupakan oksidator kuat yang mampu mengoksidasi gugus hidroksil (-OH) pada unit glukosa penyusun pati menjadi gugus karbonil (C=O) dan karboksil (-COOH). Reaksi tersebut menyebabkan peningkatan jumlah gugus yang mengandung oksigen dalam struktur pati (Chan et al., 2009; Satmalawati et al., 2020). Pergeseran pita karbonil pada perlakuan 8 ppm menunjukkan bahwa proses oksidasi berlangsung lebih intens dibandingkan perlakuan lainnya. Namun, karena tidak ditemukan adanya pita serapan baru yang dominan pada spektrum FTIR, perubahan tersebut diduga menunjukkan bahwa ozon hanya menyebabkan modifikasi sebagian struktur pati dan belum menyebabkan kerusakan struktur polisakarida secara menyeluruh. Hal ini sesuai dengan karakteristik proses ozonisasi yang mampu memodifikasi pati secara selektif melalui oksidasi gugus tertentu tanpa menghancurkan keseluruhan rantai pati (Chan et al., 2009).

Daerah fingerprint region pada bilangan gelombang 800–950 cm^{-1} merupakan daerah yang khas untuk senyawa polisakarida, termasuk pati. Daerah ini berkaitan dengan vibrasi ikatan C–O, C–O–C glikosidik, serta struktur cincin glukosa yang menyusun rantai amilosa dan amilopektin (Silverstein & Bassler, 1962). Pada penelitian ini, terjadi perubahan posisi pita serapan pada daerah fingerprint region pada berbagai perlakuan ozon. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa perlakuan ozon memberikan pengaruh terhadap susunan molekul pati,

terutama pada bagian ikatan glikosidik yang menghubungkan unit-unit glukosa. Perubahan pada daerah ini mengindikasikan adanya perubahan susunan molekul pati yang kemungkinan berkaitan dengan perubahan keteraturan struktur pati pada bagian amorf maupun kristalin, sebagaimana didukung oleh hasil analisis XRD. Namun, pola spektrum yang masih relatif sama antar perlakuan menunjukkan bahwa perlakuan ozon tidak menyebabkan pemutusan total terhadap ikatan utama penyusun pati. Dengan demikian, ozon lebih berperan dalam memodifikasi struktur internal pati dibandingkan menyebabkan degradasi pati secara keseluruhan.

Secara keseluruhan hasil FTIR menunjukkan bahwa perlakuan ozon menyebabkan perubahan kimia pada pati beras merah pecah kulit, terutama melalui proses oksidasi yang ditandai dengan perubahan pada daerah karbonil, pergeseran pita C–H, dan perubahan pada fingerprint region. Perubahan tersebut terlihat lebih jelas pada konsentrasi ozon yang lebih tinggi, terutama 6 dan 8 ppm. Perubahan struktur kimia akibat oksidasi tersebut berkaitan dengan hasil analisis lainnya. Pembentukan gugus karbonil dan karboksil dapat mengurangi kekuatan ikatan hidrogen antar rantai pati yang berperan dalam mempertahankan struktur kristalin. Hal ini diduga berkontribusi terhadap penurunan derajat kristalinitas pati yang diamati berdasarkan hasil analisis XRD. Gangguan pada struktur molekul pati juga dapat menyebabkan granula pati menjadi lebih mudah mengalami perubahan fisik, sehingga mendukung hasil SEM yang menunjukkan adanya perubahan morfologi berupa permukaan yang lebih kasar, munculnya lekukan (pitting), dan erosi ringan pada granula akibat perlakuan ozon (Ramos et al., 2024).

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Handarini et al. (2020) yang melaporkan bahwa perlakuan ozon pada pati dapat meningkatkan pembentukan gugus karbonil dan karboksil, menyebabkan perubahan struktur kristalin, serta memengaruhi morfologi granula, tetapi tetap mempertahankan struktur utama polimer pati. Oleh karena itu, perlakuan ozon pada penelitian ini dapat dikategorikan sebagai modifikasi pati secara oksidatif yang menyebabkan perubahan struktur kimia secara terkendali tanpa merusak keseluruhan struktur pati.

4.3 Pemilihan Perlakuan Konsentrasi Ozon yang Optimum

Penentuan konsentrasi ozon terbaik pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode De Garmo (indeks efektivitas). Variabel respon diurutkan berdasarkan prioritas dan kontribusinya terhadap tujuan penelitian, kemudian diberi Bobot Variabel (BV) pada skala 0–1. Bobot Normal (BN) ditentukan dengan membagi BV masing-masing variabel dengan jumlah total BV ($\Sigma BV = 6,00$). Variabel dikelompokkan menjadi dua kategori: (a) semakin besar rerata semakin baik, dan (b) semakin kecil rerata semakin baik. Nilai Efektivitas (Ne) dihitung dari selisih nilai perlakuan terhadap nilai terendah dibagi selisih nilai tertinggi terhadap nilai terendah (dibalik untuk kategori b), lalu Nilai Hasil (Nr) diperoleh dari perkalian Ne dengan BN dan dijumlahkan untuk seluruh respon pada tiap perlakuan. Konsentrasi dengan Nr total tertinggi merupakan perlakuan terbaik (De Garmo et al., 1984).

Penentuan bobot menekankan pada sifat fungsional dan tekstural pati (*pasting properties*), sehingga parameter RVA diberi bobot lebih tinggi dibandingkan kadar antosianin, kadar air, dan aktivitas air. Hasil perhitungan Nr total menunjukkan bahwa konsentrasi ozon terbaik adalah 4 ppm (a_3), sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 19.

Tabel 19. Nilai Hasil (Nr) Total Pengaruh Konsentrasi Ozon terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Beras Merah Pecah Kulit

Perlakuan	Konsentrasi Ozon	N. Total (Nr)
a1	0 ppm	0,45
a2	2 ppm	0,32
a3	4 ppm	0,80
a4	6 ppm	0,25
a5	8 ppm	0,29

Perlakuan 4 ppm unggul pada tujuh dari sepuluh parameter yang diuji. Pada *setback viscosity* (bobot tertinggi), *setback viscosity* merupakan parameter RVA yang paling berkorelasi dengan tekstur nasi matang, dengan nilai yang lebih rendah mengindikasikan laju retrogradasi yang lebih lambat sehingga tekstur nasi menjadi

lebih lunak dan tidak mudah mengeras setelah proses pemasakan dan pendinginan. *International Rice Research Institute* (IRRI) turut menyatakan bahwa setback berkorelasi dengan tingkat kekerasan (firmness) nasi matang, di mana nilai yang lebih rendah mengindikasikan nasi yang lebih pulen.

Peak dan *trough viscosity* pada 4 ppm merupakan yang tertinggi, menunjukkan kapasitas swelling granula yang optimal serta ketahanan terhadap panas dan gaya geser (Kaur *et al.*, 2023). *Breakdown viscosity* yang turut tertinggi merupakan konsekuensi dari kapasitas swelling tersebut, bukan indikasi ketidakstabilan (Kong *et al.*, 2015; An & King, 2009). *Final viscosity* terendah pada 4 ppm merupakan konsekuensi langsung dari setback yang rendah, memperkuat indikasi pasta pati yang stabil selama pendinginan. *Pasting temperature* tertinggi menunjukkan ikatan hidrogen dan struktur kristalin granula masih relatif kokoh (Batey, 2007). Kadar antosianin tertinggi pada 4 ppm disebabkan meningkatnya permeabilitas dinding sel akibat oksidasi ringan, mempermudah ekstraksi antosianin dari matriks sel (Sarron *et al.*, 2021).

Sementara itu, kadar pati pada 4 ppm tidak mencapai nilai efektivitas maksimum karena mengalami penurunan akibat oksidasi gugus hidroksil pati menjadi gugus karbonil dan karboksil oleh ozon (Chan *et al.*, 2009), namun nilainya masih relatif tinggi dibandingkan konsentrasi 6 dan 8 ppm. Kadar air dan aktivitas air diberikan bobot terendah karena hasil analisis variansi menunjukkan keduanya tidak berpengaruh nyata ($P > 0,05$) antar perlakuan, sehingga bukan pembeda utama dalam penentuan perlakuan terbaik.

Berdasarkan akumulasi kesepuluh parameter tersebut, konsentrasi ozon 4 ppm memperoleh Nilai Hasil total tertinggi (0,80) dan dipilih sebagai konsentrasi ozon optimum dalam memodifikasi karakteristik fisik dan kimia beras merah pecah kulit, konsisten dengan hasil pembahasan RVA, XRD, dan kadar pati sebelumnya.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

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

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, maka dapat disimpulkan:

1. Pengaruh konsentrasi ozon yang berbeda berpengaruh nyata ($p < 0,05$) terhadap kadar pati dan kadar antosianin dan profil gelatinisasi pati, namun tidak berpengaruh nyata ($p > 0,05$) terhadap kadar air dan aktivitas air (a_w).
2. Karakterisasi menggunakan XRD, FTIR, dan SEM menunjukkan bahwa ozon mampu memodifikasi struktur pati melalui mekanisme oksidasi. Modifikasi tersebut ditunjukkan oleh penurunan kristalinitas, terbentuknya gugus karbonil, serta perubahan morfologi granula pati tanpa mengubah struktur kristal utama pati tipe A.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut.

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan mengenai efektivitas ozon sebagai teknologi pengawetan pascapanen terhadap beras merah pecah kulit dengan mengevaluasi perubahan kualitas mikrobiologis, umur simpan, serta stabilitas mutu selama penyimpanan pada berbagai kondisi penyimpanan.
2. Melakukan analisis *Differential Scanning Calorimetry* (DSC), ukuran distribusi granula pati (*particle size distribution*), kandungan amilosa dan amilopektin, sehingga mekanisme perubahan struktur pati akibat ozonisasi dapat dijelaskan secara lebih komprehensif.
3. Mengevaluasi pengaruh ozon terhadap karakteristik sensori, mutu gizi, daya cerna pati, aktivitas antioksidan, serta penerapan beras merah hasil ozonisasi sebagai bahan baku berbagai produk pangan, sehingga potensi pemanfaatannya pada skala industri dapat dikaji secara lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, G., & Rejeki, S. (2024). **Uji Fisik Dan Antioksidan Berbagai Jenis Beras Merah (*Oryza Nivara*) Asal Ereke Buton Utara** (Vol. 2, Number 1).
- Ali, A., Chiang, Y. W., & Santos, R. M. (2022). ***X-Ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization: A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions***. *Minerals*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/min12020205>
- Amelia, D. W. (2016). **Pengamatan Scanning Electron Microscope (SEM) Pada Struktur Dan Mineral Batuan Dari Sungai Aranio Kabupaten Banjar**. *Jurnal Sains Dan Terapan Politeknik Hasnur*, Volume 04, Nomor 2.
- An, H. J., & King, J. M. (2009). ***Using ozonation and amino acids to change pasting properties of rice starch***. *Journal of Food Science*, 74(3). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01109.x>
- Anggraini, U. (2011). **Studi Sintesis Ozon dengan Metode Lucutan Plasma**. Jurusan Kimia Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Brawijaya Malang.
- Balet, S., Guelpa, A., Fox, G., & Manley, M. (2019). ***Rapid Visco Analyser (RVA) as a Tool for Measuring Starch-Related Physicochemical Properties in Cereals: a Review***. In *Food Analytical Methods* (Vol. 12, Number 10, pp. 2344–2360). Springer Science and Business Media, LLC. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01581-w>
- Banerjee, S., Ali, A., Qutub, M., Rana, S. S., Raut, P., Pandey, V. K., Mustafa, N., Borule, T., Dharavath, N., & Adhimoolam, K. (2025). ***Electron Microscopy Reveals Variation in Starch Granules in Rice Grains Related to Glycemic Index***. *Processes*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/pr13103241>
- Bao, J. (2019). *Rice Chemistry and Technology*. Elsevier.
- Bertoft, E. (2017). ***Understanding Starch Structure: Recent Progress***. In *Agronomy* (Vol. 7, Number 3). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/agronomy7030056>
- Castanha, N., Matta Junior, M. D. da, & Augusto, P. E. D. (2017). ***Potato Starch Modification Using The Ozone Technology***. *Food Hydrocolloids*, 66, 343–356. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.12.001>
- Çatal, H. (2015). ***Effects of Semicontinuous and Batch System Ozonation on Wheat and Corn Starches***. *Ozone: Science & Engineering*, 37(1), 71–77. <https://doi.org/10.1080/01919512.2014.913472>
- Chan, H. T., Bhat, R., & Karim, A. A. (2009). ***Physicochemical and Functional Properties of Ozone-Oxidized Starch***. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(13), 5965–5970. <https://doi.org/10.1021/jf9008789>

- Chan, H. T., Leh, C. P., Bhat, R., Senan, C., Williams, P. A., & Karim, A. A. (2011). ***Molecular structure, rheological and thermal characteristics of ozone-oxidized starch.*** *Food Chemistry*, 126(3), 1019–1024. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.11.113>
- Chen, J. J., Lii, C. Y., & Lu, S. (2003). ***Physicochemical and morphological analyses on damaged rice starches.*** *Journal of Food and Drug Analysis*, 11(4), 283–289. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2684>
- Chen, X. Q., Nagao, N., Itani, T., & Irifune, K. (2012). ***Anti-oxidative analysis, and identification and quantification of anthocyanin pigments in different coloured rice.*** *Food Chemistry*, 135(4), 2783–2788. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.06.098>
- Cullen, P. J., Tiwari, B. K., O'Donnell, C. P., & Muthukumarappan, K. (2009). ***Modelling approaches to ozone processing of liquid foods.*** *Trends in Food Science & Technology*, 20(3–4), 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.01.049>
- Damayanthi E, Tjing, L., & Arbianto, L. (2007). ***Rice Bran.*** Penebar Swadaya.
- Du, M., Chen, L., Din, Z., Liu, X., Chen, X., Wang, Y., Zhuang, K., Zhu, L., & Ding, W. (2024). ***Ozone induced structural variation in OSA waxy rice starch: Effects on the thermal behavior of starch and its stabilized pickering emulsion.*** *Food Chemistry: X*, 23, 101701. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101701>
- El-desouky, T. A. (2025). ***Evaluation of ozonated and ultrasonically treated corn starch as an adsorbent for patulin in buffer solutions.*** *Scientific Reports*, 15(1), 2264. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85108-w>
- Farooq, M. A., & Yu, J. (2025). ***Starches in Rice: Effects of Rice Variety and Processing/Cooking Methods on Their Glycemic Index.*** In *Foods* (Vol. 14, Number 12). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/foods14122022>
- Gozé, P., Rhazi, L., Lakhal, L., Jacolot, P., Pauss, A., & Aussenac, T. (2017). ***Effects of ozone treatment on the molecular properties of wheat grain proteins.*** *Journal of Cereal Science*, 75, 243–251. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.04.016>
- Hasnelly, H., Fitriani, E., Ayu, S. P., & Hervelly, H. (2020). ***Pengaruh Drajat Penyosohan terhadap Mutu Fisik dan Nilai Gizi Beberapa Jenis Beras.*** *AgriTECH*, 40(3), 182. <https://doi.org/10.22146/agritech.47487>
- Hernawan, E., & Meylani, V. (2016). ***Analisis Karakteristik Fisikokimia Beras Putih, Beras Merah, Dan Beras Hitam (Oryza sativa L., Oryza nivara dan Oryza sativa L. indica).*** *Jurnal Kesehatan Bakti Tunas Husada*.
- Ilham, T. M. (2020). ***Analisis X-Ray Diffraction (XRD) Pada Brazing Aluminium Seri 1000 Dan Stainless Steel Seri 304 Dengan Penambahan Serbuk Tembaga.***
- Ishikawa, D., Yang, J., Ichikawa, C., & Fujii, T. (2021). ***Evaluation of solid state of rice flours produced by different milling processes using ATR-FTIR spectroscopy.***

- Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 85(5), 1056–1062.
<https://doi.org/10.1093/bbb/zbab003>
- Jiang, J., Li, J., Han, W., Yang, Q., Liu, Q., Xiao, H., Lin, Q., & Fang, Y. (2022). *Effects of Reheating Methods on Rheological and Textural Characteristics of Rice Starch with Different Gelatinization Degrees*. *Foods*, 11(21), 3314.
<https://doi.org/10.3390/foods11213314>
- Juliano, B. O. (1972). *Para caryopsis beras dan komposisinya*. *Beras Kimia Dan Teknologi*. Amer. Assoc. Sereal Kimiawan (AACC).
- Karuppuchamy, V., Heldman, D. R., & Snyder, A. B. (2024). *A review of food safety in low-moisture foods with current and potential dry-cleaning methods*. *Journal of Food Science*, 89(2), 793–810. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16920>
- Kaur, K., Kaur, P., Kumar, S., Zalpouri, R., & Singh, M. (2023). *Ozonation as a Potential Approach for Pesticide and Microbial Detoxification of Food Grains with a Focus on Nutritional and Functional Quality*. In *Food Reviews International* (Vol. 39, Number 9, pp. 6129–6161). Taylor and Francis Ltd.
<https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2092129>
- Khadre, M. A., Yousef, A. E., & Kim, J.-G. (2001). *Microbiological Aspects of Ozone Applications in Food: A Review*. In *1242 Journal Of Food Science* (Vol. 66, Number 9).
- Kong, X., Zhu, P., Sui, Z., & Bao, J. (2015). *Physicochemical properties of starches from diverse rice cultivars varying in apparent amylose content and gelatinisation temperature combinations*. *Food Chemistry*, 172, 433–440.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.085>
- Kristamtini, Taryono, Basunanda, P. and Murti, R.H. (2014). *Keragaman genetic dan korelasi parameter warna beras dankandungan antosianin total sebelas kultivar padi beras hitam lokal*. *Jurnal Ilmu Pertanian* 1(17):90–103
- Kusumaningtyas, N. (2004). *Pendugaan Kadar Air, Karbohidrat, Protein, Lemak dan Amilosa Pada Beras (Oryza sativa L.) dengan Teknologi Near Infrared*. Institut Pertanian Bogor.
- Lang, S., Sui, C., & Wang, L. (2025). *Recent development in ozone-based starch modification: From generation methods to film applications*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 309, 142780.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.142780>
- Li, J., Du, M., Din, Z. ud, 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>
- Liu, J., Liu, Y., Wang, A., Dai, Z., Wang, R., Sun, H., Strappe, P., & Zhou, Z. (2021). *Characteristics of moisture migration and volatile compounds of rice stored*

- under various storage conditions.** *Journal of Cereal Science*, 102, 103323. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103323>
- Lončarić, P., Jukić, M., Cozmuta, A. M., Cozmuta, L. G. M., Uivarasan, A. M., Pichler, A., Lučan Čolić, M., & Lukinac, J. (2026). **FTIR-Based Study of Starch Retrogradation and Protein Structure in Chickpea-Enriched Gluten-Free Bread During Storage.** *Foods*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/foods15030412>
- Lu, H., Ma, R., Chang, R., & Tian, Y. (2021). **Evaluation of starch retrogradation by infrared spectroscopy.** *Food Hydrocolloids*, 120, 106975. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106975>
- Malaiyandi, M., & Natarajan, M. (2014). **Impact of Ozone on Morphological, Physiological, and Biochemical Changes in Cow Pea (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.).** *Ozone: Science and Engineering*, 36(1), 36–42. <https://doi.org/10.1080/01919512.2013.824817>
- Maqbool, N., Dar, A. H., Kumar Dash, K., Srivastava, S., Pandey, V. K., Shams, R., Aga, M. B., Majeed, T., & Manzoor, S. (2024). **Ozonation effects on structural and functional characteristics of starch.** *Future Foods*, 9, 100334. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100334>
- Muchtadi, T. R. (2015). *Ilmu Pengetahuan Bahan Pangan*. Alfabeta.
- Nastasi, J. R., Alagappan, S., & Cozzolino, D. (2025). **The Combination of Machine Learning Tools with the Rapid Visco Analyser (RVA) to Enhance the Analysis of Starchy Food Ingredients and Products.** In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 15, Number 6). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/app15063376>
- Novita, G., Supriadi, D., & Fatmawati, fenti. (2021). **Artikel Review: Pengaruh Perlakuan Pada Pati Sebagai Superdisintegran Terhadap Waktu Hancur Fast Disintegrating Tablet.** *Indonesia Natural Research Pharmaceutical Journal*, No. 1 Vol. 6, 58–75.
- Pandiselvam, R., Mayookha, V. P., Kothakota, A., Sharmila, L., Ramesh, S. V., Bharathi, C. P., Gomathy, K., & Srikanth, V. (2020). **Impact of Ozone Treatment on Seed Germination – A Systematic Review.** *Ozone: Science & Engineering*, 42(4), 331–346. <https://doi.org/10.1080/01919512.2019.1673697>
- Pang, Y., Ali, J., Wang, X., Franje, N. J., Revilleza, J. E., Xu, J., & Li, Z. (2016). **Relationship of rice grain amylose, gelatinization temperature and pasting properties for breeding better eating and cooking quality of rice varieties.** *PLoS ONE*, 11(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168483>
- Pasaribu, S. F., Wiboworini, B., & Kartikasari, L. R. (2021). **Analisis Antosianin Dan Flavonoid Ekstrak Kecambah Beras Hitam Analysis of Anthocyanins and Flavonoids in Germinated Black Rice Extract.** 4(1), 8–14.

- Pratiwi, M., M. Legowo, A., & Pratama, Y. (2019). **Pengaruh Oksidasi Menggunakan Ozon Terhadap Sifat Fisik Pati.** *Jurnal Teknologi Pangan, Universitas Diponegoro*, 5(1), 24–26. www.ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/tekpangan.
- Rifna, E. J., Dwivedi, M., & Chauhan, O. P. (2022). **Role of Water Activity in Food Preservation.** In *Advances in Food Chemistry* (pp. 39–64). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4796-4_2
- Rodarte Sanchez, D., Jespersen, B. M., Rasmussen, L. H., & Andersen, M. L. (2025). **Impact of Gaseous Ozone on Fungal Control and Grain Germination in Various Cereals.** *Ozone: Science and Engineering*, 47(4), 353–365. <https://doi.org/10.1080/01919512.2025.2461461>
- Šárka, E., Sinica, A., Smrčková, P., & Sluková, M. (2023). **Non-Traditional Starches, Their Properties, and Applications.** In *Foods* (Vol. 12, Number 20). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/foods12203794>
- Sarron, E., Gadonna-Widehem, P., & Aussenac, T. (2021). **Ozone treatments for preserving fresh vegetables quality: A critical review.** In *Foods* (Vol. 10, Number 3). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/foods10030605>
- Satmalawati, E. M., Pranoto, Y., Marseno, D. W., & Marsono, Y. (2020). **Oxidation of cassava starch at different dissolved ozone concentration: Effect on functional and structural properties.** *Food Research*, 4(6), 1896–1904. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.4\(6\).209](https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(6).209)
- Setiabudi, A., Hardian, R., Mudzakir, A., Material, K., & Muzakir, A. (2012). **Karakterisasi Material; Prinsip dan Aplikasinya dalam Penelitian Kimia.**
- Shah, N. N. A. K., Rahman, R. A., Chuan, L. T., & Hashim, D. M. (2011). **Application Of Gaseous Ozone To Inactivate Bacillus Cereus In Processed Rice.** *Journal of Food Process Engineering*, 34(6), 2220–2232. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2009.00566.x>
- 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>
- Shi, S., Wang, E., Li, C., Cai, M., Cheng, B., Cao, C., & Jiang, Y. (2022). **Use of Protein Content, Amylose Content, and RVA Parameters to Evaluate the Taste Quality of Rice.** *Frontiers in Nutrition*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.758547>
- Shoukat, R., Cappai, M., Pilia, L., & Pia, G. (2025). **Rice Starch Chemistry, Functional Properties, and Industrial Applications: A Review.** In *Polymers* (Vol. 17, Number 1). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/polym17010110>

- Silverstein, R. M., & Bassler, G. C. (1962). ***Spectrometric identification of organic compounds***. *Journal of Chemical Education*, 39(11), 546. <https://doi.org/10.1021/ed039p546>
- Suarti, B., Rahman, M. H., Fuadi, M., & Setiavani, G. (2024). **Sifat Fisikokimia Beras Pecah Kulit dan Beras Sosoh pada Beberapa Varietas**. *Jurnal Pangan : I – 6*. Vol. 33.
- Subroto, E., Sitha, N., Filianty, F., Indiarto, R., & Sukri, N. (2022). ***Freeze Moisture Treatment and Ozonation of Adlay Starch (Coix lacryma-jobi): Effect on Functional, Pasting, and Physicochemical Properties***. *Polymers*, 14(18), 3854. <https://doi.org/10.3390/polym14183854>
- Sumartini, Hasnelly, & Sarah. (2018). **Kajian Peningkatan Kualitas Beras Merah (Oryza Nivara) Instan Dengan Cara Fisik**. *Pasundan Food Technology Journal*, Volume 5, No.1.
- Syafarudin, A., & Novia. (2013). **Produksi ozon dengan bahan baku oksigen menggunakan alat ozon generator**. *Jurnal Teknik Kimia*, NO.2 Vol.19.
- Wang, T., She, N., Wang, M., Zhang, B., Qin, J., Dong, J., Fang, G., & Wang, S. (2021). ***Changes in physicochemical properties and qualities of red brown rice at different storage temperatures***. *Foods*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/foods10112658>
- Wani, A. A., Singh, P., Shah, M. A., Schweiggert-Weisz, U., Gul, K., & Wani, I. A. (2012). ***Rice Starch Diversity: Effects on Structural, Morphological, Thermal, and Physicochemical Properties-A Review***. In *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* (Vol. 11, Number 5, pp. 417–436). <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2012.00193.x>
- Wei, L., Ma, F., & Du, C. (2021). ***Application of ftir-pas in rapid assessment of rice quality under climate change conditions***. *Foods*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/foods10010159>
- Yusuf, B., Warsito, A., Syakur, A., & Widiassa, N. (2008). **Aplikasi Pembangkit Tegangan Tinggi Impuls Untuk Pembuatan Reaktor Ozon**.
- Zahra, N., & Jabeen, S. (2020). ***Brown Rice as Useful Nutritional Source***. In *Pakistan Journal of Agricultural Research* (Vol. 33, Number 3, pp. 445–453). ResearchersLinkLtd. <https://doi.org/10.17582/journal.pjar/2020/33.3.445.453>
- Zahro, F., Ratnawati, L., & Budiati, T. (2025). ***The Effect of Ozonation on Microbial Growth in Sorghum Noodles***. *JOFE : Journal of Food Engineering | E-ISSN*, 4(4), 189–199. <https://doi.org/10.25047/jofe.v4i4.6005>
- Zhao, M., Xiao, X., Jin, D., Zhai, L., Li, Y., Yang, Q., Xing, F., Qiao, W., Yan, X., & Tang, Q. (2025). ***Composition and Biological Activity of Colored Rice—A Comprehensive Review***. In *Foods* (Vol. 14, Number 8). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/foods14081394>

LAMPIRAN

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

Cawan porselen dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C selama 1 jam dan didinginkan dalam desikator kemudian ditimbang hingga mendapat berat konstan. Sebanyak 2 gram sampel dimasukkan ke dalam cawan kemudian dikeringkan dalam oven dengan suhu 105 °C lalu dimasukkan ke dalam desikator sampai beratnya konstan. Kadar air dihitung dengan rumus :

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

Keterangan : W_0 = Berat cawan kosong (g)

W_1 = Berat cawan dan sampel sebelum dikeringkan (g)

W_2 = Berat cawan dan sampel setelah dikeringkan (g)

Lampiran 2. Analisis Kadar Pati Metode Luff Schrool (AOAC, 1970)

Sampel sebanyak 0,5 gram ditimbang dan dimasukan kedalam erlenmeyer 500 mL, lalu ditambahkan dengan 200 mL aquadest dan 15 mL HCl pekat. Lalu panaskan selama 2,5 jam (jaga volume tetap 200 mL dengan penambahan aquadest). Setelah dipanaskan kemudian dinginkan di air mengalir tambahkan indikator phenoftalin dan NaOH 30% hingga warna merah muda (jika berlebihan NaOH dinetralkan dengan HCl 9,5 N. Kemudian pindahkan dalam labu takar 500 ml dan tanda bataskan dengan aquadest (larutan sampel C). Dari larutan sampel C dipipet sebanyak 10 ml masukkan dalam erlenmeyer, ditambahkan 15 ml aquadest dan 10 ml reagen Luff Schoorl. Direfluks selama 15 menit, lalu dinginkan di air mengalir. Setelah dingin tambahkan 15 ml H₂SO₄ dan 1 gram KI. Kemudian dititrasi dengan Na₂S₂O₃ 0,1 N hingga warna kuning mentah (pucat) atau kuning jerami kemudian tambakan 1 ml amylum 1 % homogenkan dan dititrasi kembali menggunakan Na₂S₂O₃ 0,1 N hingga titik akhir titrasi larutan biru hilang atau berwarna putih. Kadar pati dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut.

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

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

mg1 = Massa glukosa dalam tabel pada baris atas (nilai lebih kecil)

mg2 = Massa glukosa dalam tabel pada baris bawah (nilai lebih besar)

V1 = Volume Tio dalam tabel pada baris atas (nilai lebih kecil)

V2 = Volume Tio dalam tabel pada baris bawah (nilai lebih besar)

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

Keterangan:

FP = Faktor pengencer

0,9 = Faktor Konversi

Lampiran 3. Analisis Antosianin menggunakan Metode pH *Differential* (Pasaribu et al., 2021)

Prosedur :

1. Ekstrak kecambah 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:

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

Rumus perhitungan Kadar antosianin Total

$$Total\ antosianin\ \left(\frac{mg}{g}\right) = \frac{A \times BM \times DF \times V \times 1000}{\epsilon \times L \times W}$$

Keterangan

A = Absorbansi larutan

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

DF = *Dilution factor* (faktor pengenceran)

V = Volume larutan induk sampel (mL)

W = berat ekstrak sampel (gram)

ϵ = Absorptivitas molar *cyanidin-3-glucoside* (26.900)

L = Tebal kuvet = 1

Lampiran 4. Analisis Nilai Aktivitas Air (a_w)

Sebanyak 1gram sampel minuman instan ditempatkan dalam wadah uji dan ditunggu hingga 5 menit. Secara otomatis alat tersebut akan menghitung nilai a_w minuman instan. Proses pengukuran selesai setelah angka keluar yang menyatakan nilai a_w minuman instan.

Lampiran 5. Analisis Profil Gelatinisasi Pati Metode *Rapid Visco Analyzer* (RVA) (Munarko et al., 2022)

Profil penempelan tepung beras merah dilakukan secara berulang menggunakan Rapid Visco Analyzer (RVA) (Tec-Master, Newport Scientific, Australia). Sampel (3,0 g, kadar air 14%) diencerkan dalam 25 g air suling, dilanjutkan dengan siklus pemanasan dan pendinginan dengan pengadukan konstan. Sampel dipanaskan pada suhu 50 °C selama 1 menit sebelum dipanaskan hingga suhu 95 °C pada laju 6 °C/menit dan dipertahankan selama 5 menit. Suhu

diturunkan menjadi 50 °C pada laju 6 °C/menit dan kemudian dipertahankan pada suhu 50 °C selama 5 menit.

Lampiran 6. Analisis Gugus Fungsi Metode *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

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.

Lampiran 7. Analisis Struktur Kristalin Pati Metode XRD (X-Ray Diffractometer)

Analisis menggunakan instrument X-Ray Diffractometer (XRD) bertujuan untuk mengidentifikasi fasa kristal yang berbeda dalam suatu sampel, seperti eral dalam batuan atau senyawa dalam material. Adapun langkah-langkah yang Alakukan adalah sebagai berikut:

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 di bagian goniometer.
3. Memasukkan 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).

Lampiran 8. Analisis Morfologi Permukaan Metode *Scanning Electron Microscope* (SEM) (Rohmah et al., 2022)

Scanning Electron Microscopy (SEM) dilakukan untuk analisis mikroskopis produk. Sampel diletakkan dan ditempel di atas SEM spesimen holder dengan menggunakan double tape karbon dengan bagian penampang lintang mengarah vertikal ke atas atau menghadap lensa objektif. SEM dioperasikan dengan standar parameter operasi sebagai berikut: tegangan 20 kV, ukuran titik 50, dan jarak kerja setinggi 10 mm. Jarak 10 mm dipilih sebagai kompromi terhadap setingan untuk akuisisi sinyal sehingga pendeteksian X-Ray dan pencacahannya optimal. Sampel yang diuji SEM hanya sampel dengan rendemen tertinggi dan kemurnian tertinggi.

Lampiran 9. Perhitungan Kebutuhan Sampel, Kebutuhan Bahan Penelitian, dan Rancangan Anggaran Biaya Penelitian

Tabel 20. Perhitungan Kebutuhan Sampel

No.	Analisis	Berat Sampel (gram)	Banyaknya	Jumlah (gram)
1.	Uji Kadar Air	2	15	30
2.	Uji Kadar Pati	1	15	15
3.	Uji Kadar Antosianin	5	15	75
4.	Uji Aktivitas Air (a_w)	2	15	30
5.	RVA	5	15	75
6.	FTIR	5	5	25
7.	XRD	5	5	25
8.	SEM	5	5	25
Total				300

Lampiran 10. Hasil Analisis Kadar Air Beras Merah Pecah Kulit

Tabel 21. Hasil Data Analisis Uji Kadar Air

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan Kadar Air			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm	11,29	11,18	11,31	33,78	11,26	0,07
2 ppm	11,29	11,58	11,39	34,25	11,42	0,15
4 ppm	11,23	11,81	11,39	34,43	11,48	0,30
6 ppm	11,07	12,19	11,48	34,73	11,58	0,57
8 ppm	11,25	11,38	11,29	33,92	11,31	0,06
Jumlah	56,13	58,13	56,85	171,12		
Rata Rata	11,23	11,63	11,37			

Perhitungan ANAVA Analisis Kadar Air:

$$FK = \frac{(Total)^2}{\sum Ulangan \times \sum Sampel} = 1952,079$$

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

$$= \frac{(56,13)^2 + (58,13)^2 + (56,85)^2}{5} - 1952,079$$

$$= 0,4100737$$

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

$$= \frac{(33,78)^2 + (34,25)^2 + (34,43)^2 + (34,73)^2 + (33,92)^2}{5} - 1952,079$$

$$= 0,1977926$$

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

$$= ((11,29)^2 + (11,18)^2 + \dots + (11,29)^2) - 1952,079$$

$$= 1,082$$

$$JKG = JKT - JKP - JKK$$

$$= 1,082 - 0,1977926 - 0,4100737$$

$$= 0,4739764$$

Tabel 22. Analisis Variansi (ANAVA) Kadar Air

Sumber Variansi	Derajat Bebas	Jumlah Kuadrat	Kuadrat Tengah	F Hitung	F Tabel 5%	Notasi
Kelompok	2	0,41007	0,20504	3,46071	4,46	tn
Perlakuan	4	0,19779	0,04945	0,83461	3,84	tn
Galat	8	0,47398	0,05925			
Total	14	1,08184				

Keterangan: * = Berpengaruh

tn= Tidak Berpengaruh

Kesimpulan: Berdasarkan tabel ANAVA analisis kadar air memiliki nilai F hitung $\leq$ F tabel pada taraf 5% dan dinyatakan konsentrasi ozon tidak berpengaruh nyata pada beras merah pecah kulit sehingga tidak diperlukan uji lanjut Duncan.

Lampiran 11. Hasil Analisis Kadar Pati Beras Merah Pecah Kulit

Tabel 23. Hasil Data Kadar Pati

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan Kadar Pati			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	65,86	65,15	66,45	197,46	65,82	0,65
2 ppm (a2)	62,81	63,12	62,07	187,99	62,66	0,54
4 ppm (a3)	58,32	59,72	58,61	176,66	58,89	0,74
6 ppm (a4)	56,00	56,34	55,01	167,35	55,78	0,69
8 ppm (a5)	56,39	56,51	58,73	171,63	57,21	1,32
Jumlah	299,39	300,83	300,88	901,10		
Rata Rata	59,88	60,17	60,18			

Perhitungan ANAVA Analisis Kadar Pati:

$$FK = \frac{(Total)^2}{\sum Ulangan \times \sum Sampel} = 54132,07$$

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

$$= \frac{(299,39)^2 + (300,83)^2 + (300,88)^2}{5} - 54132,07$$

$$= 0,288$$

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

$$= \frac{(197,46)^2 + (187,99)^2 + (176,66)^2 + (167,35)^2 + (171,63)^2}{3} - 54132,07$$

$$= 203.268$$

$$\begin{aligned} \text{JKT} &= ((n_1)^2 + (n_2)^2 + \dots + (n_n)^2) - FK \\ &= ((65,86)^2 + (65,15)^2 + \dots + (58,73)^2) - 54132,07 \\ &= 210.230 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{JKG} &= \text{JKT} - \text{JKP} - \text{JKK} \\ &= 210.230 - 203.268 - 0.288 \\ &= 6.674 \end{aligned}$$

Tabel 24. Analisis Variansi (ANAVA) Kadar Pati

Sumber Variansi	Derajat Bebas	Jumlah Kuadrat	Kuadrat Tengah	F Hitung	F Tabel	Notasi
Kelompok	2	0.288	0.144	0.173	4.46	tn
Perlakuan	4	203.268	50.817	60.911	3.84	*
Galat	8	6.674	0.834			
Total	14	210.230				

Keterangan: * = Berpengaruh

tn= Tidak Berpengaruh

Kesimpulan: Berdasarkan tabel ANAVA analisis kadar pati memiliki nilai F hitung $\geq$ F tabel pada taraf 5% dan dinyatakan konsentrasi ozon berpengaruh nyata pada beras merah pecah kulit sehingga diperlukan uji lanjut Duncan.

Tabel 25. Uji Lanjut Duncan Analisis Kadar Pati

$$S_y = \sqrt{\frac{\text{KTG}}{r}} = 0,527$$

SSR 5%	LSR%	Rata-rata	Kode	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	55,78	a4	-	-	-	-		a
3,26	1,71915	57,21	a5	1,43 ^{tn}	-				ab
3,39	1,78770	58,89	a3	3,10*	1,68 ^{tn}	-			b
3,47	1,82989	62,66	a2	6,88*	5,45*	3,78*	-		c
3,52	1,85626	65,82	a1	10,04*	8,61*	6,93*	3,16*	-	d

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan:

Berdasarkan hasil uji lanjut Duncan pada taraf nyata 5%, kode perlakuan a5 tidak berbeda nyata dengan kode perlakuan a4, tetapi berbeda nyata dengan kode perlakuan a3, a2, dan a1. Kode perlakuan a4 tidak berbeda nyata dengan kode perlakuan a5 dan a3, tetapi berbeda nyata dengan kode perlakuan a2 dan a1. Kode perlakuan a3 tidak berbeda nyata dengan kode perlakuan a4, tetapi berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, 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 12. Hasil Analisis Aktivitas Air (a_w) Beras Merah Pecah Kulit

Tabel 26. Hasil Data Aktivitas Air (a_w)

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan A_w			Jumlah	Rata-rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	0,735	0,775	0,775	2,285	0,762	0,023
2 ppm (a2)	0,742	0,732	0,788	2,262	0,754	0,030
4 ppm (a3)	0,729	0,759	0,744	2,232	0,744	0,015
6 ppm (a4)	0,757	0,727	0,742	2,226	0,742	0,015
8 ppm (a5)	0,724	0,758	0,791	2,273	0,758	0,034
Jumlah	3,687	3,751	3,840	11,278		
Rata-rata	0,737	0,750	0,768			

Perhitungan ANAVA Analisis Aktivitas Air:

$$FK = \frac{(Total)^2}{\sum Ulangan \times \sum Sampel} = 8,479552$$

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

$$= \frac{(3,687)^2 + (3,751)^2 + (3,840)^2}{5} - 8,479552$$

$$= 0,002362$$

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

$$= \frac{(2,285)^2 + (2,262)^2 + (2,232)^2 + (2,226)^2 + (2,273)^2}{3} - 8,479552$$

$$= 0,0008804$$

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

$$= ((0,735)^2 + (0,775)^2 + \dots + (0,791)^2) - 8,479552$$

$$= 0,006875733$$

$$\text{JKG} = \text{JKT} - \text{JKP} - \text{JKK}$$

$$= 0,006875733 - 0,0008804 - 0,002362$$

$$= 0,0036336$$

Tabel 27. Analisis Variansi (ANAVA) Aktivitas Air (a_w)

Sumber Variansi	Derajat Bebas	Jumlah Kuadrat	Kuadrat Tengah	F Hitung	F Tabel 5%	Notasi
Kelompok	2	0,00236	0,00118	2,59988	4,46	tn
Perlakuan	4	0,00088	0,00022	0,48459	3,84	tn
Galat	8	0,00363	0,00045			
Total	14	0,00688				

Keterangan: * = Berpengaruh

tn= Tidak Berpengaruh

Kesimpulan: Berdasarkan tabel ANAVA analisis aktivitas air (a_w) memiliki nilai F hitung $\leq$ F tabel pada taraf 5% dan dinyatakan konsentrasi ozon tidak berpengaruh nyata pada beras merah pecah kulit sehingga tidak diperlukan uji lanjut Duncan.

Lampiran 13. Hasil Analisis Kadar Antosianin Beras Merah Pecah Kulit

$$A = (A_{510} - A_{700})1,0 - (A_{510} - A_{700})4,5$$

$$= (1,143 - 0,967) - (0,724 - 0,647)$$

$$= 0,100$$

$$\text{Total antosianin} \left(\frac{\text{mg}}{100\text{g}} \right) = \frac{A \times \text{BM} \times \text{DF} \times \text{V} \times 100}{\epsilon \times \text{L} \times \text{W}}$$

$$\text{Total antosianin} \left(\frac{\text{mg}}{100\text{g}} \right) = \frac{0,100 \times 449,2 \times 10 \times 100 \times 100}{26.900 \times 1 \times 5}$$

$$= 33,33 \text{ mg/100g}$$

Tabel 28. Hasil Perhitungan Nilai Absorban Kadar Antosianin

Kode Sampel	Ulangan	pH 1		pH 4,5		Nilai (A)	Kadar Antosianin
		Abs 510	Abs 700	Abs 510	Abs 700		
0 ppm (a1)	1	1,143	0,967	0,724	0,647	0,100	33,33
	2	1,176	0,978	0,726	0,637	0,109	36,40
	3	1,172	0,995	0,728	0,650	0,098	32,80
2 ppm (a2)	1	0,896	0,563	0,957	0,769	0,145	48,36
	2	0,894	0,561	0,959	0,760	0,133	44,55
	3	0,888	0,562	0,956	0,758	0,127	42,52
4 ppm (a3)	1	1,089	0,887	0,919	0,881	0,164	54,61
	2	1,084	0,893	0,920	0,878	0,149	49,76
	3	1,083	0,894	0,931	0,875	0,133	44,32
6 ppm (a4)	1	0,753	0,617	0,392	0,324	0,069	22,98
	2	0,754	0,609	0,396	0,323	0,071	23,58
	3	0,735	0,608	0,395	0,323	0,056	18,54
8 ppm (a5)	1	0,400	0,269	0,386	0,354	0,099	33,20
	2	0,403	0,264	0,384	0,351	0,106	35,27
	3	0,411	0,263	0,389	0,353	0,112	37,47

Tabel 29. Hasil Data Analisis Kadar Antosianin

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan Kadar Antosianin			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm (a1)	33,33	36,40	32,80	102,53	34,18	1,95
2 ppm (a2)	48,36	44,55	42,52	135,43	45,14	2,97
4 ppm (a3)	54,61	49,76	44,32	148,69	49,56	5,15
6 ppm (a4)	22,98	23,58	18,54	65,09	21,70	2,75
8 ppm (a5)	33,20	35,27	37,47	105,94	35,31	2,14
Jumlah	192,47	189,57	175,64	557,68		
Rata Rata	38,49	37,91	35,13			

Perhitungan ANAVA Analisis Kadar Antosianin:

$$FK = \frac{(Total)^2}{\sum Ulangan \times \sum Sampel} = 20733,5$$

$$\begin{aligned} JKK &= \frac{(\sum K1)^2 + (\sum K2)^2 + (\sum K3)^2}{\sum Sampel} - FK \\ &= \frac{(192,47)^2 + (189,57)^2 + (175,64)^2}{5} - 20733,5 \\ &= 32,38216624 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} JKP &= \frac{(\sum a1)^2 + (\sum a2)^2 + (\sum a3)^2 + (\sum a4)^2 + (\sum a5)^2}{\sum Ulangan} - FK \\ &= \frac{(102,53)^2 + (135,43)^2 + (148,69)^2 + (65,09)^2 + (105,94)^2}{3} - 20733,5 \\ &= 1406,820761 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} JKT &= ((n_1)^2 + (n_2)^2 + \dots + (n_n)^2) - FK \\ &= ((33,33)^2 + (36,40)^2 + \dots + (37,47)^2) - 20733,5 \\ &= 1509,283159 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} JKG &= JKT - JKP - JKK \\ &= 1509,283159 - 1406,820761 - 32,38216624 \\ &= 70,08023263 \end{aligned}$$

Tabel 30. Analisis Variansi (ANAVA) Kadar Antosianin

Sumber Variansi	Derajat Bebas	Jumlah Kuadrat	Kuadrat Tengah	F Hitung	F Tabel 5%	Notasi
Kelompok	2	32,382166	16,191083	1,848291	4,46	tn
Perlakuan	4	1406,820761	351,705190	40,148861	3,84	*
Galat	8	70,080233	8,760029			
Total	14	1509,283159				

Keterangan: * = Berpengaruh

tn= Tidak Berpengaruh

Kesimpulan: Berdasarkan tabel ANAVA analisis kadar antosianin memiliki nilai F hitung $\geq$ F tabel pada taraf 5% dan dinyatakan konsentrasi ozon berpengaruh nyata pada beras merah pecah kulit sehingga tidak diperlukan uji lanjut Duncan.

Tabel 31. Uji Lanjut Duncan Analisis Kadar Antosianin

$$S_y = \sqrt{\frac{KTG}{r}} = 0,527$$

SSR 5%	LSR%	Rata- rata	Kode	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	21,70	a4						a
3,26	5,57070	34,18	a1	12,48*					b
3,39	5,79284	35,31	a5	13,62*	1,14 ^{tn}				b
3,47	5,929548	45,14	a3	23,45*	10,97*	9,83*			c
3,52	6,014989	49,56	a2	27,86*	15,39*	14,25*	4,42 ^{tn}	-	c

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan: Berdasarkan hasil uji lanjut Duncan pada taraf nyata 5%, kode perlakuan a4 berbeda nyata dengan kode perlakuan a1, a5, a3, dan a2. Kode perlakuan a1 tidak berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, tetapi berbeda nyata dengan kode perlakuan a4, a3, dan a2. Kode perlakuan a5 tidak berbeda nyata dengan kode perlakuan a1, tetapi berbeda nyata dengan kode perlakuan a4, a3, dan a2. Kode perlakuan a3 tidak berbeda nyata dengan kode perlakuan a2, tetapi berbeda nyata dengan kode perlakuan a4, a1, dan a5. Kode perlakuan a2 tidak berbeda nyata dengan kode perlakuan a3, tetapi berbeda nyata dengan kode perlakuan a4, a1, dan a5.

Lampiran 14. Hasil Data Analisis *Rapid Visco Analyzer* (RVA)

Tabel 32. Data *Peak Viscosity*

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan Peak 1			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm	141	144	138	423	141,00	3,00
2 ppm	177	181	174	532	177,33	3,51
4 ppm	344	351	338	1033	344,33	6,51
6 ppm	169	173	166	508	169,33	3,51
8 ppm	207	211	203	621	207,00	4,00
Jumlah	1038	1060	1019	3117		
Rata-rata	207,60	212,00	203,80			

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

Sumber Variansi	Derajat Bebas	Jumlah Kuadrat	Kuadrat Tengah	F Hitung	F Tabel	Notasi
Kelompok	2	168,400	84,200	43,179	4,46	*
Perlakuan	4	76536,400	19134,100	9812,359	3,84	*
Galat	8	15,600	1,950			
Total	14	76720,400				

Keterangan: * = Berpengaruh

tn= Tidak Berpengaruh

Kesimpulan: Berdasarkan tabel ANAVA *peak viscosity* memiliki nilai F hitung $\geq$ F tabel pada taraf 5% dan dinyatakan konsentrasi ozon berpengaruh nyata pada beras merah pecah kulit sehingga tidak diperlukan uji lanjut Duncan.

Tabel 34. Uji Lanjut Duncan *Peak Viscosity*

SSR 5%	LSR%	Rata-rata	Kode	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	141	a1						a
3,26	2,62830	169	a4	28,33*					b
3,39	2,73311	177	a2	36,33*	8,00*				c
3,47	2,797603	207	a5	66,00*	37,67*	29,67*			d
3,52	2,837915	344	a3	203,33*	175,00*	167,00	137,33*	-	e

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan: Berdasarkan uji lanjut Duncan pada taraf 5% dapat disimpulkan bahwa kode perlakuan a1 berbeda nyata dengan kode perlakuan a4, a2, a5, dan a3. Kode perlakuan a4 berbeda nyata dengan kode perlakuan a1, a2, a5, dan a3. Kode perlakuan a2 berbeda nyata dengan kode perlakuan a1, a4, a5, dan a3. Kode perlakuan a5 berbeda nyata dengan kode perlakuan a1, a4, a2, dan a3. Kode perlakuan a3 berbeda nyata dengan kode perlakuan a1, a4, a2, dan a5.

Tabel 35. Data *Trough Viscosity*

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan Trough 1			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm	70,00	72,00	69,00	211,00	70,33	1,53
2 ppm	142,00	145,00	140,00	427,00	142,33	2,52
4 ppm	213,00	217,00	209,00	639,00	213,00	4,00
6 ppm	137,00	140,00	135,00	412,00	137,33	2,52
8 ppm	165,00	168,00	162,00	495,00	165,00	3,00
Jumlah	727,00	742,00	715,00	2184,00		
Rata-rata	145,40	148,40	143,00			

Tabel 36. Analisis Variansi (ANOVA) *Trough Viscosity*

Sumber Variansi	Derajat Bebas	Jumlah Kuadrat	Kuadrat Tengah	F Hitung	F Tabel	Notasi
Kelompok	2	73,200	36,600	43,059	4,46	*
Perlakuan	4	31989,600	7997,400	9408,706	3,84	*
Galat	8	6,800	0,850			
Total	14	32069,600				

Keterangan: * = Berpengaruh

tn= Tidak Berpengaruh

Kesimpulan: Berdasarkan tabel ANOVA *trough viscosity* memiliki nilai F hitung $\geq$ F tabel pada taraf 5% dan dinyatakan konsentrasi ozon berpengaruh nyata pada beras merah pecah kulit sehingga tidak diperlukan uji lanjut Duncan.

Tabel 37. Uji Lanjut Duncan *Trough Viscosity*

SSR 5%	LSR %	Rata-rata	Kode	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	70,33	a1						a
3,26	1,73527	137,33	a4	67,00*					b
3,39	1,80447	142,33	a2	72,00*	5,00*				c
3,47	1,847049	165,00	a5	94,67*	27,67*	22,67*			d
3,52	1,873663	213,00	a3	142,67*	75,67*	70,67*	48,00*	-	e

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan: Berdasarkan uji lanjut Duncan pada taraf 5% dapat disimpulkan bahwa kode perlakuan a1 berbeda nyata dengan kode perlakuan a4, a2, a5, dan a3. Kode perlakuan a4 berbeda nyata dengan kode perlakuan a1, a2, a5, dan a3. Kode perlakuan a2 berbeda nyata dengan kode perlakuan a1, a4, a5, dan a3. Kode perlakuan a5 berbeda nyata dengan kode perlakuan a1, a4, a2, dan a3. Kode perlakuan a3 berbeda nyata dengan kode perlakuan a1, a4, a2, dan a5.

Tabel 38. Data *Breakdown*

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan Breakdown			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm	71,00	72,00	69,00	212,00	70,67	1,53
2 ppm	35,00	36,00	34,00	105,00	35,00	1,00
4 ppm	131,00	134,00	129,00	394,00	131,33	2,52
6 ppm	32,00	33,00	31,00	96,00	32,00	1,00
8 ppm	42,00	43,00	41,00	126,00	42,00	1,00
Jumlah	311,00	318,00	304,00	933,00		
Rata-rata	62,20	63,60	60,80			

Tabel 39. Analisis Variansi (ANOVA) *Breakdown*

Sumber Variansi	Derajat Bebas	Jumlah Kuadrat	Kuadrat Tengah	F Hitung	F Tabel	Notasi
Kelompok	2	19,600	9,800	21,000	4,46	*
Perlakuan	4	20733,067	5183,267	11107,000	3,84	*
Galat	8	3,733	0,467			
Total	14	20756,400				

Keterangan: * = Berpengaruh

tn= Tidak Berpengaruh

Kesimpulan: Berdasarkan tabel ANOVA *breakdown* memiliki nilai F hitung $\geq$ F tabel pada taraf 5% dan dinyatakan konsentrasi ozon berpengaruh nyata pada beras merah pecah kulit sehingga tidak diperlukan uji lanjut Duncan.

Tabel 40. Uji Lanjut Duncan *Breakdown*

SSR 5%	LSR %	Rata-rata	Kode	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	70,33	a1						a
3,26	1,73527	137,33	a4	67,00*					b
3,39	1,80447	142,33	a2	72,00*	5,00*				c
3,47	1,847049	165,00	a5	94,67*	27,67*	22,67*			d
3,52	1,873663	213,00	a3	142,67*	75,67*	70,67*	48,00*	-	e

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan: Berdasarkan uji lanjut Duncan pada taraf 5% dapat disimpulkan bahwa kode perlakuan a1 berbeda nyata dengan kode perlakuan a4, a2, a5, dan a3. Kode perlakuan a4 berbeda nyata dengan kode perlakuan a1, a2, a5, dan a3. Kode perlakuan a2 berbeda nyata dengan kode perlakuan a1, a4, a5, dan a3. Kode perlakuan a5 berbeda nyata dengan kode perlakuan a1, a4, a2, dan a3. Kode perlakuan a3 berbeda nyata dengan kode perlakuan a1, a4, a2, dan a5.

Tabel 41. Data *Final Viscosity*

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan Final Viscosity			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm	304,00	309,00	299,00	912,00	304,00	5,00
2 ppm	594,00	602,00	586,00	1782,00	594,00	8,00
4 ppm	286,00	292,00	281,00	859,00	286,33	5,51
6 ppm	458,00	466,00	452,00	1376,00	458,67	7,02
8 ppm	532,00	540,00	526,00	1598,00	532,67	7,02
Jumlah	2174,00	2209,00	2144,00	6527,00		
Rata-rata	434,80	441,80	428,80			

Tabel 42. Analisis Variansi (ANAVA) *Final Viscosity*

Sumber Variansi	Derajat Bebas	Jumlah Kuadrat	Kuadrat Tengah	F Hitung	F Tabel	Notasi
Kelompok	2	423,333	211,667	133,684	4,46	*
Perlakuan	4	223927,733	55981,933	35357,011	3,84	*
Galat	8	12,667	1,583			
Total	14	224363,733				

Keterangan: * = Berpengaruh

tn= Tidak Berpengaruh

Kesimpulan: Berdasarkan tabel ANAVA *final viscosity* memiliki nilai F hitung $\geq$ F tabel pada taraf 5% dan dinyatakan konsentrasi ozon berpengaruh nyata pada beras merah pecah kulit sehingga tidak diperlukan uji lanjut Duncan.

Tabel 43. Uji Lanjut Duncan *Final Viscosity*

SSR 5%	LSR%	Rata-rata	Kode	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	286,33	a3						a
3,26	2,36834	304,00	a1	17,67*					b
3,39	2,46278	458,67	a4	172,33*	154,67*				c
3,47	2,520896	532,67	a5	246,33*	228,67*	74,00*			d
3,52	2,5572207	594,00	a2	307,67*	290,00*	135,33*	61,33*		e

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan: Berdasarkan uji lanjut Duncan pada taraf 5% dapat disimpulkan bahwa kode perlakuan a3 berbeda nyata dengan kode perlakuan a1, a4, a5, dan a2. Kode perlakuan a1 berbeda nyata dengan kode perlakuan a3, a4, a5, dan a2. Kode perlakuan a4 berbeda nyata dengan kode perlakuan a3, a1, a5, dan a2. Kode perlakuan a5 berbeda nyata dengan kode perlakuan a3, a1, a4, dan a2. Kode perlakuan a2 berbeda nyata dengan kode perlakuan a3, a1, a4, dan a5.

Tabel 44. Data *Setback*

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan Final Viscosity			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm	304,00	309,00	299,00	912,00	304,00	5,00
2 ppm	594,00	602,00	586,00	1782,00	594,00	8,00
4 ppm	286,00	292,00	281,00	859,00	286,33	5,51
6 ppm	458,00	466,00	452,00	1376,00	458,67	7,02
8 ppm	532,00	540,00	526,00	1598,00	532,67	7,02
Jumlah	2174,00	2209,00	2144,00	6527,00		
Rata-rata	434,80	441,80	428,80			

Tabel 45. Analisis Variansi (ANAVA) *Setback*

Sumber Variansi	Derajat Bebas	Jumlah Kuadrat	Kuadrat Tengah	F Hitung	F Tabel	Notasi
Kelompok	2	144,533	72,267	30,752	4,46	*
Perlakuan	4	249800,400	62450,100	26574,511	3,84	*
Galat	8	18,800	2,350			
Total	14	249963,733				

Keterangan: * = Berpengaruh

tn= Tidak Berpengaruh

Kesimpulan: Berdasarkan tabel ANAVA *setback* memiliki nilai F hitung $\geq$ F tabel pada taraf 5% dan dinyatakan konsentrasi ozon berpengaruh nyata pada beras merah pecah kulit sehingga tidak diperlukan uji lanjut Duncan.

Tabel 46. Uji Lanjut Duncan *Setback*

SSR 5%	LSR%	Rata-rata	Kode	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	73,33	a3						a
3,26	2,88530	233,67	a1	160,33*					b
3,39	3,00036	321,33	a4	248,00*	87,67*				c
3,47	3,071162	367,67	a5	294,33*	134,00*	46,33*			d
3,52	3,115415	451,67	a2	378,33*	218,00*	130,33*	84,00*	-	e

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan: Berdasarkan uji lanjut Duncan pada taraf 5% dapat disimpulkan bahwa kode perlakuan a3 berbeda nyata dengan kode perlakuan a1, a4, a5, dan a2. Kode perlakuan a1 berbeda nyata dengan kode perlakuan a3, a4, a5, dan a2. Kode perlakuan a4 berbeda nyata dengan kode perlakuan a3, a1, a5, dan a2. Kode perlakuan a5 berbeda nyata dengan kode perlakuan a3, a1, a4, dan a2. Kode perlakuan a2 berbeda nyata dengan kode perlakuan a3, a1, a4, dan a5.

Tabel 47. Data *Peak Time*

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan Final Peak Time			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm	6,87	6,89	6,84	20,60	6,87	0,03
2 ppm	7,00	7,02	6,98	21,00	7,00	0,02
4 ppm	6,60	6,62	6,57	19,79	6,60	0,03
6 ppm	7,00	7,03	6,98	21,01	7,00	0,03
8 ppm	7,00	7,03	6,98	21,01	7,00	0,03
Jumlah	34,47	34,59	34,35	103,41		
Rata-rata	6,89	6,92	6,87			

Tabel 48. Analisis Variansi (ANAVA) *Peak Time*

Sumber Variansi	Derajat Bebas	Jumlah Kuadrat	Kuadrat Tengah	F Hitung	F Tabel	Notasi
Kelompok	2	0,006	0,003	216,000	4,46	*
Perlakuan	4	0,373	0,093	6991,750	3,84	*
Galat	8	0,000	0,000			
Total	14	0,379				

Keterangan: * = Berpengaruh

tn= Tidak Berpengaruh

Kesimpulan: Berdasarkan tabel ANAVA *peak time* memiliki nilai F hitung $\geq$ F tabel pada taraf 5% dan dinyatakan konsentrasi ozon berpengaruh nyata pada beras merah pecah kulit sehingga tidak diperlukan uji lanjut Duncan.

Tabel 49. Uji Lanjut Duncan *Peak Time*

SSR 5%	LSR %	Rata-rata	Kode	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	6,60	a3						a
3,26	0,00687	6,87	a1	0,27*					b
3,39	0,00715	7,00	a5	0,41*	0,14*				c
3,47	0,007315	7,00	a2	0,41*	0,14*	0,00*			c
3,52	0,007421	7,00	a4	0,40*	0,13*	0,00*	0,00*	-	c

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan: Berdasarkan uji lanjut Duncan pada taraf 5% dapat disimpulkan bahwa kode perlakuan a3 berbeda nyata dengan kode perlakuan a1, a5, a2, dan a4. Kode perlakuan a1 berbeda nyata dengan kode perlakuan a3, a5, a2, dan a4. Kode perlakuan a5 tidak berbeda nyata dengan kode perlakuan a2 dan a4, tetapi berbeda nyata dengan kode perlakuan a3 dan a1. Kode perlakuan a2 tidak berbeda nyata dengan kode perlakuan a5 dan a4, tetapi berbeda nyata dengan kode perlakuan a3 dan a1. Kode perlakuan a4 tidak berbeda nyata dengan kode perlakuan a5 dan a2, tetapi berbeda nyata dengan kode perlakuan a3 dan a1.

Tabel 50. Data *Pasting Time*

Konsentrasi Ozon	Kelompok Ulangan Final Peak Time			Jumlah	Rata-Rata	Standar Deviasi
	1	2	3			
0 ppm	84,60	84,50	84,70	253,80	84,60	0,10
2 ppm	82,45	82,38	82,51	247,34	82,45	0,07
4 ppm	88,95	88,90	89,02	266,87	88,96	0,06
6 ppm	80,15	80,10	80,22	240,47	80,16	0,06
8 ppm	77,25	77,18	77,31	231,74	77,25	0,07
Jumlah	413,40	413,06	413,76	1240,22		
Rata-rata	82,68	82,61	82,75			

Tabel 51. Analisis Variansi (ANAVA) *Pasting Time*

Sumber Variansi	Derajat Bebas	Jumlah Kuadrat	Kuadrat Tengah	F Hitung	F Tabel	Notasi
Kelompok	2	0,049	0,025	79,913	4,46	*
Perlakuan	4	237,077	59,269	193269,379	3,84	*
Galat	8	0,002	0,000			
Total	14	237,129				

Keterangan: * = Berpengaruh

tn= Tidak Berpengaruh

Kesimpulan: Berdasarkan tabel ANAVA *pasting time* nilai F hitung $\geq$ F tabel pada taraf 5% dan dinyatakan konsentrasi ozon berpengaruh nyata pada beras merah pecah kulit sehingga tidak diperlukan uji lanjut Duncan.

Tabel 52. Uji Lanjut Duncan *Pasting Time*

SSR 5%	LSR%	Rata-rata	Kode	Perlakuan					Taraf Nyata
				1	2	3	4	5	
-	-	77,25	a5						a
3,26	0,03296	80,16	a4	2,91*					b
3,39	0,03427	82,45	a2	5,20*	2,29*				c
3,47	0,035083	84,60	a1	7,35*	4,44*	2,15*			d
3,52	0,035589	88,96	a3	11,71*	8,80*	6,51*	4,36*	-	e

Keterangan:

tn = Tidak Berpengaruh Nyata

* = Berpengaruh Nyata

Kesimpulan: Berdasarkan uji lanjut Duncan pada taraf 5% dapat disimpulkan bahwa kode perlakuan a5 berbeda nyata dengan kode perlakuan a4, a2, a1, dan a3. Kode perlakuan a4 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a2, a1, dan a3. Kode perlakuan a2 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a1, dan a3. Kode perlakuan a1 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a2, dan a3. Kode perlakuan a3 berbeda nyata dengan kode perlakuan a5, a4, a2, dan a1.

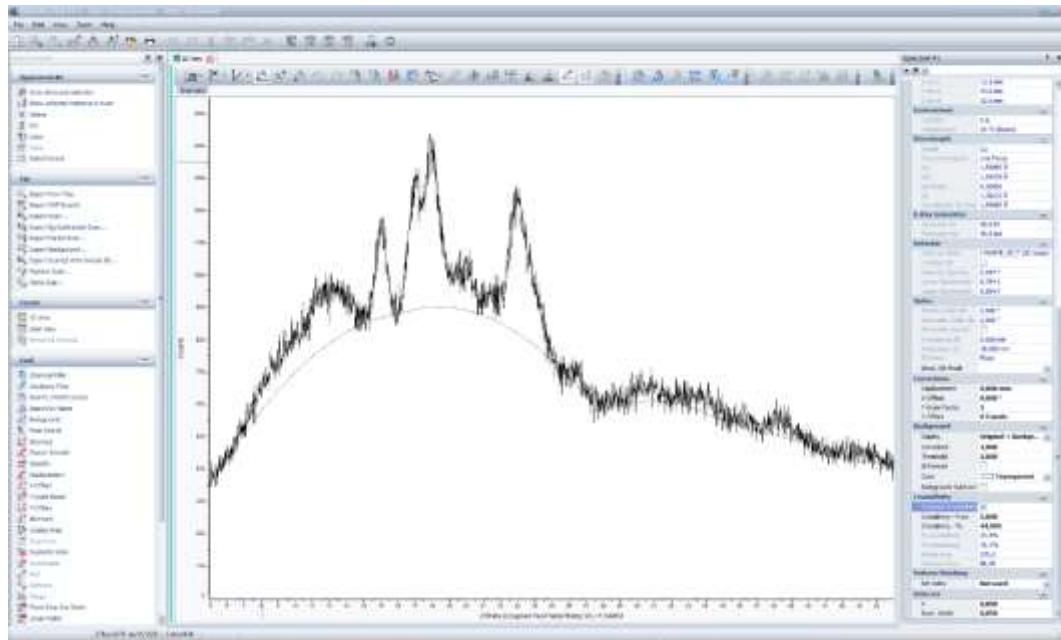
Lampiran 15. Hasil Penentuan Konsentrasi Optimum Menggunakan Metode De Garmo

Tabel 53. Penentuan Konsentrasi Optimum Metode *De Garmo*

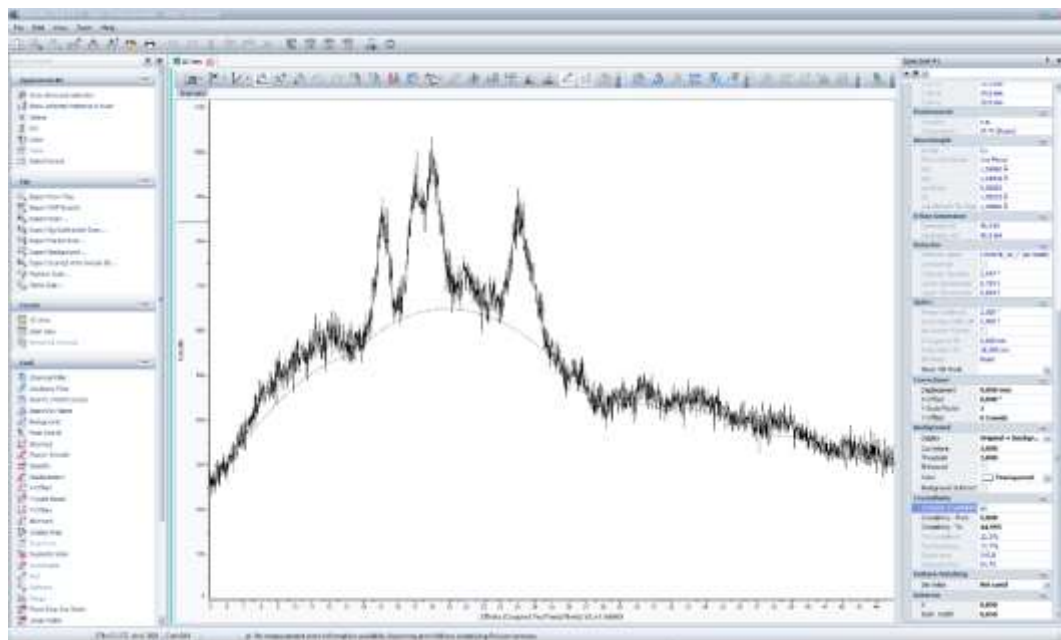
Parameter	BV	BN	Np	NBr	NBk	NBk - NBr	Ne	Nr
Setback Visc								
0 ppm (a1)	1,0	0,17	233,67	451,67	73,33	-378,33	0,58	0,10
2 ppm (a2)			451,67				0,00	0,00
4 ppm (a3)			73,33				1,00	0,17
6 ppm (a4)			321,33				0,34	0,06
8 ppm (a5)			367,67				0,22	0,04
Pati								
0 ppm (a1)	0,9	0,15	65,82	55,78	65,82	10,04	1,00	0,15
2 ppm (a2)			62,66				0,69	0,10
4 ppm (a3)			58,89				0,31	0,05
6 ppm (a4)			55,78				0,00	0,00
8 ppm (a5)			57,21				0,14	0,02
Peak Visc								
0 ppm (a1)	0,8	0,13	141,00	169,33	344,33	175,00	-	-
2 ppm (a2)			177,33				0,05	0,01
4 ppm (a3)			344,33				1,00	0,13
6 ppm (a4)			169,33				0,00	0,00
8 ppm (a5)			207,00				0,22	0,03
Trough Visc								
0 ppm (a1)	0,7	0,12	70,33	70,33	213,00	142,67	0,00	0,00
2 ppm (a2)			142,33				0,50	0,06
4 ppm (a3)			213,00				1,00	0,12
6 ppm (a4)			137,33				0,47	0,05
8 ppm (a5)			165,00				0,66	0,08
Breakdown Visc								

0 ppm (a1)			70,67				0,39	0,04
2 ppm (a2)			35,00				0,03	0,00
4 ppm (a3)	0,6	0,10	131,33	32,00	131,33	99,33	1,00	0,10
6 ppm (a4)			32,00				0,00	0,00
8 ppm (a5)			42,00				0,10	0,01
Final Visc								
0 ppm (a1)			304,00				0,94	0,08
2 ppm (a2)			594,00				0,00	0,00
4 ppm (a3)	0,5	0,08	286,33	594,00	286,33	-307,67	1,00	0,08
6 ppm (a4)			458,67				0,44	0,04
8 ppm (a5)			532,67				0,20	0,02
Pasting temp								
0 ppm (a1)			84,60				0,37	0,02
2 ppm (a2)			82,45				0,56	0,04
4 ppm (a3)	0,4	0,07	88,96	88,96	77,25	-11,71	0,00	0,00
6 ppm (a4)			80,16				0,75	0,05
8 ppm (a5)			77,25				1,00	0,07
Antosianin								
0 ppm (a1)			34,18				0,45	0,04
2 ppm (a2)			45,14				0,84	0,07
4 ppm (a3)	0,5	0,08	49,56	21,70	49,56	27,86	1,00	0,08
6 ppm (a4)			21,70				0,00	0,00
8 ppm (a5)			35,31				0,49	0,04
Kadar Air								
0 ppm (a1)			11,26				1,00	0,05
2 ppm (a2)			11,42				0,50	0,03
4 ppm (a3)	0,3	0,05	11,48	11,58	11,26	-0,32	0,31	0,02
6 ppm (a4)			11,58				0,00	0,00
8 ppm (a5)			11,31				0,85	0,04
Aktivitas Air								
0 ppm (a1)			0,76				0,00	0,00
2 ppm (a2)			0,75				0,43	0,02
4 ppm (a3)	0,3	0,05	0,74	0,76	0,74	-0,02	1,00	0,05
6 ppm (a4)			0,74				1,11	0,06
8 ppm (a5)			0,76				0,23	0,01
Total	6,00	1,00						

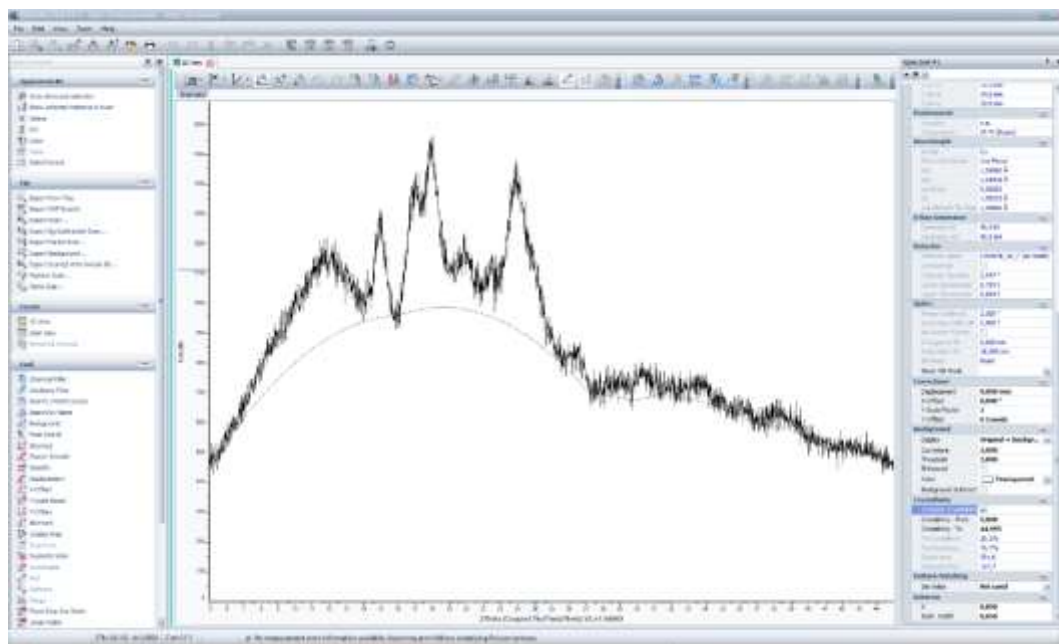
Lampiran 16. Hasil Data Analisis *X-Ray Diffraction (XRD)*



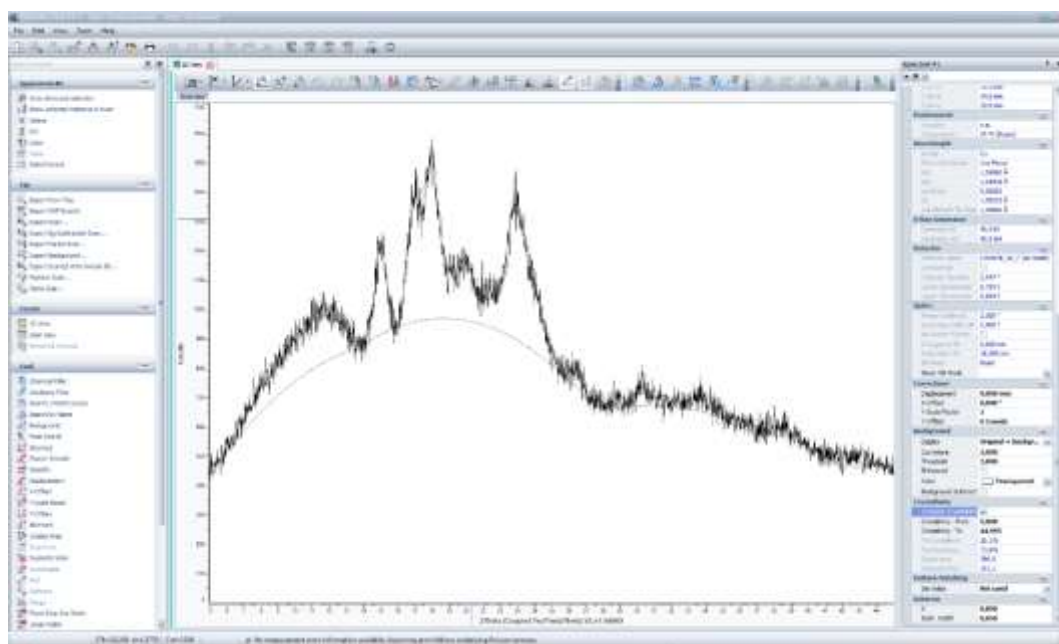
Gambar 17. Grafik Analisis XRD Konsentrasi 0 ppm



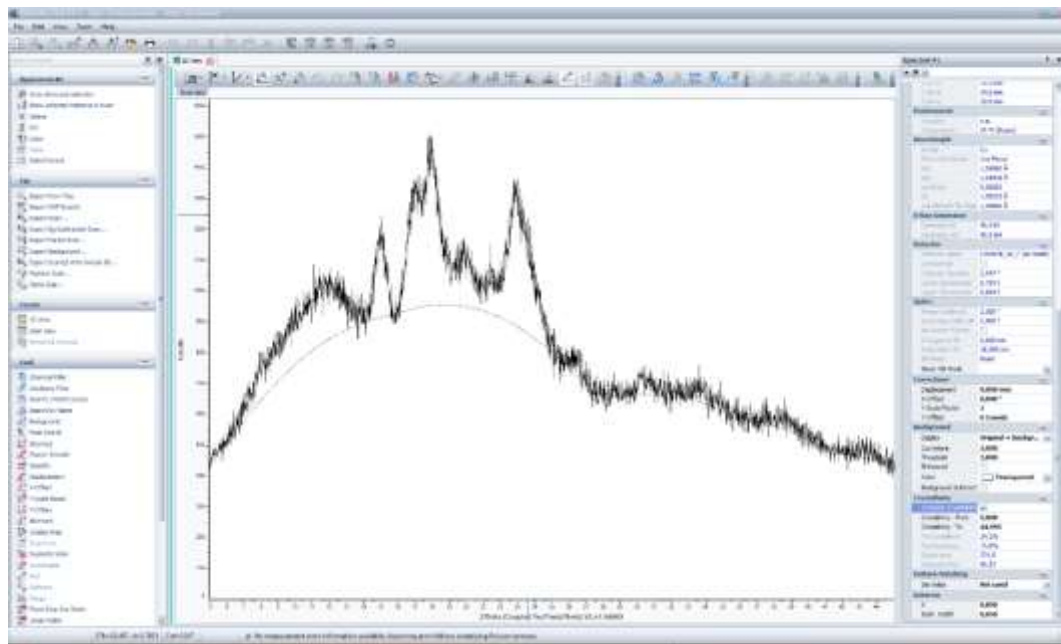
Gambar 18. Grafik Analisis XRD Konsentrasi 2 ppm



Gambar 19. Grafik Analisis XRD Konsentrasi 4 ppm



Gambar 20. Grafik Analisis XRD Konsentrasi 6 ppm



Gambar 21. Grafik Analisis XRD Konsentrasi 8 ppm

Lampiran 17. Dokumentasi Proses Ozonisasi Beras Hitam Pecah Kulit





Lampiran 18. Dokumentasi Penelitian

Analisis Pengujian Kadar Air Metode Gravimetri



Analisis Pengujian Kadar Antosianin



Dokumentasi Pelaksanaan Pengujian Analisis XRD (*X-Ray Diffraction*), Aktivitas Air, dan SEM *Scanning Electron Microscope (SEM)*, di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Cisititu Bandung.

