

**PENGARUH KONSENTRASI OZON KERING DAN KONDISI
BERAS (*Oryza sativa* L.) TERHADAP KARAKTERISTIK FISIK
DAN KIMIA BERAS KECAMBAH VARIETAS INPARI 32**

TUGAS AKHIR

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

Oleh :

Ismail Ahmad Danial Nur Anbiya

223020075



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

ABSTRAK

PENGARUH KONSENTRASI OZON KERING DAN KONDISI BERAS (*Oryza sativa* L.) TERHADAP KARAKTERISTIK FISIK DAN KIMIA BERAS KECAMBAH VARIETAS INPARI 32

Oleh:

Ismail Ahmad Danial Nur Anbiya

223020075

(Program Studi Teknologi Pangan)

Beras (*Oryza sativa* L.) merupakan makanan pokok utama masyarakat Indonesia, namun seiring meningkatnya kesadaran akan gaya hidup sehat, preferensi konsumen kini bergeser ke arah peningkatan kualitas gizi dan nilai fungsional. Beras pecah kulit memiliki densitas nutrisi tinggi tetapi terkendala tekstur nasi yang keras dan umur simpan pendek, sehingga teknologi perkecambahan dengan stimulasi ozon kering sebagai stresor oksidatif digunakan untuk meningkatkan mutu fisik dan fungsionalnya. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh konsentrasi ozon kering dan kondisi beras terhadap karakteristik fisik dan kimia beras kecambah varietas Inpari 32. Metode penelitian menggunakan Rancangan Acak Kelompok (RAK) faktorial 5×2 dengan Faktor O: konsentrasi ozon kering (0; 2; 4; 6; dan 8 ppm) dan Faktor B: kondisi beras (gabah dan beras pecah kulit), tiga ulangan, menghasilkan 30 satuan percobaan. Parameter yang diuji meliputi densitas kamba, % rendemen, % germinasi, derajat putih, *rapid visco analyzer* (RVA), % kadar air, dan % kadar pati. Hasil menunjukkan interaksi kedua faktor berpengaruh nyata terhadap seluruh parameter respons, kecuali % kadar air. Perlakuan ozon kering 8 ppm pada kondisi gabah menghasilkan nilai tertinggi pada persentase germinasi (97,33%), rendemen (98,50%), dan densitas kamba (1,39 g/mL) karena struktur sekam bertindak sebagai *barrier* difusi ozon yang terkontrol. Derajat putih tertinggi (80,68) diperoleh pada ozon kering 4 ppm kondisi gabah, sedangkan kadar pati terendah (63,17%) terjadi pada ozon kering 8 ppm kondisi beras pecah kulit akibat depolimerisasi molekul pati oleh radikal bebas ozon. Aplikasi ozon kering terbukti efektif mengoptimalkan kapabilitas pertumbuhan dan karakteristik fisikokimia beras kecambah varietas Inpari 32 dengan kondisi terbaik pada konsentrasi 6 ppm dalam kondisi gabah.

Kata kunci: beras kecambah, gabah, beras pecah kulit, ozon kering, germinasi, karakteristik fisikokimia

ABSTRACT

THE EFFECT OF DRY OZONE CONCENTRATION AND RICE (*Oryza sativa* L.) CONDITIONS ON THE PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF SPROUTED RICE VARIETY INPARI 32

Oleh:

Ismail Ahmad Danial Nur Anbiya

223020075

(Program Studi Teknologi Pangan)

*Rice (*Oryza sativa* L.) is the primary staple food for the Indonesian people; however, along with increasing health awareness, consumer preferences are shifting toward improved nutritional quality and functional value. Brown rice offers high nutrient density but faces challenges such as a hard cooked texture and a short shelf-life, leading to the utilization of germination technology stimulated by dry ozone as an oxidative stressor to enhance its physical and functional qualities. This study aimed to determine the effect of dry ozone concentration and rice conditions on the physical and chemical characteristics of germinated rice of the Inpari 32 variety. The research method used a 5×2 factorial Randomized Block Design (RBD) with Factor O: dry ozone concentration (0, 2, 4, 6, and 8 ppm) and Factor B: rice condition (paddy and brown rice), with three replications, yielding 30 experimental units. The evaluated parameters included bulk density, yield percentage, germination percentage, whiteness index, pasting properties using a rapid visco analyzer (RVA), moisture content, and starch content. The results indicated that the interaction between the two factors significantly affected all response parameters except for moisture content. The treatment of 8 ppm dry ozone on paddy produced the highest values for germination percentage (97.33%), yield (98.50%), and bulk density (1.39 g/mL) because the husk structure acted as a controlled ozone diffusion barrier. The highest whiteness index (80.68) was obtained with 4 ppm dry ozone on paddy, while the lowest starch content (63.17%) occurred with 8 ppm dry ozone on brown rice due to the depolymerization of starch molecules by ozone free radicals. Dry ozone application was proven effective in optimizing the growth capability and physicochemical characteristics of germinated rice of the Inpari 32 variety, with the optimum condition achieved at a concentration of 6 ppm on paddy.*

Keywords: *germinated rice, paddy, brown rice, dry ozone, germination, physicochemical characteristics*

**PENGARUH KONSENTRASI OZON KERING DAN KONDISI
BERAS (*Oryza sativa* L.) TERHADAP KARAKTERISTIK FISIK
DAN KIMIA BERAS KECAMBAH VARIETAS INPARI 32**

Oleh :

Ismail Ahmad Danial Nur Anbiya

223020075

(Program Studi Teknologi Pangan)

Fakultas Teknik

Universitas Pasundan

Menyetujui,

Tim Pembimbing

Tanggal:

Ketua

Anggota

(Nabila Marthia, S.T., M.Si.P.)

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

**PENGARUH KONSENTRASI OZON KERING DAN KONDISI
BERAS (*Oryza sativa* L.) TERHADAP KARAKTERISTIK FISIK
DAN KIMIA BERAS KECAMBAH VARIETAS INPARI 32**

Oleh :

Ismail Ahmad Danial Nur Anbiya

223020075

(Program Studi Teknologi Pangan)

Fakultas teknik
Universitas Pasundan

Menyetujui:

Tanggal

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

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

PEDOMAN PENGGUNAAN TUGAS AKHIR

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

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

Anbiya, I.A.D.N (2026): Pengaruh Konsentrasi Ozon Kering dan Kondisi Beras Terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Beras Kecambah Varietas Inpari 32, Tugas Akhir Program Sarjana, Universitas Pasundan.

Anbiya, I.A.D.N (2026): *The Effect of Dry Ozone Concentration and Rice Condition on the Physical and Chemical Characteristics of Sprouted Rice Variety Inpari 32, Bachelor's Thesis, Pasundan University.*

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

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah S.W.T karena berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“PENGARUH KONSENTRASI OZON KERING DAN KONDISI BERAS (*Oryza sativa* L.) TERHADAP KARAKTERISTIK FISIK DAN KIMIA BERAS KECAMBAH VARIETAS INPARI 32”** dengan sebaik-baiknya.

Penulis menyadari bahwa dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini tidak lepas dari bimbingan, dukungan, maupun doa dari berbagai pihak. Maka dari itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Nabila Marthia, S.T., M.Si.P. selaku dosen pembimbing utama yang telah membimbing dan memberikan ilmu yang bermanfaat bagi penulis selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Dr. Hari Hariadi, S.T.P., M.T. selaku dosen pembimbing pendamping yang telah membimbing dan memberikan ilmu yang bermanfaat bagi penulis selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
3. Ir. Willy Pranata Widjaja., M.Si., Ph.D. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran, masukan, dan ilmu yang bermanfaat bagi penulis untuk proses penyusunan Tugas Akhir ini.
4. Kedua orang tua Sandi Ardianto dan Siti Hasanah Sari Wanodja, S.Pt., dan Kakak Zidane Muhammad Rahman Al-Khaidir serta Adik Naeyla Jauzaa Satriani yang selalu memberi dukungan kepada penulis, baik berupa doa, materi, dan motivasi selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.

5. Teman penulis yaitu Arief, Virgie, David, Danis, Dani, Gilang, Dandy, Calvin, Nadhif, Pandu, Rangga dan Timotius yang selalu kebersamai sejak masa kuliah baik dalam hal akademik maupun non akademik serta selalu mendukung penulis selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
6. Teman satu topik penelitian yaitu Hani Uswatun, Zahra Putri, Nazwa Amelia, Riafany Agustin, dan Nazmi Ghita yang telah memotivasi dan membantu selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
7. Teh Elvia, Teh Widia, dan Kang Ilman yang telah memberikan masukan, saran, dan kritik kepada penulis selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
8. Maesi Andani yang telah memberikan dukungan, masukan, kritik, dan saran kepada penulis selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
9. Kepada seluruh pihak terlibat yang tidak bisa disebutkan oleh penulis satu persatu.

Akhir kata, penulis berharap dengan tersusunnya laporan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan memberikan ilmu yang lebih luas bagi pembaca.

Bandung, Juni 2026

Ismail Ahmad Danial Nur Anbiya

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	5
1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	6
1.5 Kerangka Pemikiran.....	6
1.6 Hipotesis Penelitian.....	12
1.7 Waktu dan Tempat Penelitian	13
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	14
2.1 Beras Inpari 32 HDB.....	14
2.2 Gabah	18
2.2.1 Gabah Kering Giling (GKG).....	20
2.3 Beras Pecah Kulit (BPK)	21
2.4 Perbandingan Teknologi Non-Termal dan Keunggulan Ozon Kering	25
2.5 Ozon Kering	27
2.6 Beras Kecambah.....	32
2.7 <i>Rapid Visco Analyzer</i> (RVA).....	35
III. METODOLOGI PENELITIAN	41
3.1 Bahan dan Alat.....	41
3.1.1 Bahan	41
3.1.2 Alat.....	41

3.2 Metode Penelitian.....	42
3.2.1 Penelitian Tahap I	42
3.2.2 Penelitian Tahap II	42
3.2.3 Rancangan Perlakuan	43
3.2.4 Rancangan Percobaan	43
3.2.5 Rancangan Analisis	45
3.2.6 Rancangan Respon	46
3.2.7 Penentuan Perlakuan Terbaik Menggunakan Metode <i>De Garmo</i>	47
3.3 Prosedur Penelitian.....	48
3.3.1 Prosedur Proses Ozonisasi Beras Varietas Inpari 32	49
3.3.2 Prosedur Proses Perkecambahan dan Analisis Respon Beras.....	51
3.4. Jadwal Pelaksanaan Penelitian.....	54
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	55
4.1 Penelitian Tahap I	55
4.2 Penelitian Tahap II	56
4.2.1 Respon Fisik.....	56
4.2.2 Respon Kimia.....	84
4.2.3 Perlakuan Terbaik Menggunakan Metode <i>De Garmo</i>	92
V. KESIMPULAN DAN SARAN	97
5.1 Kesimpulan	97
5.2 Saran.....	98
DAFTAR PUSTAKA	99
LAMPIRAN.....	109

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Standar Mutu Gabah	20
2. Syarat Mutu Gabah Kering Giling (GKG).....	21
3. Parameter <i>Rapid Visco Analyser</i> (RVA).....	37
4. Rancangan percobaan Faktorial	44
5. Kelompok Ulangan Rancangan Percobaan	44
6. Analisis Variansi Konsentrasi Ozon Kering dan Kondisi Beras terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Beras Kecambah Varietas Inpari 32	45
7. Jadwal Pelaksanaan Penelitian	54
8. Pengaruh Interaksi Konsentrasi Ozon dan Kondisi Beras Terhadap Densitas Kamba Beras Kecambah Varietas Inpari 32.....	57
9. Dwi Arah Antara Konsentrasi Ozon dan Kondisi Beras Terhadap Densitas Kamba Beras Kecambah Varietas Inpari 32	58
10. Pengaruh Interaksi Konsentrasi Ozon dan Kondisi Beras Terhadap (%) Rendemen Beras Kecambah Varietas Inpari 32.....	61
11. Dwi Arah Antara Konsentrasi Ozon dan Kondisi Beras Terhadap (%) Rendemen Beras Kecambah Varietas Inpari 32	63
12. Pengaruh Interaksi Konsentrasi Ozon dan Kondisi Beras Terhadap (%) Germinasi Beras Kecambah Varietas Inpari 32	66
13. Dwi Arah Antara Konsentrasi Ozon dan Kondisi Beras Terhadap (%) Germinasi Beras Kecambah Varietas Inpari 32	67

14. Pengaruh Konsentrasi Ozon dan Kondisi Beras Terhadap Derajat Putih Beras Kecambah Varietas Inpari 32	72
15. Dwi Arah Antara Konsentrasi Ozon dan Kondisi Beras Terhadap Derajat Putih Beras Kecambah Varietas Inpari 32	74
16. Karakteristik Amilografi Beras Kecambah Varietas Inpari 32	77
17. Pengaruh Kondisi Beras Terhadap (%) Kadar Air Beras Kecambah Varietas Inpari 32	85
19. Pengaruh Konsentrasi Ozon dan Kondisi Beras Terhadap (%) Kadar Pati Beras Kecambah Varietas Inpari 32	88
20. Dwi Arah Antara Konsentrasi Ozon dan Kondisi Beras Terhadap (%) Kadar Pati Beras Kecambah Varietas Inpari 32	89
21. Total Nilai Perlakuan (NP) metode <i>De Garmo</i>	92
22. Data Transformasi Indeks Nilai Efektifitas (NE)	93
23. Data Nilai Perlakuan (NP) Total	94
24. Hasil Penentuan Perlakuan Terbaik Metode <i>De Garmo</i>	94
25. Perhitungan Kebutuhan sampel	114
26. Kebutuhan Bahan Penelitian	114
27. Kebutuhan Analisis Penelitian	114
28. Data Hasil Perhitungan Densitas Kamba	115
29. Data Hasil Perhitungan Densitas Kamba Beras Pecah Kulit	116
30. Nilai Rata-Rata Densitas Kamba	117
31. Analisis Variansi Densitas Kamba	119
32. Uji Lanjut Duncan Interaksi (OB) Densitas Kamba	120

33. Uji Lanjut Duncan Densitas Kamba Taraf o1 Terhadap Faktor b	121
34. Uji Lanjut Duncan Densitas Kamba Taraf o2 Terhadap Faktor b	121
35. Uji Lanjut Duncan Densitas Kamba Taraf o3 Terhadap Faktor b	122
36. Uji Lanjut Duncan Densitas Kamba Taraf o4 Terhadap Faktor b	122
37. Uji Lanjut Duncan Densitas Kamba Taraf o5 Terhadap Faktor b	123
38. Uji Lanjut Duncan Densitas Kamba Taraf b1 Terhadap Faktor o	123
39. Uji Lanjut Duncan Densitas Kamba Taraf b2 Terhadap Faktor o	124
40. Data Hasil Perhitungan % Rendemen Gabah.....	125
41. Data Hasil Perhitungan % Rendemen Beras Pecah Kulit	126
42. Nilai Rata-Rata Analisis % Rendemen	127
43. Analisis Variansi % Rendemen	129
44. Uji Lanjut Duncan Interaksi (OB) % Rendemen	130
45. Uji Lanjut Duncan % Rendemen Taraf o1 Terhadap Faktor b	131
46. Uji Lanjut Duncan % Rendemen Taraf o2 Terhadap Faktor b	131
47. Uji Lanjut Duncan % Rendemen Taraf o3 Terhadap Faktor b	132
48. Uji Lanjut Duncan % Rendemen Taraf o4 Terhadap Faktor b	132
49. Uji Lanjut Duncan % Rendemen Taraf o5 Terhadap Faktor b	133
50. Uji Lanjut Duncan % Rendemen Taraf b1 Terhadap Faktor o	133
51. Uji Lanjut Duncan % Rendemen Taraf b2 Terhadap Faktor o	134
52. Data Hasil Perhitungan Derajat Putih Gabah.....	135
53. Data Hasil Perhitungan Derajat Putih Beras Pecah Kulit	136
54. Nilai Rata-Rata Analisis Derajat Putih	137
55. Analisis Variansi Derajat Putih.....	139

56. Uji Lanjut Duncan Interaksi (OB) Derajat putih.....	140
57. Uji Lanjut Duncan Derajat Putih Taraf o1 Terhadap Faktor b	141
58. Uji Lanjut Duncan Derajat Putih Taraf o2 Terhadap Faktor b	141
59. Uji Lanjut Duncan Derajat Putih Taraf o3 Terhadap Faktor b	142
60. Uji Lanjut Duncan Derajat Putih Taraf o4 Terhadap Faktor b	142
61. Uji Lanjut Duncan Derajat Putih Taraf o5 Terhadap Faktor b	143
62. Uji Lanjut Duncan Derajat Putih Taraf b1 Terhadap Faktor o	143
63. Uji Lanjut Duncan Derajat Putih Taraf b2 Terhadap Faktor o	144
64. Data Hasil Perhitungan % Germinasi	149
65. Nilai Rata-Rata Analisis % Germinasi.....	150
66. Analisis Variansi % Germinasi.....	152
67. Uji Lanjut Duncan Interaksi (OB) % Germinasi.....	153
68. Uji Lanjut Duncan % Germinasi Taraf o1 Terhadap Faktor b.....	154
69. Uji Lanjut Duncan % Germinasi Taraf o2 Terhadap Faktor b.....	154
70. Uji Lanjut Duncan % Germinasi Taraf o3 Terhadap Faktor b.....	155
71. Uji Lanjut Duncan % Germinasi Taraf o4 Terhadap Faktor b.....	155
72. Uji Lanjut Duncan % Germinasi Taraf o5 Terhadap Faktor b.....	156
73. Uji Lanjut Duncan % Germinasi Taraf b1 Terhadap Faktor o.....	156
74. Uji Lanjut Duncan % Germinasi Taraf b2 Terhadap Faktor o.....	157
75. Hasil Perhitungan % Kadar Air Gabah	158
76. Hasil Perhitungan % Kadar Air Beras Pecah Kulit.....	159
77. Nilai Rata-Rata Analisis % Kadar Air	160
78. Analisis Variansi % Kadar Air	162

79. Uji Lanjut Duncan Faktor (b) % Kadar Air	163
80. Uji Lanjut Duncan Faktor (o) % Kadar Air	163
81. Hasil Perhitungan % Kadar Pati.....	164
82. Volume Hasil Titrasi % Kadar Pati.....	165
83. <i>Luff Schoorl</i> mg Glukosa.....	166
84. Nilai Rata-Rata % Kadar Pati	167
85. Analisis Variansi % Kadar Pati	169
86. Uji Lanjut Duncan Interaksi (OB) % Kadar Pati	170
87. Uji Lanjut Duncan % Kadar Pati Taraf o1 Terhadap Faktor b	171
88. Uji Lanjut Duncan % Kadar Pati Taraf o2 Terhadap Faktor b	171
89. Uji Lanjut Duncan % Kadar Pati Taraf o3 Terhadap Faktor b	172
90. Uji Lanjut Duncan % Kadar Pati Taraf o4 Terhadap Faktor b	172
91. Uji Lanjut Duncan % Kadar Pati Taraf o5 Terhadap Faktor b	173
92. Uji Lanjut Duncan % Kadar Pati Taraf b1 Terhadap Faktor o	173
93. Uji Lanjut Duncan % Kadar Pati Taraf b2 Terhadap Faktor o	174

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1 . Anatomi Struktur Gabah	19
2. Bagian Endosperma Beras	25
3. Pembentukan gas ozon melalui proses tumbukan.....	29
4. Profil Rapid Visco Analyzer (RVA)	37
5. Struktur Pati	39
6. Diagram Alir Proses Ozonisasi Sampel	50
7. Diagram Alir Proses Perkecambahan.....	53
8. Kurva Amilografi RVA Beras Kecambah Varietas Inpari 32 pada Kondisi Gabah.....	79
9. Kurva Amilografi RVA Beras Kecambah Varietas Inpari 32 pada Kondisi Beras Pecah Kulit	81
10. Kurva RVA Gabah 0 & 2 ppm.....	145
11. Kurva RVA Gabah 4, 6, dan 8 ppm	146
12. Kurva RVA Beras Pecah Kulit 0 & 2 ppm	147
13. Kurva RVA Beras Pecah Kulit 4, 6, dan 8 ppm	148
14. Proses Ozonisasi Beras Varietas Inpari 32.....	175
15. Proses Perendaman Sebelum Perkecambahan Gabah dan Beras Pecah Kulit Varietas Inpari 32	175
16. Proses Perkecambahan	175
17. Hasil Perkecambahan Selama 36 Jam.....	176
18. Analisis (%) Germinasi	176

19. Panjang Kecambah Beras Varietas Inpari 32.....	176
20. Proses Pengeringan Menggunakan <i>Cabinet Dryer</i>	177
21. Analisis (%) Rendemen.....	177
22. Analisis Densitas Kamba	177
23. Proses Pengayakan Menggunakan Mesh 60	178
24. Analisis (%) Kadar Air.....	178
25. Analisis (%) Kadar Pati Metode <i>Luff Schoorl</i>	178

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Perhitungan Rancangan Percobaan Penelitian	109
2. Analisis Densitas Kamba (Banurea et al., 2020)	109
3. Analisis (%) Rendemen (Yuriyah et al., 2024)	110
4. Analisis (%) Germinasi (Hasanuzzaman, n.d.)	110
5. Analisis Derajat Putih Metode Spektrofotometri Reflektans (Khwanchai et al., 2024).....	111
6. Analisis Pasting Rapid Visco Analyzer (Hebishy et al., 2024).....	111
7. Analisis Kadar Air Metode Thermogravimetry (AOAC, 2006)	112
8. Analisis (%) Kadar Pati (Ifmaily, 2018)	113
9. Perhitungan Kebutuhan Sampel	114
10. Kebutuhan Bahan Penelitian	114
11. Kebutuhan Analisis Penelitian	114
12. Data Hasil Analisis Densitas Kamba	115
13. Contoh Perhitungan Densitas Kamba	117
14. Perhitungan Dwi Arah Densitas Kamba	121
15. Data Hasil Analisis % Rendemen	125
16. Contoh Perhitungan % Rendemen	127
17. Data Hasil Analisis Derajat Putih	135
18. Contoh Perhitungan Derajat Putih	136
19. Perhitungan Dwi Arah Derajat Putih	141
20. Rekapitulasi Data Asli RVA Kelompok Gabah.....	145

21. Rekapitulasi Data Asli RVA Kelompok Beras Pecah Kulit	147
22. Data Hasil Analisis % Germinasi.....	149
23. Contoh Perhitungan % Germinasi.....	150
24. Perhitungan Dwi Arah % Germinasi.....	154
25. Data Hasil Analisis % Kadar Air	158
26. Contoh Perhitungan % Kadar Air	160
27. Data Hasil Analisis % Kadar Pati	164
28. Perhitungan Pembakuan KIO_3	166
29. Contoh perhitungan % Kadar Pati.....	166
30. Perhitungan Dwi Arah % Kadar Pati	171
31. Dokumentasi Proses Penelitian	175

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

Bagi masyarakat Indonesia Padi (*Oryza sativa* L.) adalah bahan pangan pokok dan sumber energi utama karena kandungan karbohidratnya yang tinggi (BPS, 2024). Seiring dengan kemajuan ilmu pangan dan meningkatnya kesadaran akan gaya hidup sehat, kebutuhan konsumen tidak terfokus pada aspek kuantitas saja. Namun lebih mengutamakan kualitas gizi dan nilai fungsionalnya. Hal ini mendorong permintaan akan beras dengan indeks glikemik yang lebih rendah dan nutrisi yang lebih tinggi daripada beras putih giling biasa.

Gabah menjadi salah satu komoditas utama sebagai sumber pangan pokok di Indonesia. Gabah merupakan hasil panen tanaman padi yang telah dipisahkan dari jerami atau malainya dan masih tertutup oleh sekam. Struktur kulit gabah yang keras dan berlignin berfungsi sebagai pelindung alami beras dari kerusakan fisik dan serangan hama selama penyimpanan. Keberadaan sekam juga dapat menjadi penghalang dalam proses pengolahan pascapanen yang melibatkan penetrasi senyawa tertentu ke dalam biji beras. (Ramadiansyah, 2021).

Beras Pecah Kulit (BPK) merupakan hasil penggilingan padi yang hanya mengalami proses penghilangan sekam tanpa melalui tahap penyosohan, sehingga

lapisan bekatul dan lembaga masih melekat pada butir beras. Kondisi ini menjadikan beras pecah kulit memiliki warna kecoklatan dan tekstur yang lebih kasar dibandingkan beras putih (BSN, 2020). Konsumsi beras pecah kulit berpotensi membantu pengendalian kadar gula darah, menjaga kesehatan saluran pencernaan, dan mendukung pencegahan penyakit degeneratif (Suarti et al., 2021)

Beras Pecah Kulit (BPK) atau *brown rice* diketahui memiliki nilai nutrisi yang lebih unggul dibandingkan beras sosoh karena masih mempertahankan lapisan bekatul (*bran*) dan lembaga (*germ*) menyebabkan kandungan gizi beras pecah kulit relatif tinggi, terutama serat pangan, vitamin B kompleks, mineral, dan senyawa bioaktif seperti antioksidan. Namun, beras pecah kulit memiliki kelemahan utama, yaitu tekstur nasi yang keras dan kasar saat dimasak, serta umur simpan yang pendek karena kandungan lemak pada bekatul mudah mengalami oksidasi (tengik) (Upadhyay & Kumar Karn, 2018).

Untuk mengatasi tekstur dan meningkatkan nilai gizi, dikembangkan teknologi perkecambahan atau *Germinated Brown Rice* (GBR). Selama proses germinasi terjadi aktivitas enzim kompleks seperti peningkatan aktivitas amilase dan protease yang mendegradasi makromolekul menjadi senyawa yang lebih sederhana. Proses ini tidak hanya memperbaiki tekstur nasi menjadi lebih lunak, tetapi juga meningkatkan kandungan senyawa bioaktif secara signifikan, dan *Gamma-Aminobutyric Acid* (GABA). GABA diketahui efektif dalam menurunkan tekanan darah, mengurangi stres, dan meningkatkan kualitas tidur (Duka & Rahman, 2023; Patil & Khan, 2011).

Meskipun perkecambahan meningkatkan nutrisi dan memperbaiki tekstur, proses ini memiliki risiko. Proses germinasi mensyaratkan perendaman dalam air dengan kelembapan tinggi, kondisi yang sangat ideal bagi pertumbuhan mikroba pembusuk dan patogen yang terbawa pada permukaan gabah dan beras pecah kulit. Kontaminasi mikroba saat perendaman dapat menyebabkan fermentasi yang tidak diinginkan, bau busuk, hingga pembentukan racun, yang pada akhirnya menurunkan mutu beras kecambah yang dihasilkan (Khatun et al., 2023). Untuk mempertahankan mutu gabah dan beras pecah kulit, teknologi potensial dekontaminasi yang mulai banyak dikaji adalah ozon kering untuk mereduksi beban mikroba sebelum proses perendaman dilakukan.

Ozon (O_3) merupakan oksidator kuat yang efektif digunakan sebagai disinfektan alami untuk membunuh mikroba pada permukaan bahan pangan tanpa meninggalkan residu berbahaya karena ozon kering mudah terurai menjadi oksigen (Khadre et al., 2001; Kim et al., 1999). Aplikasi ozon kering sebelum perkecambahan diharapkan mampu mensterilisasi permukaan gabah dan beras pecah kulit, sehingga proses germinasi dapat berlangsung dalam kondisi yang lebih higienis. Selain sebagai oksidator, ozon juga berpotensi memodifikasi struktur permukaan kulit beras yang dapat mempengaruhi laju penyerapan air saat perendaman (Pandiselvam et al., 2019)

Penggunaan ozon memerlukan konsentrasi ozon kering yang sesuai. Konsentrasi ozon kering yang terlalu tinggi dikhawatirkan tidak hanya mematikan mikroba, tetapi juga merusak embrio atau lembaga benih sehingga dapat menghambat proses perkecambahannya, atau mengoksidasi lemak bekatul lebih

awal yang menyebabkan ketengikan (Zhu, 2018). Sebaliknya, konsentrasi ozon kering yang terlalu rendah tidak efektif menekan pertumbuhan mikroba saat perendaman.

Aplikasi ozon pada fase gabah dianggap aman karena dilindungi sekam yang keras, tetapi sekam tersebut dapat menghambat penetrasi ozon ke dalam biji (Pandiselvam et al., 2019). Aplikasi pada beras pecah kulit memungkinkan penetrasi ozon yang maksimal karena pori-pori pada bekatul terbuka, tetapi paparan langsung pada lemak bekatul berisiko tinggi memicu oksidasi lipid yang menyebabkan ketengikan (Zhu, 2018). Hingga saat ini, belum banyak diketahui fase mana gabah atau beras pecah kulit yang optimal diberi perlakuan ozon untuk menghasilkan beras kecambah dengan mutu terbaik.

Varietas yang dipilih pada penelitian ini yaitu varietas Inbrida Padi Sawah Irigasi (Inpari 32) merupakan varietas unggul nasional yang saat ini mendominasi lahan pertanian di Indonesia menggantikan varietas Ciherang, karena produktivitasnya tinggi dan tahan terhadap Hawar Daun Bakteri (HDB) (BBPSI Padi, 2023). Meskipun ketersediaannya melimpah, karakteristik fisik dan kimia Inpari 32 berbeda dengan varietas lain seperti IR 64 atau Sintanur, sehingga responnya terhadap perlakuan ozon kering dan germinasi belum banyak diketahui.

Pada penelitian ini pemberian ozon kering dalam bentuk gas yang dipaparkan pada gabah dan beras pecah kulit varietas Inpari 32 yang telah disesuaikan dengan kadar air berkisar 14%, kadar air tersebut berdasarkan standar mutu gabah sesuai dengan SNI 224:2023 (BSN, 2023), dan beras pecah kulit sesuai dengan SNI 6128:2020 (BSN, 2020). Oleh karena itu, penelitian ini penting dilakukan untuk

mengetahui bagaimana pengaruh variasi konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisik dan kimia gabah dan beras kecambah yang dihasilkan.

Dengan adanya penelitian ini, diharapkan diperoleh pemahaman mengenai bagaimana variasi konsentrasi ozon kering dapat memengaruhi karakteristik fisik dan kimia pada gabah dan beras pecah kulit kecambah. Hasil penelitian ini diharapkan menjadi basis data penting untuk mengoptimalkan aplikasi ozon kering dalam upaya peningkatan mutu dan memperpanjang umur simpan produk pangan berbasis beras di Indonesia.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, masalah-masalah yang dapat diidentifikasi adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh konsentrasi ozon kering terhadap karakteristik fisik dan kimia beras kecambah varietas Inpari 32.
2. Bagaimana pengaruh kondisi beras gabah dan beras pecah kulit terhadap karakteristik fisik dan kimia beras kecambah varietas Inpari 32.
3. Bagaimana interaksi antara konsentrasi ozon kering dan kondisi beras gabah dan beras pecah kulit terhadap karakteristik fisik dan kimia beras kecambah varietas Inpari 32.

1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dari penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana pengaruh konsentrasi ozon kering pada dua kondisi beras gabah dan beras pecah kulit terhadap karakteristik fisik dan kimia beras kecambah varietas Inpari 32.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan hasil pengaruh konsentrasi ozon kering pada dua kondisi beras gabah dan beras pecah kulit terhadap karakteristik fisik dan kimia beras kecambah varietas Inpari 32.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini antara lain adalah sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi ilmiah terkait pemanfaatan ozon kering pada beras kecambah.
2. Menghasilkan rekomendasi kombinasi yang baik antara konsentrasi ozon dan kondisi beras untuk produksi beras kecambah.
3. Meningkatkan nilai tambah produk beras kecambah dengan alternatif teknologi pengolahan non residu yang mendukung keamanan pangan dan kesehatan konsumen.

1.5 Kerangka Pemikiran

Padi (*Oryza sativa* L.) memiliki bentuk dan warna yang beragam dari segi tanaman maupun berasnya. Di Indonesia, beras putih menjadi bahan makanan pokok dan sumber energi sebagian besar masyarakat karena memiliki kandungan karbohidrat yang tinggi, tetapi proteinnya rendah. Kandungan gizi beras per 100 g bahan adalah 360 kkal energi, 6,6 g protein, 0,58 g lemak, dan 79,34 g karbohidrat (Suliartini et al., 2011). Beras putih umumnya dimanfaatkan untuk diolah menjadi nasi, beras juga dijadikan salah satu sumber pangan bebas gluten terutama untuk kepentingan diet (Hernawan & Meylani, 2016).

Beras kecambah (*germinated rice*) tergolong sebagai produk pangan fungsional karena kandungan nutrisinya yang lebih unggul daripada beras

konvensional. Proses perkecambahan mengaktifkan enzim endogen, seperti amilase dan protease yang memecah pati dan protein menjadi senyawa yang lebih sederhana, dan memicu pembentukan senyawa bioaktif seperti *Gamma-Aminobutyric Acid* (GABA) dan antioksidan (Duka & Rahman, 2023; Patil & Khan, 2011). Proses ini menyebabkan meningkatnya kadar air dan aktivitas enzim yang menjadikan beras lebih cepat rusak akibat pertumbuhan mikroba dan reaksi oksidasi yang menurunkan kualitas fisik beras (Khatun et al., 2023).

Proses perkecambahan juga meningkatkan kerentanan biji terhadap kerusakan mikrobiologis. Ozon kering berpotensi digunakan untuk mengendalikan mikroba sekaligus memodifikasi sifat beras kecambah. Interaksi antara ozon kering dan jaringan biji dapat mempengaruhi hasil akhir produk. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa perlakuan oksidatif dapat mempengaruhi stabilitas komponen bioaktif pada biji kecambah (Pandiselvam et al., 2019). Komponen bioaktif utama terakumulasi pada lapisan bekatul dan embrio yang masih dipertahankan pada beras pecah kulit.

Senyawa bioaktif yang terdapat pada beras kecambah yaitu *Gamma-Aminobutyric Acid* (GABA), senyawa fenolik, dan *gamma-oryzanol* yang berperan sebagai antioksidan alami (Cho & Lim, 2016; Ravichanthiran et al., 2018). GABA terbentuk selama proses perkecambahan melalui aktivitas enzim glutamat dekarboksilase yang mengubah asam glutamat menjadi GABA dan diketahui meningkat selama proses perkecambahan. Senyawa fenolik seperti asam ferulat, asam p-kumarat, asam kafeat, dan asam sinapat banyak terdapat pada lapisan bekatul dan berperan sebagai antioksidan alami yang mampu menghambat oksidasi dalam

tubuh. Beras pecah kulit juga mengandung *gamma-oryzanol* yang merupakan campuran ester asam ferulat dan fitosterol yang banyak terdapat pada lapisan bekatul serta berfungsi sebagai antioksidan dan membantu menurunkan kadar kolesterol (Ravichanthiran et al., 2018).

Perlakuan ozon kering sebagai agen oksidatif diduga dapat mempengaruhi stabilitas komponen bioaktif tersebut karena ozon memiliki kemampuan bereaksi dengan senyawa organik terutama yang memiliki gugus aktif dan ikatan rangkap. Senyawa fenolik dan *gamma-oryzanol* diketahui relatif sensitif terhadap reaksi oksidasi sehingga paparan ozon berpotensi menyebabkan perubahan struktur kimia dan menurunkan stabilitas komponen bioaktif tersebut. Selain itu, perlakuan ozon juga diduga dapat mempengaruhi pembentukan GABA secara tidak langsung melalui perubahan aktivitas enzim selama proses perkecambahan. Oleh karena itu, penggunaan konsentrasi ozon kering yang tepat menjadi penting agar perlakuan ozon kering tetap efektif sebelum proses perkecambahan tanpa menyebabkan kerusakan komponen bioaktif beras kecambah (Khadre et al., 2001; Pandiselvam et al., 2019).

Faktor kondisi beras penting dalam menentukan penetrasi ozon. Pada kondisi gabah, biji beras masih terbungkus oleh sekam yang mengandung silika dan lignin, struktur ini berfungsi sebagai barier fisik yang melindungi embrio dan endosperma dari paparan lingkungan luar (Ramadiansyah, 2021). Aplikasi ozon kering pada gabah diduga memerlukan konsentrasi yang lebih tinggi untuk dapat menembus sekam untuk mereduksi mikroba, namun kondisi ini dinilai lebih aman bagi viabilitas embrio. Pada kondisi beras pecah kulit (BPK), lapisan sekam telah hilang

sehingga lapisan bekatul dan embrio terekspos langsung. Kondisi ini memungkinkan ozon berinteraksi langsung dengan permukaan biji, yang dapat meningkatkan efektivitas sterilisasi tetapi meningkatkan risiko oksidasi lemak pada bekatul dan kerusakan sel embrio jika terpapar konsentrasi berlebih (Pandiselvam et al., 2019).

Ozon kering memiliki kemampuan bereaksi cepat dengan senyawa organik, terutama ikatan rangkap pada molekul pati, protein, dan lemak. Reaksi oksidasi oleh ozon terjadi melalui mekanisme pemutusan ikatan rangkap karbon-karbon ($C=C$) dan oksidasi gugus fungsi tertentu sehingga menghasilkan senyawa turunan seperti aldehid, keton, dan asam karboksilat (Khadre et al., 2001; Pandiselvam et al., 2019). Dalam bentuk gas, ozon kering dapat menembus permukaan biji dan berinteraksi langsung dengan komponen internal beras. Keunggulan utama ozon kering dibandingkan dengan bahan kimia lain adalah sifatnya yang terurai menjadi oksigen setelah reaksi selesai. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa perlakuan ozon kering dapat mengubah karakteristik fisik dan kimia sereal, perubahan tersebut sangat dipengaruhi oleh konsentrasi ozon kering yang digunakan. Konsentrasi rendah dapat memberikan efek positif, sedangkan konsentrasi tinggi berpotensi menimbulkan kerusakan struktur biomolekul (Guzel-Seydim et al., 2004).

Selain mempengaruhi komponen kimia bahan, ozon kering juga memiliki kemampuan sebagai agen antimikroba dengan cara merusak dinding sel mikroorganisme melalui oksidasi kuat, sehingga efektif menghambat pertumbuhan mikroba (Khadre et al., 2001). Pada kondisi beras pecah kulit, sifat oksidatif ozon

dapat merusak jaringan meristem pada lembaga jika konsentrasi ozon terlalu tinggi, mengakibatkan benih gagal berkecambah dan tidak terjadinya peningkatan nutrisi (Ciccarese et al., 2007).

Efektivitas ozon dalam mempengaruhi proses germinasi sangat ditentukan oleh variabel konsentrasi, laju alir, dan durasi paparan. Pada penelitian (Kaur et al., 2023) menunjukkan bahwa aplikasi ozon sebesar $14,7 \text{ g/m}^3$ pada gandum berhasil menstimulasi persentase perkecambahan hingga 22%. Hasil serupa terlihat pada jagung dan kedelai dengan konsentrasi 10-20 mg/L yang menghasilkan tingkat germinasi sekitar 80-95%. Namun, pengaruh berbeda ditemukan pada komoditas beras, paparan ozon sebesar 0,393 mg/L selama 180 menit dilaporkan menghambat perkecambahan serta menekan pertumbuhan koleoptil dan akar seminal.

Pengaruh ozon pada benih bersifat ganda, yakni bisa menstimulasi atau justru menghambat inhibitif sangat bergantung pada nilai CT dan intensitas paparannya. Hal ini terlihat pada gandum yang mengalami penurunan geminasi 12% setelah paparan tiga jam akibat kerusakan sel dan gangguan aktivitas enzim meskipun stabil pada paparan dua jam. Sementara itu, pada barley penurunan signifikan sebesar 28,5% baru terjadi setelah paparan 45 menit dengan dosis tinggi, sedangkan pada dosis dibawah 0,98 mg/g per menit tidak menunjukkan dampak negatif (Kaur et al., 2023)

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa perlakuan ozon gas pada beras putih mentah dengan konsentrasi 0,1-0,4 ppm selama 0-420 menit terbukti secara signifikan memodifikasi karakteristik fisikokimia tanpa menurunkan parameter tekstur utama seperti kekerasan dan kelengketan. Proses oksidasi oleh ozon gas

memicu penurunan nilai pH dari 6,15 (kontrol) hingga mencapai titik 5,23 pada paparan 0,4 ppm selama 360 menit, diikuti dengan modifikasi struktur mikroskopis pada granula pati, di mana pengamatan SEM menunjukkan adanya pengikisan permukaan (*pitting*) dan pembentukan rongga udara yang menyebabkan peningkatan nilai kecerahan (L^*) hingga mencapai 78,02. Kerusakan matriks protein dan degradasi pati tersebut meningkatkan permeabilitas biji sehingga meningkatkan total padatan terlarut dan daya serap air secara signifikan sebesar 17-24 % pada konsentrasi di atas 0,3 ppm selama 420 menit (Shah et al., 2015).

Pemanfaatan sifat oksidatif ozon kering terbukti efektif meningkatkan penampilan beras dengan cara memecah pigmen karotenoid dan antosianin pada bekatul sehingga meningkatkan derajat putih beras kecambah yang dihasilkan (Zhu, 2018). Pada komponen pati, reaksi oksidasi dapat menyebabkan depolimerisasi rantai amilosa dan amilopektin sehingga mempengaruhi sifat fungsional seperti viskositas dan gelatinisasi serta daya serap air dapat berubah. Perubahan tersebut dapat diamati melalui analisis Rapid Visco Analyzer (RVA) (Pandiselvam et al., 2019)

RVA digunakan untuk mengevaluasi profil viskositas selama pemanasan dan pendinginan, penurunan atau peningkatan viskositas menunjukkan perubahan struktur pati akibat perlakuan. Penelitian sebelumnya pada tepung beras menunjukkan bahwa ozon kering dapat merusak *peak viscosity* pada konsentrasi tertentu. Hal ini berkaitan dengan degradasi parsial granula pati. Dengan demikian, konsentrasi ozon kering memegang peranan penting dalam menentukan karakteristik pasting beras kecambah (Ding et al., 2015)

Aplikasi ozon kering pada beras kecambah membutuhkan konsentrasi optimal yang dapat memberikan efek sebagai antimikroba ataupun pemutih pada konsentrasi tertentu. Pada konsentrasi berlebih berisiko menghancurkan struktur pati dan protein, serta pada komponen lemak terutama yang mengandung asam lemak tidak jenuh, ozon dapat memicu reaksi peroksidasi lipid melalui oksidasi ikatan rangkap sehingga menghasilkan senyawa peroksida dan aldehid yang berhubungan dengan terjadinya ketengikan (Guzel-Seydim et al., 2004; Pandiselvam et al., 2019) yang berdampak pada komponen senyawa bioaktif unggulan seperti GABA dan antioksidan (Zhu, 2018).

Metode Rancangan Acak Kelompok (RAK) dilakukan dengan 2 faktor, faktor kesatu memiliki 5 taraf dan faktor kedua memiliki 2 taraf sehingga didapat hasil 10 perlakuan dengan 3 kali ulangan dan 30 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, 2006).

1.6 Hipotesis Penelitian

Berdasarkan kerangka pemikiran diatas, maka diperoleh hipotesis:

1. Konsentrasi ozon kering diduga berpengaruh terhadap karakteristik fisik dan kimia beras kecambah varietas Inpari 32.
2. Kondisi beras gabah dan beras pecah kulit diduga berpengaruh terhadap karakteristik fisik dan kimia beras kecambah varietas Inpari 32.

3. Interaksi antara konsentrasi ozon kering dan kondisi beras gabah dan beras pecah kulit diduga berpengaruh terhadap karakteristik fisik dan kimia beras kecambah varietas Inpari 32.

1.7 Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu pelaksanaan penelitian dimulai pada bulan April 2026 sampai selesai dan 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.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menguraikan mengenai : (2.1) Beras Inpari 32 HDB, (2.2) Gabah, (2.3) Beras pecah Kulit, (2.4) Perbandingan Teknologi Non-Termal dan Keunggulan Ozon Kering, (2.5) Ozon Kering, (2.6) Beras Kecambah, (2.7) *Rapid Visco Analyzer* (RVA).

2.1 Beras Inpari 32 HDB

Padi (*Oryza sativa* L.) merupakan komoditas pangan strategis dunia, terutama di kawasan asia, karena menjadi sumber energi utama bagi sebagian besar penduduk. Tanaman semusim ini dikenal memiliki daya adaptasi yang luas, mampu tumbuh baik di lahan sawah beririgasi maupun sistem budidaya lahan kering (Adzigbe et al., 2025). Secara taksonomi padi adalah tanaman rumput yang termasuk famili *Poaceae* dan diklasifikasikan sebagai *cereal grain* yang menghasilkan gabah sebagai hasil reproduksi sekaligus bahan baku pangan manusia (Bao-Rong LU et al., 2001). Prefensi konsumen terhadap beras sangat dipengaruhi oleh penampilan fisik butiran, terutama tingkat keputihan dan kejernihan yang dijadikan tolak ukur mutu komersil di pasar. Karakteristik visual tersebut berperan penting dalam menentukan daya tarik dan nilai jual beras.

Beras putih dari aspek komposisi gizi tersusun oleh pati berupa amilosa dan amilopektin yang menyumbang sekitar 80-90% bobot kering. Proses penggilingan yang menghilangkan sekam dan lapisan aleuron memang meningkatkan kemudahan pengolahan dan umur simpan, tetapi menurunkan kandungan serat, vitamin B kompleks, dan mineral yang banyak terdapat pada kulit ari (Kaur et al., 2023). Oleh karena itu, program pemuliaan padi di Indonesia terus diarahkan untuk

menghasilkan varietas unggul baru dengan produktivitas tinggi, ketahanan terhadap hama dan penyakit, dan tetap mempertahankan mutu sensori nasi sesuai selera konsumen (BBPSI Padi, 2023).

Sejarah pelepasan varietas Inpari 32 HDB dimulai dari penelitian dan seleksi oleh para pemulia padi Indonesia yang kemudian di lepas resmi oleh Kementerian Pertanian pada tahun 2013 dengan nomor seleksi BP10620F-BB4-15-BB8, sebagai bagian dari program diversifikasi varietas padi unggul untuk mendukung ketahanan pangan nasional. Sejak saat itu, varietas ini diadopsi secara luas oleh petani di berbagai daerah karena kombinasi produktivitas tinggi, karakter fisik tanaman yang baik, dan keunggulan utamanya yaitu ketahanan terhadap Hawar Daun Bakteri (HDB) yang merupakan salah satu ancaman terbesar bagi tanaman padi di ekosistem sawah irigasi (BBPSI Padi, 2023).

Varietas inpari 32 HDB adalah hasil pemuliaan tanaman padi yang dikembangkan dari persilangan antara varietas Ciherang dan IRBB64 yang bertujuan untuk meningkatkan produktivitas serta ketahanan terhadap hawar daun bakteri, berumur kurang lebih 120 hari setelah disemai, postur tanaman dan daun yang tegak menjulang ini memberikan keuntungan argonomis berupa ketahanan terhadap rebah (*lodging*), daun bendera yang tegak juga membantu proses pengisian gabah sehingga dapat menerima dan memanfaatkan sinar matahari secara optimal karena efisiensi fotosintesis yang tinggi untuk pertumbuhannya. Karakteristik Inbrida Padi sawah Irigasi (Inpari 32 HDB) sebagai berikut : (BBPSI Padi, 2023).

Tahun dilepas	: 2013
Nomor seleksi	: BP10620F-BB4-15-BB8
Asal seleksi	: Ciherang/IRBB64
Umur tanaman	: 120 hari setelah sebar
Bentuk tanaman	: Tegak
Tinggi tanaman	: 97 cm
Daun bendera	: Tegak
Jumlah gabah per malai	: ± 118 butir
Bentuk gabah	: Medium
Warna gabah	: Kuning bersih
Kerontokan	: Sedang
Kerebahan	: Agak tahan
Tekstur nasi	: Sedang
Kadar amilosa	: $\pm 23,46$ %
Berat 1000 butir	: 27,1 gram
Rata – rata hasil	: 6,30 t/ha GKG
Potensi hasil	: 8,42 t/ha GKG
Ketahanan terhadap hama	: Agak rentan terhadap wareng batang cokelat biotipe 1, 2, dan 3
Ketahanan terhadap penyakit	: Tahan terhadap hawar daun bakteri patotipe III, agak tahan patotipe IV dan VIII. Tahan blas ras 033, agak tahan ras 073, rentan terhadap ras 133 dan 173 serta agak tahan tungro ras Lanrang
Anjuran tanam	: Cocok ditanam diekosistem sawah dataran rendah sampai ketinggian 600 mdpl
Pemulia	: Aan A. Daradjat, Cucu Gunarsih, Trias Sitaresmi, Nafisah

Varietas Inpari 32 HDB memiliki ciri-ciri bentuk butiran yang ramping, cenderung memanjang, dan memiliki tingkat keseragaman yang tinggi. Konsistensi morfologi ini, didukung oleh ketangguhan argonomi di berbagai kondisi lingkungan yang menjadikan varietas Inpari 32 HDB ideal untuk produksi komersial berskala besar (Suparto dkk., 2024). Keunggulan fisiknya terdapat pada struktur endosperma yang padat dan keras, dengan bobot 1000 butir gabah mencapai kisaran 27-29 gram. Selain ketahanan mekanik yang baik, beras ini memiliki tampilan yang putih cerah menandakan bahwa optimalnya proses penggilingan dan minimnya lapisan aleuron (BBPSI Padi, 2023).

Kualitas Inpari 32 HDB ditentukan oleh komposisi makromolekulnya, varietas ini memiliki kandungan amilosa sekitar 23,2% yang menjadikan tekstur nasi pulen dan tidak keras (Suarti dkk., 2023). Komposisi nutrisinya didominasi oleh pati berkisar (75-80%) dan protein (6-8%), serta dilengkapi oleh komponen lemak dan mineral yang berperan dalam pembentukan aroma (Pradipta et al., 2020). Untuk mempertahankan mutu tersebut, maka kadar air ideal harus dijaga di bawah 14% untuk mencegah aktivitas mikroorganisme.

Stabilitas karakteristik fisik dan kimia beras ini bergantung pada proses pascapanen, faktor seperti umur panen, jenis kemasan, dan lama penyimpanan memiliki pengaruh signifikan. Penyimpanan terlalu lama berisiko memicu degradasi enzimatis dan oksidasi, yang berujung pada penurunan kadar air dan protein (Fathoni et al., 2025). Dengan pengolahan yang tepat, stabilitas sifat fisik dan kimia varietas Inpari 32 HDB menjadikan bahan baku yang unggul, baik untuk di konsumsi rumah tangga maupun kebutuhan industri pangan.

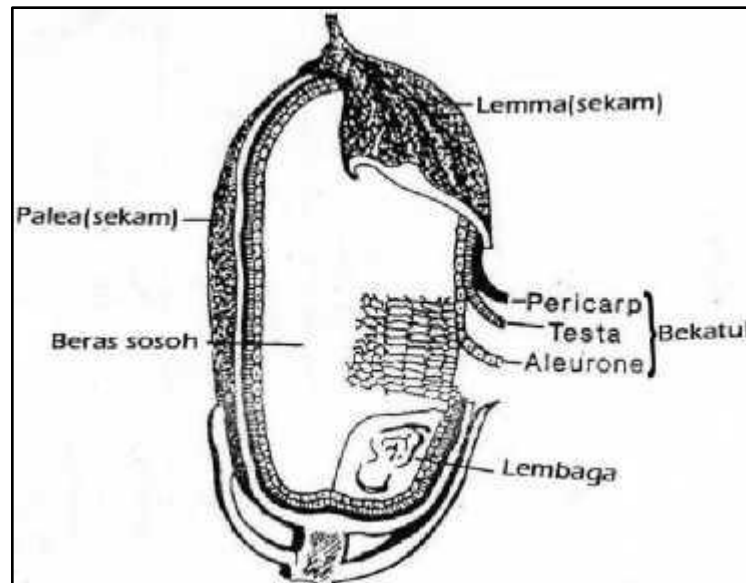
2.2 Gabah

Gabah merupakan komoditas hasil produksi padi yang dijadikan sebagai bahan pangan pokok di Indonesia. Produktivitas gabah sangat bergantung pada interaksi antara faktor genetik, kondisi biotik, dan abiotik. Secara spesifik, volume hasil panen ditentukan oleh ketepatan pemilihan varietas, tingkat serangan hama dan penyakit, serta dukungan lingkungan seperti ketersediaan air, kondisi musim, dan pemupukan. Gabah setelah di panen dari tanaman padi memiliki beberapa tahapan proses sebelum menjadi beras yaitu pengeringan menjadi Gabah Kering Panen (GKP) dan penggilingan menjadi Gabah Kering Giling (GKG) (Aenunnisa et al., 2017).

Gabah merupakan bulir padi yang telah terlepas dari malainya (jerami) dan memiliki kulit atau sekam. Lapisan kulit padi ini secara spesifik dibagi menjadi *hull* sebagai pelindung terluar dan *Bran* (bekatul) yang berfungsi sebagai selaput biji bagian dalam (Nursalim & Razali, 2007). Struktur gabah didominasi oleh endosperma (65-67%), diikuti oleh kulit luar atau sekam (15-30%), bekatul (12-14%), kulit ari (4-5%), dan lembaga (2-3%) (Koswara, 2009). Butiran gabah memiliki karakteristik morfologi yang beragam, hal itu ditentukan berdasarkan varietasnya.

Secara global spesies padi diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok utama yaitu *Javanica*, *Japonica*, dan *Indica*. Jenis padi *Indica* berbentuk butir bulat yang memanjang, sedangkan padi jenis *javanica* dan *Japonica* berbentuk butiran pendek dan membulat. Jenis yang mendominasi di pertanian Indonesia adalah jenis *indica* karena memiliki bentuk yang cenderung lonjong. Dari segi morfologi, struktur

gabah terbagi menjadi tiga lapisan utama. Lapisan terluar adalah sekam yang tersusun dari *lemma*, *glume*, dan *palea*. Lapisan kedua dari gabah adalah bekatul, lapisan ini disusun dari beberapa bagian seperti perikarp, *testa*, dan aleuron, sedangkan lapisan terdalam dari gabah disebut endosperma (Millati et al., 2017).



(Sumber: <https://jurnal.harianregional.com/itepa/full-8875>)

Gambar 1 . Anatomi Struktur Gabah

Kualitas mutu fisik gabah sangat ditentukan oleh kadar air (% berat basah) dan Tingkat kemurniannya. Kemurnian gabah merupakan rasio antara bobot gabah bernas (isi) terhadap bobot total sampel. Tingkat kemurnian akan mengalami penurunan seiring meningkatnya kontaminasi baik berupa dari benda asing, biji butir hampa, biji butir rusak atau kotoran yang bukan gabah, seperti butiran tanah, kerikil, serpihan kayu atau logam, hingga bangkai serangga. Butiran-butiran gabah yang telah terkelupas (pecah kulit) atau patah dikategorikan sebagai komponen kotoran. Kualitas dari gabah akan mempengaruhi kuantitas maupun kualitas beras yang dihasilkan. Gabah yang berkualitas tinggi akan mempengaruhi tingginya

rendemen giling. Rendemen giling merupakan presentase dari berat beras sosoh terhadap gabah yang telah digiling (Millati et al., 2017). Menurut SNI 224:2023 standar mutu gabah dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 1. Standar Mutu Gabah

Komponen Mutu	Kualitas		
	I	II	III
Kadar air (% maksimum)	14,0	14,0	14,0
Gabah hampa (% maksimum)	1,0	2,0	3,0
Butir rusak + Butir kuning (% maksimum)	2,0	5,0	7,0
Butir mengapur + Gabah muda (% maksimum)	1,0	5,0	10,0
Butir merah (% maksimum)	1,0	2,0	4,0
Benda asing (% maksimum)	-	0,5	10,0
Gabah varietas lain (% maksimum)	2,0	5,0	10,0

sumber:(BSN, 2023).

2.2.1 Gabah Kering Giling (GKG)

Gabah Kering Giling (GKG) merupakan gabah yang telah mengalami proses pengeringan hingga mencapai standar mutu tertentu agar siap untuk digiling, GKG didefinisikan sebagai gabah yang memiliki kadar air maksimal 14% dan kadar hampa atau kotoran 3%, yang menjadikannya lebih tahan lama terhadap serangan hama dan jamur selama penyimpanan (Badan Pangan Nasional, 2023). Gabah Kering Giling juga digunakan sebagai acuan dalam perhitungan statistik produksi padi nasional. Badan Pusat Statistik menggunakan standar GKG untuk mengkonversi hasil panen karena kondisi gabah pada tingkat ini dianggap lebih stabil dan seragam dibandingkan Gabah Kering Panen (GKP). Dalam proses konversi dari GKP ke GKG terjadi penyusutan bobot yang cukup signifikan akibat berkurangnya kadar air selama proses pengeringan.

Penurunan kadar air dari fase GKP menuju GKG sangat krusial karena kadar air yang tinggi dapat menyebabkan peningkatan butir patah saat proses penggilingan, sehingga menurunkan rendemen dan kualitas beras yang dihasilkan (Swastika, 2012). GKG juga dijadikan acuan oleh Badan Pusat Statistik sebagai standar konversi untuk mengukur produksi padi nasional, di mana terdapat penyusutan massa yang signifikan dari GKP ke GKG akibat berkurangnya kandungan air (BPS, 2024). Menurut SNI 224:2023 syarat mutu untuk gabah kering Giling (GKG) dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2. Syarat Mutu Gabah Kering Giling (GKG)

Komponen Mutu	Kualitas		
	Premium	Medium I	Medium II
Kadar air (% maksimum)	14,0	14,0	15,0
Butir gabah hampa (% maksimum)	1,0	2,0	3,0
Butir gabah rusak (% maksimum)	0,5	1,5	3,0
Benda asing (% maksimum)	0,01	0,5	0,10

Sumber: (BSN, 2023).

2.3 Beras Pecah Kulit (BPK)

Beras pecah kulit atau biasa disebut *brown rice* merupakan produk hasil penggilingan gabah yang hanya mengalami proses pengupasan kulit luar atau bagian sekam tanpa melalui proses penyosohan sehingga lapisan bekatul atau kulit ari masih menyelimuti biji. Dalam regulasi pangan nasional, beras pecah kulit didefinisikan sebagai beras yang minimal 95% butirannya telah terlepas dari sekam tetapi lapisan kulit arinya belum dihilangkan, secara visual memberikan warna kecokelatan (Badan Pangan Nasional, 2023). Variasi beras ini memiliki densitas nutrisi yang tinggi, namun memiliki keterbatasan dalam hal daya simpan. Kadar air

yang relatif tinggi berkisar 14-15% menjadikannya rentan terhadap serangan hama gudang dan profil rasa yang kurang disukai dibandingkan beras sosoh (Nurmala, 1998).

Beras pecah kulit terdiri dari lapisan pelindung luar diantaranya (perikarp, *testa*, dan *nucellus*), lembaga dan bagian inti yaitu endosperma. Bagian endosperma ini mencakup lapisan aleuron yang terletak berdekatan langsung dengan lembaga, dan endosperma pati yang termasuk lapisan subaleuron (Juliano, 1993a). Mempertahankan lapisan bekatul ini menjadikan beras pecah kulit memiliki keunggulan nutrisi dibandingkan beras putih sosoh, tingginya kandungan serat pangan, vitamin B kompleks, serta senyawa fitokimia seperti *gamma-oryzanol* dan polifenol yang berfungsi sebagai antioksidan (Saleh et al., 2019). Namun, keberadaan komponen lemak alami yang tinggi pada bekatul membuat beras pecah kulit sangat rentan mengalami hidrolisis dan oksidasi yang memicu ketengikan selama penyimpanan (Yılmaz Tuncel, 2023).

Bagian terluar dari beras pecah kulit merupakan lapisan kariopsis yang terdiri dari tiga lapisan sel hancur yang berbeda yaitu perikarp, kulit biji (*testa* dan *tegmen*), dan *nucellus*. Perikarp adalah dinding ovarium yang matang, tebalnya sekitar 10 μm , dilapisi kutikula tipis dan permukaan tampak bergelombang. Di bawah perikarp terdapat kulit biji yang dinamakan *testa* yaitu lapisan kulit biji bagian luar yang berasal dari integumen luar, dan *tegmen* yaitu lapisan kulit biji bagian dalam yang berasal dari integumen dalam serta memiliki kutikula lebih tebal sekitar 0,5 μm . pada varietas padi berwarna, pigmen biasanya menumpuk pada perikarp atau kulit biji tersebut. Tepat di bawah kulit biji terdapat *nucellus* tebalnya

berkisar 2,5 μm yang memiliki lapisan kutikula sangat tebal 0,8 μm . ikatan antara kutikula kulit biji dan kutikula *nucellus* relative lemah, sehingga lapisan ini sering terpisah pada saat di proses (Bao, 2019).

Lapisan aleuron terletak tepat di bawah struktur kariopsis dan merupakan bagian paling luar dari endosperma, tetapi memiliki peran fisiologis yang berbeda dibandingkan jaringan endospermaa pati. Lapisan ini menutupi seluruh butir serta embrio dengan ketebalan sekitar 1-7 lapis sel. Pada bagian dorsal, jumlah lapisan sel lebih banyak dibandingkan sisi *lateral* maupun *ventral*. Secara structural, sel aleurone dibagi menjadi dua kelompok. Kelompok pertama membungkus endosperma dan memiliki sitoplasma yang padat, mengandung butiran protein serta badan lipid atau *spherosome*. Kelompok kedua merupakan aleurone termodifikasi yang mengelilingi embrio, dengan karakter sitoplasma yang relatif lebih renggang atau kurang padat dibandingkan kelompok pertama (Bao, 2019).

Lapisan aleuron berperan sebagai tempat menyimpan berbagai komponen penting. Senyawa fosfor tersimpan dalam bentuk fitat yang terakumulasi sebagai globoid di dalam butiran aleuron. Terdapat juga protein permukaan khusus yang dikenal sebagai oleosin yang berfungsi menjaga kestabilan badan minyak melalui mekanisme penghambatan sterik serta gaya tolak muatan negatif, sehingga struktur lipid tetap terintegrasi dengan baik (Bao, 2019).

Embrio atau Lembaga, berada di bagian *ventral* dekat pangkal butir dan terpisah dari jaringan endosperma oleh skutelum yang berfungsi sebagai kotiledon. Meskipun ukurannya kecil, bagian ini memiliki kepadatan nutrisi yang sangat tinggi. Struktur embrio terdiri atas poros embrionok berbentuk menyerupai huruf C

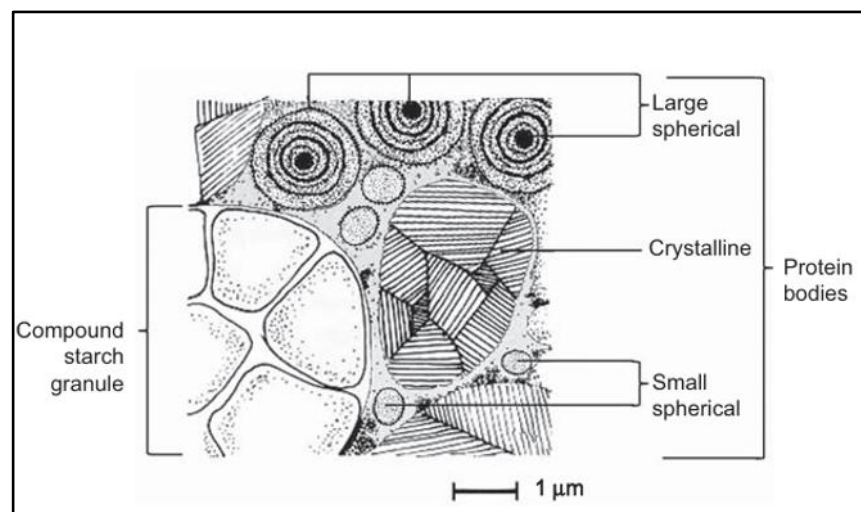
yang mencakup plumula sebagai calon tunas dan radikula sebagai bakal akar utama (Bao, 2019).

Skutelum mengandung partikel kaya globoid yang strukturnya mirip dengan butiran aleuron, sedangkan sel-sel koleoptil diketahui banyak mengandung badan protein serta lipid. Perikarp menyumbang sekitar 1-2% dari total berat kariopsis, lapisan aleuron bersama kulit biji sekitar 4-6% dan embrio sekitar 2-3%. Walaupun persentasenya kecil, fraksi-fraksi ini menyimpan Sebagian besar komponen bioaktif termasuk vitamin B kompleks seperti tiamin (B1), dan niasin (B3), vitamin E (tokoferol) dalam bentuk tokoferol, serta mineral esensial seperti magnesium, seng, dan besi (Bao, 2019).

Komponen utama penyusun beras pecah kulit Adalah endosperma pati yang menyumbang sekitar 89-94% dari total berat butir. Endosperma ini terdiri dari lapisan sub-aleuron bagian terluar endosperma dan bagian Tengah. Di dalamnya terdapat sel-sel yang penuh dengan butiran pati berbentuk poligonal berukuran 3-9 μm . Susunan pati ini memengaruhi kualitas beras. Pada beras non-ketan, susunan pati yang renggang dapat menyebabkan “kerapuhan”, sehingga butir lebih mudah patah saat digiling. Sebaliknya, pada beras ketan memiliki susunan pati yang lebih rapat, meskipun terdapat pori-pori kecil di permukaannya (Bao, 2019).

Selain pati, endosperma juga menyimpan protein dalam bentuk badan protein (protein bodies/PB). Ada dua jenis utama, yaitu PB I yang berukuran lebih kecil 1-2 μm dan banyak mengandung prolamin, serta PB II yang lebih besar 2-3,5 μm dan menjadi tempat penyimpanan utama glutelin. Kedua jenis protein ini paling banyak terdapat pada lapisan sub-aleuron. Jika proses penyosohan terlalu intensif, lapisan

sub-aleurone dapat hilang, sehingga Sebagian besar protein penting ikut terbang. Struktur yang mengandung pati, protein, dan serat pada lapisan luar ini yang membuat beras pecah kulit memiliki Indeks Glikemik lebih rendah di bawah 55. Kandungan tersebut memperlambat pencernaan pati dan menyerap glukosa, sehingga membantu menjaga kestabilan kadar gula darah dibandingkan beras putih (Bao, 2019).



(Sumber: (Bao, 2019))

Gambar 2. Bagian Endosperma Beras

2.4 Perbandingan Teknologi Non-Termal dan Keunggulan Ozon Kering

Pengembangan beras kecambah sering terkendala oleh lambatnya laju imbibisi akibat tingginya sifat hidrofobik pada lapisan terluar benih, serta kerentanan terhadap kontaminasi mikroorganisme selama masa inkubasi. Dalam mengatasi kendala tersebut, penggunaan metode termal konvensional (pemanasan suhu tinggi) terbukti memiliki kelemahan terhadap kualitas nutrisi, sintesis senyawa gamma-aminobutyric acid (GABA) sangat bergantung pada aktivitas enzim glutamate decarboxylase (GAD) yang memiliki suhu optimal pada 35-40°C.

Penggunaan suhu panas diatas 60°C pada tahap sebelum perkecambahan dapat menonaktifkan enzim GAD (Peng et al., 2021). Paparan suhu pemanasan yang ekstrem secara langsung memicu dekomposisi termal yang mendegradasi kandungan GABA (Toyoizumi et al., 2021). Oleh karena itu, berbagai kajian rekayasa pangan terkini mulai beralih pada pemanfaatan teknologi non-termal. Teknologi non-termal bekerja dengan memberikan stres abiotik yang menstimulasi metabolisme benih tanpa merusak matriks nutrisi akibat panas. Beberapa pendekatan non-termal yang telah banyak dikaji meliputi ultrasonikasi yang memanfaatkan gelombang suara untuk mendisrupsi lapisan luar biji secara mekanis untuk mempercepat imbibisi (Zhang et al., 2022) serta aplikasi plasma dingin yang memodifikasi hidrofobik permukaan benih (Yodpitak, 2019)

Di antara berbagai agen rekayasa non-termal, aplikasi ozon kering menawarkan efektivitas modifikasi fisikokimia dan keamanan biologis yang sangat komprehensif. Sebagai agen pengoksidasi yang sangat kuat, paparan gas ozon secara spesifik menginduksi peroksidasi lipid pada lapisan sekam dan aleuron pelindung biji yang kaya akan lemak. Proses peroksidasi ini secara efektif mendegradasi lapisan lilin hidrofobik pada permukaan beras dan memodifikasi permeabilitas membrannya. Berkurangnya hambatan hidrofobik ini memfasilitasi penetrasi air (imbibisi) yang jauh lebih cepat ke dalam endosperma selama proses perendaman, tanpa memerlukan kerusakan struktur mekanis (Shah et al., 2015). Paparan gas ozon terbukti menginduksi tingkat stres oksidatif abiotik yang berfungsi sebagai elisitor. Respons benih terhadap stres oksidatif ringan ini memicu peningkatan pesat pada aktivitas enzim dekarboksilase asam glutamat (GAD), yang

merupakan katalisator utama dalam jalur sintesis senyawa bioaktif gamma-aminobutyric acid (GABA).

Berbeda dengan disinfektan cair, gas ozon memiliki daya penetrasi tinggi untuk mendisinfeksi tumpukan material secara merata melalui mekanisme peroksidasi lipid pada membran sel mikroba, tanpa memicu peningkatan kadar air benih sebelum waktunya (Khadre et al., 2001). Karena sifatnya yang tidak stabil, gas ozon akan terdekomposisi secara alami menjadi molekul oksigen (O_2) dengan waktu paruh yang singkat, sehingga tidak meninggalkan residu bahan kimia beracun (O'Donnell, 2012). Berdasarkan sintesis mekanisme tersebut, pemanfaatan gas ozon yang telah ditetapkan berstatus *Generally Recognized as Safe* (GRAS) sebagai agen antimikroba pangan (FDA, 2001) secara teoritis merupakan metode modifikasi yang sangat optimal.

2.5 Ozon Kering

Ozon kering atau *dry ozone* adalah bentuk ozon (O_3) yang dihasilkan melalui proses tumbukan atau radiasi UV dengan kondisi udara kering tanpa kelembapan tinggi, sehingga menghasilkan molekul (O_3) dengan kemurnian yang relatif tinggi. Ozon merupakan molekul triatomik yang memiliki sifat oksidatif yang kuat dan reaktivitas tinggi terhadap mikroorganisme, senyawa organik, dan bahan pencemar (Khadre et al., 2001).

Ozon adalah molekul yang tersusun dari tiga atom oksigen dan secara alami banyak ditemukan di lapisan stratosfer, dan sebagian kecil terdapat di lapisan troposfer. Ozon tidak berwarna tapi memiliki bau khas yang sangat tajam, bau ini bisa mulai tercium manusia pada konsentrasi 0,01 ppm. Konsentrasi ozon

maksimum pada ruang terbuka sekitar 0,10 ppm. Konsentrasi ozon 1,00 ppm masih dianggap tidak berbahaya asalkan tidak terhirup ke saluran pernapasan hingga lebih dari 10 menit (Anggraini U, 2011). Ozon kering telah digunakan sebagai agen sanitasi, deodoran, dan pengawet alternatif karena kemampuan oksidatifnya yang efektif untuk menginaktivasi mikroba patogen dan memperpanjang umur simpan tanpa residu kimia berbahaya (O'Donnell, 2012).

Senyawa ozon merupakan bentuk alotrop dari oksigen yang memiliki tingkat kestabilan lebih rendah dibandingkan oksigen diatomik (O_2). Gaya ikat antar atom oksigen dalam molekul ozon (O_3) relatif lebih lemah jika dibandingkan dengan ikatan pada molekul oksigen yang hanya tersusun dari dua atom. Kondisi ini terjadi karena tiga atom oksigen berada dalam satu struktur molekul yang lebih rapat, sehingga menimbulkan tolak-menolak elektron (repulsi elektron) di antara atom-atom tersebut. Interaksi inilah yang menyebabkan struktur ozon menjadi lebih reaktif dan mudah terurai kembali menjadi oksigen (Purwadi et al., 2007)

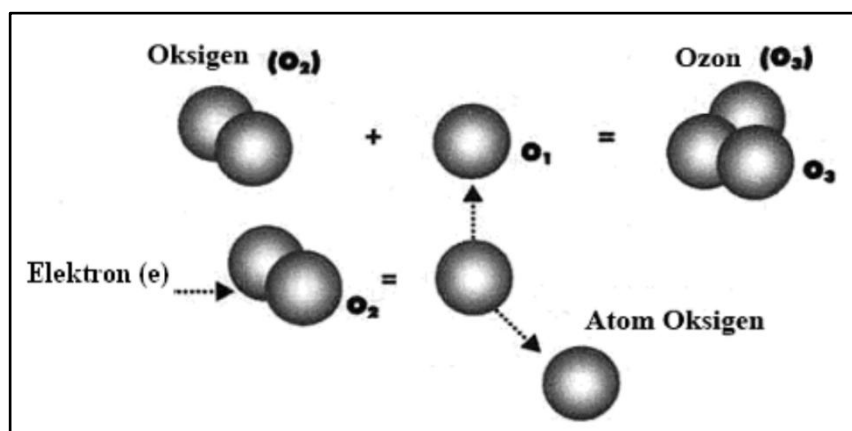
Ozon terbentuk ketika percikan listrik melintas dalam gas oksigen yang memecah molekul (O_2) menjadi radikal (O) bebas, yang kemudian berikatan dengan molekul (O_2) membentuk (O_3). Adanya ozon dapat dideteksi melalui aroma yang ditimbulkan dari mesin-mesin bertenaga listrik. Ozon yang terbentuk sangat tidak stabil dengan umur berkisar 20 menit dalam air dan 10 jam di udara sebelum terurai menjadi oksigen (Purwadi dkk., 2007).

Sifat utama ozon yaitu, stabilitas rendah. Ozon secara spontan akan kembali ke oksigen O_2 karena tidak stabil, terutama pada suhu atau kelembapan tinggi. Ozon memiliki potensi oksidasi yang lebih besar dibandingkan klorin, sehingga efektif

untuk mengoksidasi molekul organik, sel mikroba, dan kontaminan lain (Hudson et al., 2009). Ozon dapat menyerang membran sel mikroorganisme, protein, lemak, dan DNA atau RNA, sehingga menyebabkan lisis atau inaktivasi (Khadre et al., 2001).

Pembentukan ozon melalui proses tumbukan terjadi dengan melewati gas oksigen (O_2) pada area yang dikenai tegangan tinggi. molekul O_2 ini akan mengalami ionisasi, yaitu proses terlepasnya suatu atom atau molekul dari ikatannya menjadi ion-ion oksigen (O^*). Jenis dari ion oksigen ini adalah O^+ , O_2^+ , O^- , O^{2-} , dan O_3^- . Kombinasi ini dapat menghasilkan ozon (Bimo dkk., 2011). Dalam kondisi ini, oksigen tidak lagi berada dalam bentuk netral, melainkan berubah menjadi campuran partikel bermuatan seperti ion dan elektron bebas. Kumpulan molekul dan partikel bermuatan tersebut biasa disebut sebagai keadaan plasma, yaitu fase gas terionisasi yang memiliki konduktivitas listrik tinggi dan bersifat sangat reaktif (Yusuf dkk., 2008).

Dibawah ini merupakan gambar dari perubahan bentuk susunan atom oksigen menjadi molekul ozon (O_3):



(Sumber: (Bimo dkk., 2011))

Gambar 3. Pembentukan gas ozon melalui proses tumbukan

Efektivitas ozon dalam proses dekontaminasi bahan pangan ditentukan oleh prinsip *concentration-time* (CT value) menjelaskan bahwa efektivitas ozon sebagai agen oksidator dipengaruhi oleh kombinasi antara konsentrasi dan lama waktu kontak. Pada penelitian ini konsentrasi ozon dan lama waktu kontak dijaga konstan sehingga setiap sampel dalam satu perlakuan menerima total paparan ozon yang sama. Perbedaan total paparan oksidatif antar perlakuan ditentukan oleh perbedaan konsentrasi ozon yang digunakan, di mana konsentrasi yang lebih tinggi selama waktu kontak yang sama menghasilkan paparan oksidatif yang lebih besar terhadap sampel. Total paparan ozon merupakan hasil kombinasi antara konsentrasi ozon yang stabil dan lama waktu kontak yang ditetapkan. Nilai CT mempresentasikan total eksposur ozon terhadap bahan. Pada bahan sereal, aplikasi ozon gas umumnya dilakukan pada rentang konsentrasi 2-10 ppm dengan lama waktu paparan 10-60 menit. Konsentrasi di bawah 2 ppm kurang efektif dalam menurunkan beban mikroba secara signifikan, sedangkan konsentrasi di atas 10 ppm berpotensi menyebabkan oksidasi lipid, perubahan struktur protein, dan penurunan viabilitas embrio pada biji (Guzel-Seydim et al., 2004; Khadre et al., 2001; Pandiselvam et al., 2019).

Pada biji dan beras pecah kulit yang masih mengandung fraksi lemak aktif pada lapisan bekatul, paparan ozon dapat memicu reaksi oksidatif yang mempercepat ketengikan dan mempengaruhi fisikokimia produk (Zhu, 2018). Pemilihan konsentrasi perlu mempertimbangkan keseimbangan antara efektivitas antimikroba dan stabilitas komponen nutrisi.

Mekanisme modifikasi karakteristik fisikokimia pada gabah dan beras pecah kulit (BPK) melalui teknologi ozonasi berkaitan erat dengan dinamika difusi gas ozon dan pembentukan *Reactive Oxygen Species* (ROS) di dalam jaringan seluler biji. Secara struktural, gabah dan BPK memiliki hambatan mekanis berupa selubung lignoselulosa pada sekam dan lapisan kaya lipid pada pericarp atau bekatul. Namun, wujudnya yang berupa gas dan ukurannya yang mikroskopis, ozon berpenetrasi menembus rintangan struktural tersebut memanfaatkan pori-pori alami, stomata, serta retakan mikro (*micro-cracks*) pada permukaan butiran. Proses difusi ini menyebabkan perubahan pada tingkat struktur mikro matriks jaringan biji secara bertahap (Sitoe et al., 2025).

Setelah berhasil berpenetrasi dan mencapai matriks endosperma, molekul ozon berinteraksi dengan kadar air intraseluler dan secara cepat terdekomposisi menghasilkan molekul ROS. Dalam proses dekomposisi ini, radikal hidroksil (OH) bertindak sebagai agen oksidator sekunder yang sangat reaktif (Kumoro et al., 2017). Radikal hidroksil ini kemudian menjadi inisiator utama yang menyerang unit anhidroglukosa pada granula pati endosperma. Serangan oksidatif ROS memicu dua mekanisme molekuler utama pada komponen karbohidrat yaitu pemutusan ikatan glikosidik α -1,4 dan α -1,6 yang menyebabkan depolimerisasi rantai panjang amilosa dan amilopektin, serta konversi gugus hidroksil bebas -OH pada molekul pati menjadi gugus fungsional baru berupa karbonil C=O dan karboksil -COOH (Zhu, 2018).

Reaksi depolimerisasi yang dikatalisis oleh ROS ini mengakibatkan struktur internal granula pati mengalami degradasi, menjadi lebih longgar, berpori, dan

mengalami peningkatan kelarutan. Secara mikroskopis, fenomena ini berdampak pada modifikasi sifat fisikokimia beras saat dimasak, seperti penurunan viskositas dan perubahan profil tekstur kelengketan nasi (Rachmaselly & Setiasih, 2019). Selain mengubah fraksi karbohidrat, sifat oksidator ROS juga memicu pemutusan ikatan rangkap pada molekul pigmen alami di lapisan aleuron BPK, yang memunculkan efek pencerahan warna atau *bleaching*. Pada saat yang bersamaan, molekul ROS merusak dinding sel mikroflora kontaminan serta menonaktifkan aktivitas enzim hidrolitik seperti lipase penyebab ketengikan (Sitoe et al., 2025; Zhu, 2018).

Penelitian ini mengembangkan metode (Shah et al., 2015) dengan menggunakan sampel gabah dan beras pecah kulit. Karena kedua jenis sampel ini memiliki pelindung fisik yang lebih tebal (sekam dan bekatul), maka diterapkan peningkatan rentang konsentrasi 0-8 ppm dengan interval 2 ppm (0; 2; 4; 6; 8 ppm) dengan waktu paparan 30 menit. Rentang ini diharapkan dapat memodifikasi struktur luar beras agar lebih permeabel terhadap air, sehingga mempercepat infiltrasi air dan mengoptimalkan aktivitas metabolisme lembaga.

2.6 Beras Kecambah

Proses fisiologis Beras Kecambah (*Germination Rice*) adalah proses kompleks yang mengubah biji dari fase dorman menjadi fase aktif secara metabolik yang melibatkan perubahan struktural seperti penyerapan air, aktivasi hormon pertumbuhan, sintesis enzim hidrolitik dan cadangan nutrisi di endosperma untuk mendukung pertumbuhan embrio. Proses perkecambahan diketahui meningkatkan nilai gizi dan kandungan senyawa bioaktif pada beras pecah kulit, sehingga beras

kecambah memiliki karakteristik nutrisi yang lebih unggul (Cho & Lim, 2016).

Proses ini dimulai dari imbibisi fase I, yaitu masuknya air kedalam biji secara cepat melalui lapisan perikarp dan testa yang memicu aktivitas hormon giberelin. Masuknya air menyebabkan rehidrasi sel, pemulihan struktur membran, dan aktivasi kembali sistem metabolisme yang sebelumnya pada kondisi dorman (Bewley, 1997). Proses imbibisi pada beras pecah kulit relatif lebih lambat dibandingkan beras putih, karena masih memiliki lapisan bran yang berfungsi sebagai penghalang difusi air. Lapisan ini berperan penting dalam mempertahankan kandungan nutrisi, seperti vitamin, mineral, dan senyawa fenolik yang berguna selama proses perkecambahan (Cho & Lim, 2016). Air yang masuk kedalam biji berperan sebagai medium reaksi biokimia dan menyediakan translokasi hormon giberelin dari embrio menuju lapisan aleuron untuk menginduksi sintesis enzim hidrolitik.

Selanjutnya biji memasuki fase II yang ditandai dengan aktivitas metabolik intensif, meskipun laju penyerapan air relatif stabil. Pada fase ini terjadi sintesis protein baru, pembentukan mitokondria, dan aktivitas respirasi seluler untuk menghasilkan energi dalam bentuk ATP (Bewley, 1997). Hormon giberelin kemudian menstimulasi sintesis dan sekresi enzim hidrolitik, hormon giberelin yang dilepaskan oleh embrio berperan dalam menginduksi ekspresi gen pengkode enzim hidrolitik seperti α -amilase, β -amilase, protease, dan lipase, yang tersimpan dalam lapisan aleuron menuju ke endosperma untuk menghidrolisis cadangan pati, protein, dan lemak di endosperma menjadi senyawa yang lebih sederhana, seperti gula pereduksi, asam amino bebas, dan asam lemak sebagai sumber energi dan

bahan penyusun struktural bagi pertumbuhan dan perkembangan embrio (He & Yang, 2013; Wang et al., 2025).

Aktivitas metabolik ini seiring dengan munculnya bakal tunas sebagai tanda dimulainya diferensiasi jaringan vegetatif awal pada biji beras yang berkecambah (Wu et al., 2013). Pada beras, aktivitas α -amilase selama perkecambahan berperan penting dalam mobilitas pati endosperma menjadi gula sederhana yang mendukung pertumbuhan kecambah (do Nascimento et al., 2022). Fase ini berkaitan juga dengan peningkatan senyawa bioaktif tertentu pada beras kecambah. Proses aktivasi enzimatik selama perkecambahan diketahui mampu meningkatkan ketersediaan hayati senyawa fungsional, seperti asam γ -aminobutirat (GABA), antioksidan fenolik, dan vitamin tertentu yang berperan penting dalam meningkatkan nilai fungsional pangan berbasis beras kecambah (Cho & Lim, 2016).

Pada fase III merupakan tahap *post-germinasi* yang ditandai dengan pemanjangan bakal tunas secara nyata sebagai indikasi pertumbuhan vegetatif awal. Pada tahap ini, jaringan embrio berkembang lebih lanjut menjadi kecambah, disertai peningkatan pembelahan sel dan pemanjangan sel. Aktivitas enzim hidrolitik tetap berlangsung untuk memastikan ketersediaan energi dan nutrisi yang cukup selama proses pertumbuhan berlangsung (Bewley, 1997). Pada beras pecah kulit, beras kecambah umumnya digunakan ketika Panjang kecambah telah mencapai sekitar 2-5mm pada tahap ketika kecambah telah tumbuh nyata dan terjadi perubahan signifikan pada sifat fisikokimia dan kandungan senyawa bioaktif, sedangkan beras prakecambah menunjukkan pada kondisi awal saat

Panjang bakal tunas berkisar antara 0,5-1mm sebelum pertumbuhan kecambah berlangsung lebih lanjut (Cho & Lim, 2016; Watanabe et al., 2004).

Tahapan perkecambahan beras pecah kulit berpengaruh langsung terhadap perubahan sifat fisikokimia dan nilai fungsional produk. Selama perkecambahan, pati mengalami hidrolisis parsial sehingga meningkatkan daya cerna pati dan mempengaruhi sifat gelatinisasi. Protein mengalami degradasi menjadi peptida dan asam amino bebas yang berpotensi meningkatkan pencernaan protein. selain itu juga, kandungan serat pangan dan senyawa bioaktif tertentu cenderung meningkat, yang menjadikan beras kecambah berpotensi dikembangkan sebagai bahan pangan fungsional (Cho & Lim, 2016).

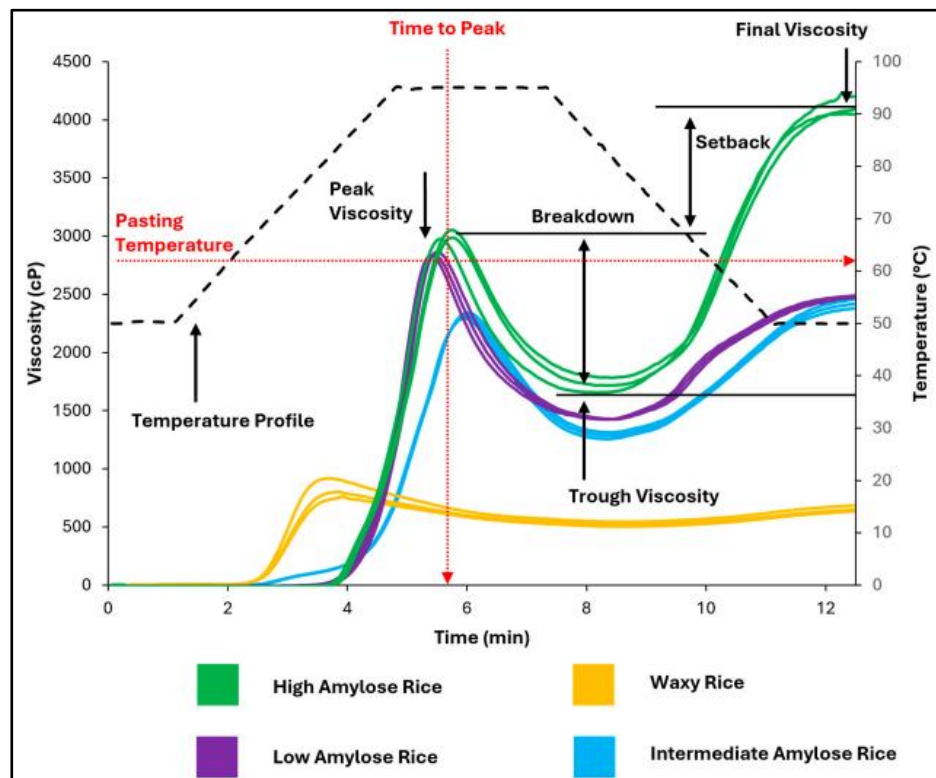
2.7 Rapid Visco Analyzer (RVA)

Sifat gelatinisasi, *pasting*, dan retrogradasi pati pada komoditas pangan seperti beras umumnya dievaluasi menggunakan instrumen bernama *Rapid Visco Analyzer* (RVA). Melalui simulasi termal berupa siklus pemanasan dan pendinginan pada suspensi pati di dalam air, RVA mampu memetakan profil kekentalan (viskositas) yang merepresentasikan perubahan struktur internal pati. Evaluasi ini sangat krusial dalam menentukan mutu beras, mengingat instrumen ini sangat sensitif terhadap fluktuasi kadar amilosa, karakteristik viskositas *pasting*, serta suhu gelatinisasi yang secara langsung menentukan sifat organoleptik atau tekstur dari nasi yang dihasilkan (Pang et al., 2016).

Fokus utama dari pengujian menggunakan RVA terletak pada karakteristik fungsional pati, khususnya kapasitas granula dalam mengikat molekul air, mengembang (*swelling*), dan bertransformasi menjadi gel akibat paparan panas.

Peningkatan viskositas sistem dipicu oleh pembengkakan granula pati seiring dengan laju imbibisi air selama proses pemanasan, suatu fenomena yang mereplikasi kondisi pengolahan pangan nyata seperti pada pembuatan sereal, saus, maupun produk bakeri. Lebih lanjut, variasi sifat *pasting* ini dikontrol oleh latar belakang genetik tanaman, faktor lingkungan penanaman, serta metode pengolahan yang diterapkan. Khusus pada komoditas beras, diversitas rasio amilosa serta kadar protein menjadi determinan utama yang menggeser karakteristik viskositas dan memengaruhi kualitas produk akhir nasi (Shi et al., 2022).

Mekanisme kerja RVA bertumpu pada pencatatan tingkat kekentalan sampel di bawah pengaruh gaya geser yang konstan selama siklus suhu berlangsung. Secara operasional, suspensi sampel mula-mula dikondisikan pada suhu sekitar 50°C, lalu ditingkatkan secara bertahap hingga mencapai kisaran 95°C, ditahan pada suhu puncak tersebut selama waktu tertentu, sebelum akhirnya didinginkan kembali. Dinamika perubahan viskositas selama fluktuasi suhu ini terekam secara sistematis dalam bentuk grafik komprehensif yang dikenal sebagai viskogram. Melalui kurva ini, tahapan pembengkakan granula, disintegrasi atau pecahnya struktur pati, hingga pembentukan matriks gel baru dapat divisualisasikan dengan jelas, sehingga memberikan pemahaman mendalam mengenai perilaku fungsional pati selama pemrosesan berbasis panas (Nastasi et al., 2025).



Sumber: (Nastasi et al., 2025)

Gambar 4. Profil Rapid Visco Analyzer (RVA)

Parameter dibawah ini berfungsi sebagai indikator untuk memproyeksikan sifat fisik dan kualitas produk pangan berbasis pati (Shi et al., 2022).

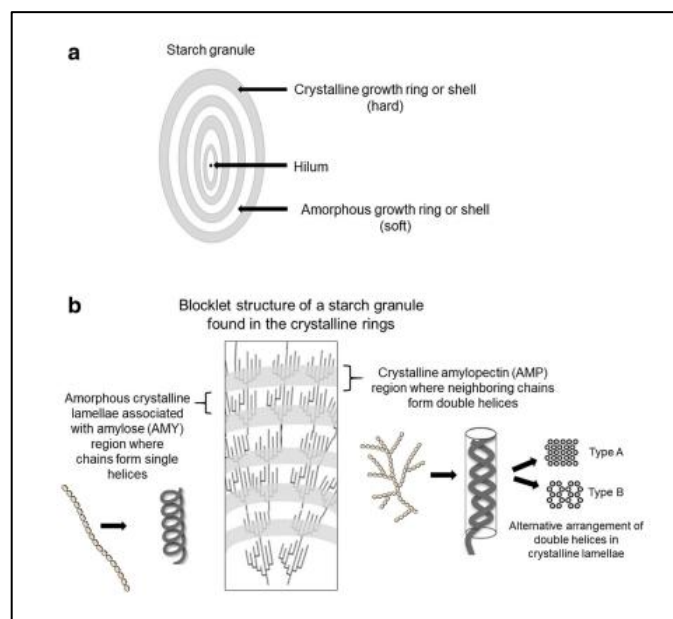
Tabel 3. Parameter *Rapid Visco Analyser* (RVA)

Parameter	Singkatan	Definisi	Arti
Suhu Gelatinisasi (<i>Pasting Temperature</i>)	PT, PTemp	Titik suhu ketika suspensi sampel mengawali fase pengentalan akibat kenaikan viskositas secara konsisten. Nilai ini menandakan mulainya transisi gelatinisasi, yaitu saat granula pati mengabsorpsi air, membengkak, dan struktur aslinya mulai terdisrupsi.	Mengindikasikan batas suhu minimal yang diperlukan pati untuk bergelatinisasi, yang krusial dalam menentukan kondisi termal optimal selama pengolahan produk pangan berbasis pati.

Parameter	Singkatan	Definisi	Arti
Viskositas Puncak (<i>Peak Viscosity</i>)	PV	Nilai kekentalan tertinggi yang terekam sepanjang siklus pemanasan instrumen RVA. Fenomena ini terjadi tepat ketika granula pati mencapai volume pengembangan maksimum sebelum akhirnya pecah atau mengalami disintegrasi.	Merepresentasikan kapasitas maksimum komponen pati dalam mengikat molekul air serta derajat hidrasinya. Parameter ini menjadi acuan utama untuk menilai potensi daya pengental (<i>thickening power</i>) pati pada produk.
Waktu Puncak (<i>Time to Peak</i>)	PTi, TTP, Tpeak	Durasi waktu yang dibutuhkan oleh sistem suspensi sampel dari awal pengujian hingga menyentuh titik viskositas tertinggi (puncak).	Memberikan informasi mengenai laju kinetika pembengkakan pati, yang sangat berguna bagi industri untuk mengevaluasi efisiensi waktu pemrosesan panas.
Viskositas Breakdown (<i>Breakdown</i>)	BD, BVis, BKD	Selisih nilai antara viskositas puncak (PV) dengan viskositas minimum/palung (TV). Nilai ini mencerminkan penurunan kekentalan akibat rusaknya dinding granula pati selama mengalami pemanasan kontinu dan paparan gaya geser mekanis.	Menunjukkan tingkat stabilitas dan ketahanan pasta pati terhadap panas dan pengadukan. Nilai penurunan yang tinggi menandakan pasta bersifat tidak stabil (rapuh) dan mudah encer, yang memengaruhi konsistensi tekstur produk.
Viskositas Minimum (<i>Trough / Minimum Viscosity</i>)	TV, Tmin, Trough, TH	Tingkat kekentalan terendah yang dicapai pasca-puncak gelatinisasi selama fase penahanan suhu konstan tertinggi, menggambarkan fase di mana granula pati mengalami kerusakan struktur paling masif.	Memberikan gambaran mengenai kekuatan mekanis matriks gel pati dalam mempertahankan kestabilan viskositasnya di bawah tekanan termal yang tinggi selama proses manufaktur.

Parameter	Singkatan	Definisi	Arti
Viskositas Setback (<i>Setback</i>)	SB, STB	Jarak kenaikan kekentalan yang dihitung dari selisih antara viskositas akhir (FV) dan viskositas minimum (TV). Parameter ini merekam pengentalan kembali saat suhu diturunkan, di mana rantai amilosa mulai saling berasosiasi membentuk jaringan gel padat.	Menjadi indikator utama untuk memprediksi kecenderungan retrogradasi pati. Nilai ini berkorelasi linear dengan pembentukan tekstur, tingkat kekerasan (<i>hardness</i>), serta stabilitas umur simpan (<i>shelf-life</i>) produk setelah dingin.
Viskositas Akhir (<i>Final Viscosity</i>)	FV	Nilai kekentalan definitif yang dicatat pada bagian akhir pengujian RVA selama fase pendinginan selesai. Komponen ini menggambarkan kestabilan reologis gel pati setelah melalui siklus pemanasan dan pendinginan komplit.	Menjadi parameter penentu kualitas tekstur akhir serta rigiditas fisik produk berbasis pati (seperti saus, gel, pasta, dan produk <i>bakery</i>) saat siap dikonsumsi.

Sumber: (Nastasi et al., 2025).



Sumber: (Balet et al., 2019).

Gambar 5. 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.

Secara struktural, pati tersusun atas matriks granula semi-kristalin yang didominasi oleh dua jenis polimer, yakni amilosa dan amilopektin. Fraksi kristalin dibentuk oleh amilopektin yang bertanggung jawab atas rigiditas dan kestabilan granula, sedangkan daerah amorf didominasi oleh amilosa yang bersifat hidrofilik atau mudah mengikat air. Konfigurasi internal ini menjadi faktor penentu utama yang mendikte perilaku termal pati saat dipanaskan, di mana dinamikanya dipetakan secara akurat melalui kurva viskogram RVA. Modifikasi arsitektur pati akibat perlakuan fisikokimia tertentu, seperti teknik ozonisasi, akan menggeser nilai parameter viskositas yang terbaca pada alat. Oleh sebab itu, instrumentasi RVA sangat aplikatif digunakan untuk mengevaluasi transformasi karakteristik fungsional pati pasca-penerapan teknologi pengolahan pangan (Balet et al., 2019).

III. METODOLOGI PENELITIAN

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

3.1 Bahan dan Alat

3.1.1 Bahan

Bahan yang digunakan untuk objek penelitian ini yaitu beras kecambah varietas inpari 32 HDB yang didapat dari BB Padi sukamandi.

Bahan yang digunakan untuk analisis yaitu sampel beras kecambah varietas inpari 32 HDB, Akuades, NaOH 25%, larutan HCl 0,1 N, larutan asam asetat 1 N, larutan Luff Schoorl, larutan KI 20%, larutan H₂SO₄ 25%, indikator amilum 1%, larutan Na₂S₂O₃ 0,1 N. Selain itu digunakan kertas sebagai media perkecambahan, plastik sebagai alas.

3.1.2 Alat

Alat utama yang digunakan untuk perlakuan objek penelitian ini yaitu Generator Ozon kering berbasis Plasma Chamber seperti *Indirect Dielectric Barrier Discharge* untuk menghasilkan gas ozon kering (O₃).

Alat yang digunakan untuk analisis yaitu Neraca Analitik dengan merek OHAUS Pioneer PA214C, Gelas Ukur Pyrex 100 mL, Cawan Porselen RRT, Tang Krus ROFA, Gelas Kimia 200 mL Iwaki, Labu Takar Pyrex 100 mL, Buret Pyrex 50 mL, Klem dan Statif, Corong Kaca Pyrex, Erlenmeyer Pyrex 125 mL, Kertas Saring Whatman No.1, Eksikator, Kondensor Duran, Alat Destilasi, Alat Pengepres, *Cabinet Dryer*, Bunsen Iwaki, Kawat Kasa Wire GAUZE, Cawan Petri, Pemanas Air Mendidih *Thermo Scientific*, dan Alat Refluks Standar. Instrumen

analisis yang digunakan yaitu *Chromameter* Konica Minolta CM-5, *Rapid Visco Analyzer* Perten Instruments RVA 4500.

3.2 Metode Penelitian

Penelitian yang akan dilakukan meliputi 2 tahap yaitu Penelitian Tahap I dan Penelitian Tahap II.

3.2.1 Penelitian Tahap I

Penelitian Tahap I dilakukan untuk menentukan parameter konsentrasi ozon yang diaplikasikan pada proses perkecambahan varietas Inpari 32. Pendekatan eksperimental yang digunakan dalam tahap ini didasarkan pada prinsip *CT Value* (*Concentration x Time*), di mana efektivitas perlakuan merupakan fungsi linier dari perkalian antara konsenrasi gas ozon (C, dalam ppm) dan waktu kontak (T, dalam menit). Prinsip ini berfungsi sebagai parameter kuantitatif untuk mengukur total dosis paparan kumulatif yang diterima oleh permukaan gabah dan beras pecah kulit. Sebagai acuan, digunakan metode dari (Shah et al., 2015) yang menerapkan perlakuan ozon dengan konsentrasi rendah dengan durasi paparan yang panjang.

Dalam penelitian ini, dilakukan modifikasi parameter melalui penyesuaian *CT value* dengan menerapkan konsentrasi yang lebih tinggi yaitu (0;2;4;6;8 ppm) dengan durasi paparan yang konstan selama 30 menit untuk mengetahui pengaruh konsentrasi ozonisasi dan kondisi beras gabah dan beras pecah kulit terhadap karakteristik fisik dan kimia beras kecambah varietas Inpari 32.

3.2.2 Penelitian Tahap II

Penelitian Tahap II yang dilakukan yaitu pembuatan beras kecambah dari kondisi beras Gabah dan Beras Pecah Kulit yang telah dilakukan ditahap

sebelumnya menggunakan Ozon Kering. Proses perkecambahan dilakukan dalam kondisi terkontrol hingga waktu yang ditentukan. Setelah proses perkecambahan selesai, kemudian dilakukan analisis terhadap karakteristik fisik dan kimia beras kecambah. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh konsentrasi ozonisasi dan kondisi beras terhadap mutu beras kecambah yang dihasilkan.

3.2.3 Rancangan Perlakuan

Rancangan perlakuan pada penelitian ini terdiri dari dua faktor yaitu konsentrasi ozon kering (O) yang terdiri dari 5 taraf dan kondisi beras (B) yang terdiri dari 2 taraf. Dasar pemilihan ini merupakan hasil *trial and error* yang telah dilakukan sebelum penelitian.

1. Faktor konsentrasi ozon kering (O) yang terdiri dari 5 taraf yaitu:

$o_1 = 0$ ppm (kontrol)

$o_2 = 2$ ppm

$o_3 = 4$ ppm

$o_4 = 6$ ppm

$o_5 = 8$ ppm

2. Faktor Kondisi beras (B) yang terdiri dari 2 taraf yaitu:

$b_1 =$ Gabah

$b_2 =$ Beras Pecah Kulit (BPK)

3.2.4 Rancangan Percobaan

Rancangan percobaan yang digunakan pada penelitian ini adalah Rancangan Acak Kelompok (RAK) 2 faktor dengan pola faktorial 5x2 sebagai berikut.

Tabel 4. Rancangan percobaan Faktorial

Konsentrasi Ozon kering (O)	Kondisi Beras (B)	Ulangan		
		1	2	3
o ₁ (0 ppm)	b ₁ (Gabah)	o ₁ b ₁	o ₁ b ₁	o ₁ b ₁
o ₂ (2 ppm)		o ₂ b ₂	o ₂ b ₂	o ₂ b ₂
o ₃ (4 ppm)		o ₃ b ₁	o ₃ b ₁	o ₃ b ₁
o ₄ (6 ppm)		o ₄ b ₂	o ₄ b ₂	o ₄ b ₂
o ₅ (8 ppm)		o ₅ b ₁	o ₅ b ₁	o ₅ b ₁
o ₁ (0 ppm)	b ₂ (Beras Pecah Kulit)	o ₁ b ₁	o ₁ b ₁	o ₁ b ₁
o ₂ (2 ppm)		o ₂ b ₂	o ₂ b ₂	o ₂ b ₂
o ₃ (4 ppm)		o ₃ b ₁	o ₃ b ₁	o ₃ b ₁
o ₄ (6 ppm)		o ₄ b ₂	o ₄ b ₂	o ₄ b ₂
o ₅ (8 ppm)		o ₅ b ₁	o ₅ b ₁	o ₅ b ₁

Rancangan percobaan dilakukan dengan tiga kali ulangan sehingga diperoleh 30 satuan percobaan. Variabel yang digunakan adalah konsentrasi ozon (O) dan kondisi beras (B). Berdasarkan rancangan percobaan di atas dapat dibuat denah (*layout*) percobaan faktorial dengan 5x2 dengan 3 kali ulangan sebagai berikut.

Tabel 5. Kelompok Ulangan Rancangan Percobaan

Kelompok Ulangan 1									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
o ₁ b ₂	o ₄ b ₁	o ₃ b ₂	o ₅ b ₁	o ₂ b ₂	o ₃ b ₁	o ₁ b ₁	o ₄ b ₂	o ₅ b ₁	o ₂ b ₂

Kelompok Ulangan 2									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
o ₂ b ₁	o ₁ b ₁	o ₄ b ₁	o ₃ b ₂	o ₅ b ₁	o ₁ b ₂	o ₅ b ₂	o ₂ b ₁	o ₃ b ₂	o ₄ b ₂

Kelompok Ulangan 3									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
o ₅ b ₂	o ₂ b ₂	o ₁ b ₁	o ₄ b ₂	o ₃ b ₁	o ₄ b ₂	o ₃ b ₁	o ₁ b ₁	o ₂ b ₂	o ₅ b ₁

Model percobaan untuk penelitian ini adalah sebagai berikut :

$$Y_{ijk} = \mu + K + S_i + T_j + (ST)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Keterangan:

i = 1,2,3,4,5 (banyaknya variasi konsentrasi ozon kering)

$j = 1,2$ (banyaknya variasi kondisi beras)

$k = 1,2,3$ (banyaknya ulangan)

Y_{ijk} = Nilai pengamatan dari kelompok ke- k , yang memperoleh taraf ke- i dari faktor (O), taraf ke- j dari faktor (B)

μ = Nilai rata-rata sebenarnya

K = Pengaruh taraf kelompok

S_i = Pengaruh perlakuan taraf ke- i faktor konsentrasi ozon

T_j = Pengaruh perlakuan taraf ke- j faktor kondisi beras

$(ST)_{ij}$ = Pengaruh interaksi antara taraf ke- i dan taraf ke- j

ε_{ijk} = Pengaruh galat karena kombinasi perlakuan ij

3.2.5 Rancangan Analisis

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

Tabel 6. Analisis Variansi Konsentrasi Ozon Kering dan Kondisi Beras terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Beras Kecambah Varietas Inpari 32

Sumber Variasi	Derajat Bebas (dB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F_{hitung}	$F_{tabel\ 5\%}$
Kelompok	$r-1$	JKK	KTK	KTP/KTG	$F_{(\alpha, db-P, db-G)}$
Faktor O	$o-1$	JK (O)	KT (O)	KT (O)/KTG	$F_{(\alpha, db-O, db-G)}$
Faktor B	$b-1$	JK (B)	KT (B)	KT (B)/KTG	$F_{(\alpha, db-B, db-G)}$
Interaksi OB	$(o-1)(b-1)$	JK (OB)	KT (OB)	KT (OB)/KTG	$F_{(\alpha, db-OB, db-G)}$
Galat	$(r-1)(ob-1)$	JKG	KTG	-	-
Total	$rob-1$	JKT	-	-	-

Sumber: (Gaspersz, 2006)

Keterangan:

r = Replikasi (Ulangan)

o = Konsentrasi ozon kering

b = Kondisi beras

Selanjutnya ditentukan hipotesis yang diterima, yaitu :

1. Jika $F_{hitung} < F_{tabel}$ pada taraf 5% atau $Sig (P-Value) > 0,05$ maka tidak ada pengaruh yang nyata antara rata-rata dari setiap perlakuan, artinya perlakuan yang diberikan tidak berpengaruh nyata terhadap karakteristik fisik dan kimia beras kecambah maka hipotesis ditolak
2. Jika $F_{hitung} \geq F_{tabel}$ pada taraf 5% atau $Sig (P-Value) < 0,05$ maka adanya pengaruh yang nyata antara rata-rata dari setiap perlakuan, artinya perlakuan yang diberikan berpengaruh terhadap karakteristik fisik dan kimia beras kecambah yang dihasilkan sehingga perlu dilakukan analisis lanjut untuk melihat perbedaan antara perlakuan dari masing-masing perlakuan pada taraf 5%.

3.2.6 Rancangan Respon

Rancangan respon yang dilakukan pada penelitian produk beras kecambah dengan konsentrasi ozon kering terdiri dari respon fisik dan respon kimia.

A. Respon Fisik

Analisis respon fisik terhadap produk beras kecambah dengan konsentrasi ozon kering yaitu analisis densitas kamba, analisis (%) rendemen, analisis (%) germinasi, analisis derajat putih, dan rapid visco analyzer (RVA).

B. Respon Kimia

Analisis respon kimia terhadap produk beras kecambah dengan konsentrasi ozon kering yaitu analisis (%) kadar air, dan analisis (%) kadar pati.

3.2.7 Penentuan Perlakuan Terbaik Menggunakan Metode *De Garmo*

Penentuan perlakuan terbaik dilakukan dengan menggunakan metode Indeks Efektivitas (*De Garmo*). Metode ini digunakan untuk membandingkan berbagai perlakuan berdasarkan berbagai parameter mutu (multikriteria) sehingga diperoleh satu perlakuan yang paling optimal secara keseluruhan. Tahapan pelaksanaan metode *De Garmo* adalah sebagai berikut:

1. Penentuan Skor Importance (Tingkat Kepentingan)

Memberikan nilai bobot pada setiap parameter menggunakan skala ordinal 1-5 yang diuji berdasarkan tingkat kepentingannya terhadap mutu produk. Penetapan nilai bobot pada setiap kriteria didasarkan pada metode penelitian pakar (*expert judgment*) sesuai dengan tingkat urgensi fisikokimia beras kecambah varietas Inpari 32 (Sugiyono, 2017), yang kemudian dinormalisasi untuk perhitungan indeks efektivitas (DeGarmo, 1984). Berikut keterangan skala dari 1-5 sebagai berikut:

1. Sangat tidak penting
2. Kurang Penting
3. Cukup penting
4. Penting
5. Sangat penting

2. Perhitungan Bobot Parameter

Bobot setiap parameter dihitung dengan membagi skor kepentingan masing-masing parameter dengan total skor kepentingan seluruh parameter. Rumus yang digunakan adalah:

$$\text{Bobot} = \frac{\text{Skor Importance Parameter}}{\sum \text{Skor Importance}}$$

Sehingga total seluruh bobot parameter berjumlah 1,00.

3. Penentuan Nilai Efektivitas (Ne)

Menghitung nilai efektivitas setiap perlakuan pada masing-masing parameter.

Nilai Efektivitas memiliki rentang antara 0 (terburuk) hingga 1 (terbaik). Rumus yang digunakan adalah:

$$NE = \frac{\text{Nilai Perlakuan} - \text{Nilai Terendah}}{\text{Nilai Tertinggi} - \text{Terendah}}$$

4. Perhitungan Nilai Perlakuan (NP)

Nilai Perlakuan (NP) atau Nilai Hasil akhir diperoleh dengan menjumlahkan hasil perkalian antara Nilai Efektivitas (NE) dengan bobot masing-masing parameter. Rumusnya adalah:

$$NP = NE \times \text{Bobot}$$

Kombinasi perlakuan yang memiliki Nilai Perlakuan (NP) tertinggi ditetapkan sebagai perlakuan terbaik atau perlakuan optimal dalam penelitian ini.

3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian yang dilakukan meliputi Penelitian Tahap I yaitu perlakuan menggunakan Ozon kering untuk kondisi beras Gabah dan Beras Pecah Kulit varietas Inpari 32, dan dilanjutkan dengan penelitian Tahap II yaitu pembuatan beras kecambah dari kondisi beras Gabah dan beras Pecah Kulit yang telah diberi perlakuan menggunakan ozon kering.

3.3.1 Prosedur Proses Ozonisasi Beras Varietas Inpari 32

Prosedur proses ozonisasi beras varietas inpari 32 dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

1. Sortasi dan Pembersihan

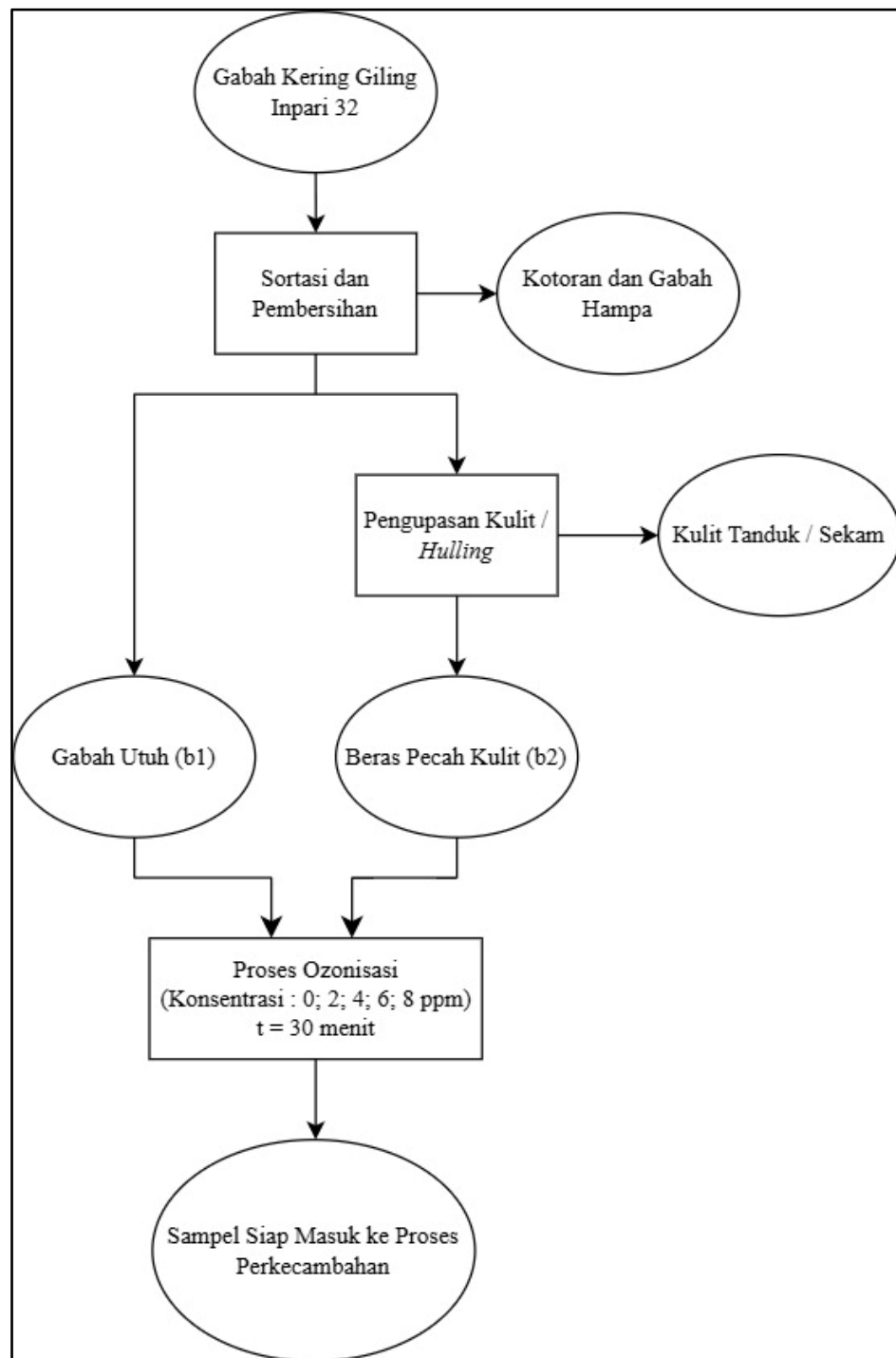
Sortasi dilakukan untuk memisahkan kotoran dari gabah dan memisahkan gabah hampa.

2. Pengupasan Kulit (*hulling*)

Pengupasan kulit dilakukan pada sampel beras pecah kulit (b2) untuk memisahkan antara beras pecah kulit dengan tanduk atau sekamnya.

3. Proses Ozonisasi

Proses ozonisasi sampel (b1) dan (b2) menggunakan berbagai konsentrasi yaitu 0; 2; 4; 6; 8 ppm berfungsi untuk mengoksidasi senyawa anti-nutrisi seperti asam fitat pada permukaan beras, serta memperbaiki porositas lapisan pericarp untuk penyerapan air yang lebih optimal dalam proses perkecambahan selanjutnya. Lama paparan ozon ditetapkan selama 30 menit untuk setiap perlakuan.



Gambar 6. Diagram Alir Proses Ozonisasi Sampel
(Sumber: (Saputra dkk., 2024) yang telah dimodifikasi)

3.3.2 Prosedur Proses Perkecambahan dan Analisis Respon Beras

Prosedur proses perkecambahan dan analisis respon beras inpari 32 dilakukan sebagai berikut:

1. Perendaman

Perendaman dilakukan dengan merendam gabah dan beras pecah kulit dengan perbandingan 1:2 (b/v) dengan akuades. Perendaman berfungsi untuk menghidrasi sel pada gabah (b1) dan beras pecah kulit (b2) yang dorman sehingga memicu reaktivitas aktivitas metabolisme dan hormonal yang diperlukan untuk memulai proses perkecambahan. Perendaman dilakukan selama 24 jam dengan melakukan pergantian air selama 12 jam sekali.

2. Penirisan

Penirisan berfungsi untuk meniriskan dan membuang akuades steril sisa perendaman pada gabah (b1) dan beras pecah kulit (b2).

3. Pembilasan

Pembilasan dilakukan setelah penirisan sampel, berfungsi untuk menghilangkan lender atau kotoran yang menempel setelah perendaman.

4. Proses perkecambahan

Proses perkecambahan dilakukan dalam kondisi gelap pada suhu ruang selama 36 jam diatas baki yang telah diberi alas kain lap hingga muncul tunas sepanjang 2-5 mm.

5. Pengeringan

Pengeringan dilakukan setelah proses perkecambahan selesai dilakukan, dengan menggunakan cabinet dryer pada suhu 55°C hingga kadar air mencapai

14%.

6. Pengupasan kulit (*hulling*)

Sampel gabah (b1) dilakukan pengupasan kulit untuk menghilangkan sekamnya, ini dilakukan untuk mempermudah pada tahap analisis respon.

7. Analisis Fisik

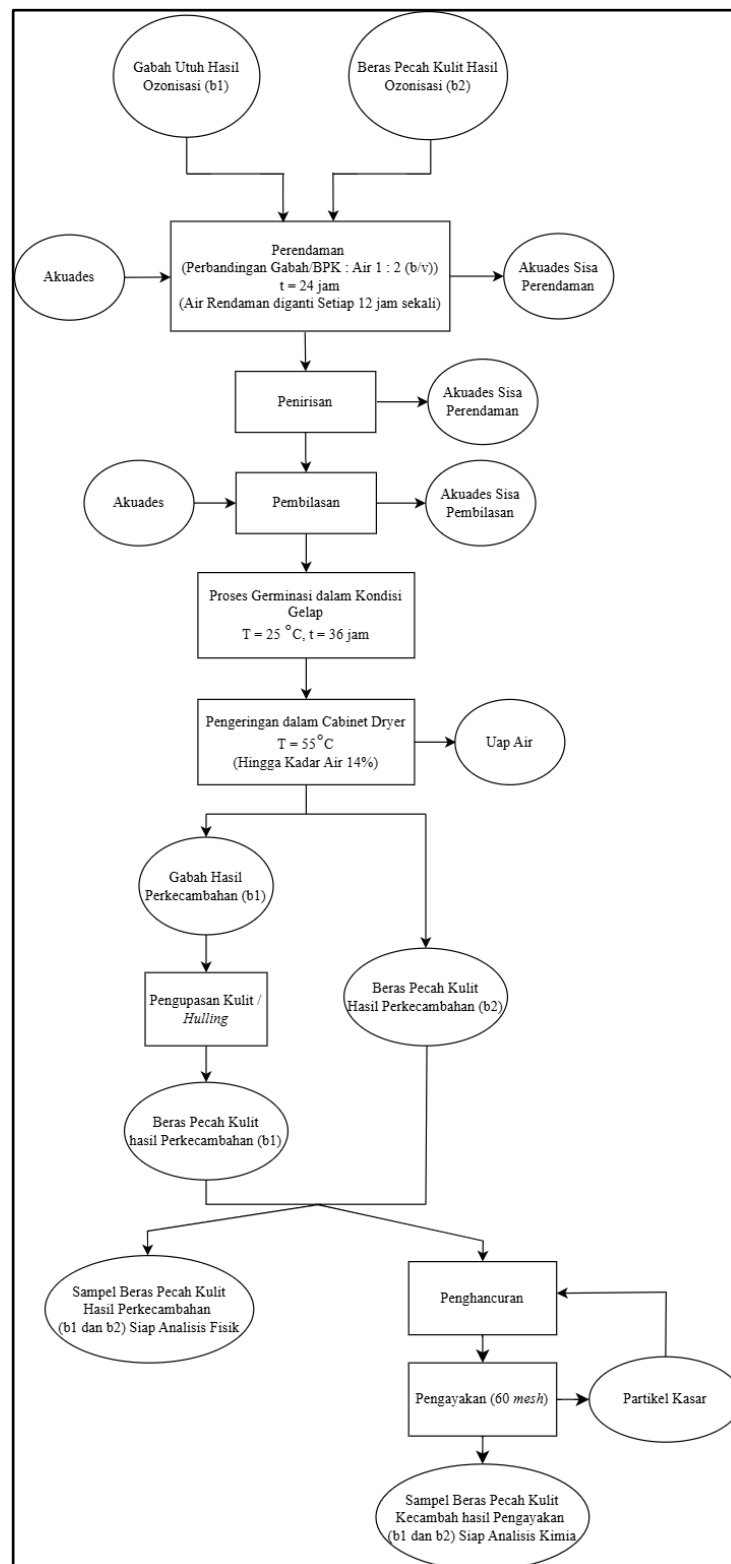
Sampel beras pecah kulit hasil perkecambahan (b1) dan beras pecah kulit hasil perkecambahan (b2) utuh dilakukan analisis secara fisik.

8. Penghancuran dan Pengayakan

Pada bagian sampel gabah (b1) dan sampel beras pecah kulit (b2) dilakukan penghancuran dan pengayakan dengan menggunakan *mesh* 60, ini dilakukan untuk mempermudah pada tahap analisis respon kimia.

9. Analisis Kimia

Hasil pengayakan sampel beras pecah kulit kecambah (b1 dan b2) hasil pengayakan dilakukan analisis respon kimia.



Gambar 7. Diagram Alir Proses Perkecambahan

(Sumber: (Saputra dkk., 2024) yang telah dimodifikasi)

3.4. Jadwal Pelaksanaan Penelitian

Tabel 7. Jadwal Pelaksanaan Penelitian

No.	Uraian Kegiatan	2025			2026						
		Okt	Nov	Des	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul
1.	Penentuan mengenai Topik dan Judul Penelitian serta Studi Pustaka										
2.	Penulisan Proposal Usulan Penelitian										
3.	Proses Bimbingan dengan Pembimbing II										
4.	Proses Bimbingan dengan Pembimbing I										
5.	Seminar Usulan Penelitian										
6.	Pelaksanaan Penelitian										
7.	Pengolahan Data Hasil Penelitian										
8.	Proses Bimbingan dengan Pembimbing II										
9.	Proses Bimbingan dengan Pembimbing I										
10.	Sidang Tugas Akhir										
11.	Publikasi Jurnal										

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini mengurai mengenai: (1) Penelitian Tahap I dan (2) penelitian Tahap II

4.1 Penelitian Tahap I

Dalam penelitian ini, dilakukan modifikasi parameter melalui penyesuaian CT value dengan menerapkan konsentrasi yang lebih tinggi yaitu (0;2;4;6;8 ppm) dengan durasi paparan yang konstan selama 30 menit. Berdasarkan modifikasi tersebut, nilai kuantitatif CT *value* yang ditetapkan dalam penelitian ini secara berurutan adalah 0;60;120;180;240 ppm·menit. Modifikasi rasio konsentrasi dan waktu kontak ini bertujuan untuk mencapai efisiensi waktu proses produksi yang lebih singkat tanpa mengesampingkan efektivitas oksidatif yang dibutuhkan untuk menginisiasi metabolisme benih.

Peningkatan konsentrasi ozon pada durasi yang singkat selama 30 menit menciptakan gradien konsentrasi yang tajam antara fase gas ozon di luar bahan dengan fase internal di dalam matriks biji padi (Shah et al., 2015). Gradien yang tajam ini mempercepat laju difusi gas ozon untuk menembus lapisan pelindung luar seperti sekam pada gabah dan lapisan perikarp dan aleuron pada beras pecah kulit. Perhitungan CT value ini memastikan bahwa meskipun terdapat perubahan pada rasio konsentrasi dan waktu, dosis paparan ozon tetap berada dalam rentang subletal yang aman untuk bertindak sebagai molekul sinyal yang menstimulasi hormon giberelin. Akibatnya, pemecahan dormansi biji dapat di percepat tanpa memicu stres oksidatif berlebih yang berpotensi menimbulkan kerusakan struktural yang berlebih pada beras.

4.2 Penelitian Tahap II

Penelitian yang dilakukan adalah untuk mengetahui bagaimana pengaruh konsentrasi ozon kering dan kondisi beras terhadap karakteristik beras kecambah varietas inpari 32.

Respon yang diuji dalam penelitian ini terdiri dari respon fisik yaitu Densitas Kamba, % Rendemen, % Germinasi, Derajat Putih, dan *Rapid Visco Analyzer*. Pengujian Densitas Kamba dan % Rendemen dilakukan untuk melihat apakah perlakuan ozon mengubah kepadatan tumpukan dan ketahanan butir beras agar beras tidak mudah patah pada saat proses pengupasan (*hulling*). Selanjutnya % Germinasi diuji sebagai indikator utama untuk memastikan perlakuan ozon memicu pertumbuhan benih tanpa merusak embrio, derajat putih juga diuji untuk melihat efektivitas ozon dalam memperbaiki visual beras.

Respon kimia yaitu (%) Kadar Air, dan (%) Kadar Pati (*Luff Schoorl*). Kadar air diuji sebagai tolak ukur kestabilan produk akhir selama masa simpan, analisis kadar pati dilakukan untuk melihat sejauh mana proses ozonisasi memicu degradasi nutrisi atau makromolekul di dalam beras kecambah yang dihasilkan.

4.2.1 Respon Fisik

1. Densitas Kamba

Berdasarkan tabel ANAVA diketahui bahwa $F_{hitung} > F_{tabel}$ 5%, maka dapat disimpulkan bahwa faktor (b) kondisi beras berpengaruh nyata terhadap Densitas kamba. Oleh karena itu, uji lanjut Duncan dilakukan pada interaksi (ob) untuk melihat kombinasi perlakuan terbaik. Diperoleh nilai rata-rata di antara 1,16 g/mL hingga 1,39 g/mL. Sedangkan nilai rata-rata lainnya dijabarkan dalam tabel

7. Sementara itu, faktor (o) konsentrasi ozon tidak berpengaruh nyata terhadap Densitas Kamba sehingga tidak dilakukan uji lanjut.

Tabel 8. Pengaruh Interaksi Konsentrasi Ozon dan Kondisi Beras Terhadap Densitas Kamba Beras Kecambah Varietas Inpari 32

Konsentrasi Ozon (o)	Densitas Kamba (g/mL)		Taraf Nyata 5%
	Kondisi Beras (b)	Rata-rata	
0 ppm (o1)	b1	1,37	b
	b2	1,16	a
2 ppm (o2)	b1	1,38	b
	b2	1,16	a
4 ppm (o3)	b1	1,35	b
	b2	1,23	a
6 ppm (o4)	b1	1,37	b
	b2	1,20	a
8 ppm (o5)	b1	1,39	b
	b2	1,17	a

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

Berdasarkan hasil Uji Lanjut Duncan pada taraf 5%, diketahui bahwa perlakuan antara konsentrasi ozon dan kondisi beras memberikan pengaruh signifikan terhadap densitas kamba. Kondisi beras gabah (b1) secara konsisten menghasilkan densitas kamba lebih tinggi (1,35-1,39 g/mL) dibandingkan dengan beras pecah kulit (b2) (1,16-1,23 g/mL). Pada kondisi gabah konsentrasi ozon hingga 8 ppm (o5) menghasilkan densitas tertinggi sebesar 1,39 g/mL, yang berbeda nyata dengan perlakuan 4 ppm (o3). Sementara itu, pada beras pecah kulit, densitas kamba justru mengalami peningkatan signifikan pada konsentrasi 4 ppm (1,23 g/mL) dan 6 ppm (1,20 g/mL) sebelum kembali menurun pada konsentrasi 8 ppm (1,17 g/mL).

Densitas kamba adalah perbandingan antara massa bahan dengan volume totalnya, yang mencakup ruang antar butiran. Parameter ini merupakan indikator untuk mengukur kerapatan tumpukan bahan yang dipengaruhi oleh bentuk fisik butiran, tekstur permukaan, serta porositas ruang kosong di antara butiran tersebut. Hasil analisis Dwi Arah antara konsentrasi ozon dan kondisi beras terhadap densitas kamba dijabarkan pada tabel 8 yaitu:

Tabel 9. Dwi Arah Antara Konsentrasi Ozon dan Kondisi Beras Terhadap Densitas Kamba Beras Kecambah Varietas Inpari 32

Konsentrasi Ozon (o)	Kondisi Beras (b)	
	b1 (Gabah)	b2 (Beras pecah kulit)
o1 (0ppm)	1,37 b	1,16 a
o2 (2ppm)	1,38 b	1,16 a
o3 (4ppm)	1,35 b	1,23 a
o4 (6ppm)	1,37 b	1,20 a
o5 (8ppm)	1,39 b	1,17 a

Keterangan: Nilai rata-rata yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji lanjut Duncan. Notasi huruf kecil dibaca horizontal sedangkan huruf kapital di baca vertikal.

Peningkatan atau penurunan densitas kamba dalam penelitian ini dipicu oleh adanya perubahan morfologi permukaan beras akibat paparan gas ozon. Kondisi gabah (b1) secara konsisten memiliki densitas kamba lebih tinggi karena lapisan

sekam berfungsi sebagai pelindung mekanis yang kaku, menjaga volume butiran tetap stabil selama proses perkecambahan. Sebaliknya, pada beras pecah kulit (b2), paparan ozon berinteraksi langsung dengan endosperma. Pada konsentrasi rendah hingga sedang (4 ppm), oksidasi ozon diduga memodifikasi lapisan permukaan beras secara optimal, sehingga meningkatkan keseragaman bentuk butiran setelah proses imbibisi air. Bentuk butiran yang lebih seragam ini meningkatkan efisiensi penyusunan tumpukan dan meminimalkan ruang kosong antar butiran, yang secara fisik meningkatkan densitas kamba.

Namun, konsentrasi yang lebih tinggi (6-8 ppm) diduga memicu erosi mikro pada permukaan butiran sebagaimana dijelaskan dalam penelitian (Shah et al., 2015). Erosi mikro (*pitting*) ini meningkatkan kekasaran permukaan yang secara fisik menambah ruang kosong (porositas) antar butiran saat ditumpuk, sehingga menurunkan nilai densitas kamba. Proses ini diperparah dengan perbedaan laju imbibisi air yang lebih cepat pada beras pecah kulit dibandingkan gabah, menyebabkan pengembangan (*swelling*) yang mengubah dimensi butiran beras.

Sementara itu, terdapat tren fluktuasi numerik pada kelompok perlakuan gabah (b1) dari konsentrasi 0 ppm hingga 8 ppm. Meskipun secara statistika tidak berbeda nyata, fenomena ini merepresentasikan adanya stimulasi metabolisme internal pada proses germinasi dan modifikasi fisik eksternal (jaringan sekam) akibat paparan ozon. Penurunan densitas kamba menjadi 1,35 g/mL pada perlakuan ozon 4 ppm (o3b1) merupakan fase dominasi metabolisme internal, di mana dosis sub-letal ozon mengaktifkan enzim α -amilase untuk merombak pati menjadi gula reduksi (Patil & Khan, 2011). Proses ini meningkatkan tekanan osmotik internal

yang mempercepat laju imbibisi air, menyebabkan komponen seluler di dalam sekam membengkak dan memicu erosi mikro volume biji yang menurunkan kerapatan tumpukan (Juliano, 1993).

Ketika konsentrasi ditingkatkan menjadi 6–8 ppm (o4b1 dan o5b1), terjadi fase dominasi modifikasi fisik sekam. Paparan ozon pekat mendegradasi komponen organik kasar (lignin) serta mengikis trikoma (rambut halus) pada permukaan sekam (Pandiselvam et al., 2019; Shah et al., 2015). Pengikisan ini membuat tekstur luar gabah menjadi lebih halus, menurunkan gaya gesek antar-butiran, dan memperkecil ruang kosong saat ditumpuk. Akibatnya, tumpukan gabah tersusun lebih rapat dan padat, yang secara fisik meningkatkan kembali nilai densitas kamba hingga titik tertinggi sebesar 1,39 g/mL pada perlakuan (o5b1).

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan (Pandiselvam et al., 2019) yang menyatakan bahwa aplikasi ozon pada sereal mampu mengubah karakteristik fisik butiran melalui mekanisme oksidasi permukaan. Lebih lanjut pada penelitian (Banurea et al., 2020) memperkuat bahwa perbedaan struktur fisik benih, khususnya keberadaan pelindung sekam, berpengaruh signifikan terhadap densitas tumpukan. Namun, hasil ini berbeda dengan (Khadre et al., 2001) yang menyatakan bahwa penurunan densitas drastis pada konsentrasi ozon tinggi. Dalam penelitian ini, pemberian ozon hingga 8 ppm pada beras varietas Inpari 32 tidak menyebabkan kerusakan struktur yang masif, melainkan hanya memodifikasi permukaan yang masih dalam rentang toleransi fisik normal, sehingga densitas kamba tetap berada pada kisaran yang dapat diterima untuk kualitas beras kecambah.

2. % Rendemen

Berdasarkan tabel ANAVA diketahui bahwa $F_{hitung} > F_{tabel}$ 5%, maka dapat disimpulkan bahwa faktor (o) konsentrasi ozon, faktor (b) kondisi beras, dan interaksi (ob) berpengaruh nyata terhadap % Rendemen. Oleh karena itu, uji lanjut Duncan dilakukan pada interaksi (ob) untuk melihat kombinasi perlakuan terbaik secara menyeluruh. Uji lanjut Duncan tidak dilakukan pada faktor (o) konsentrasi ozon dan faktor (b) kondisi beras karena pengaruh kedua faktor tunggal tersebut sudah terwakili secara detail di dalam hasil uji interaksi (ob). Perlakuan konsentrasi ozon pada kondisi beras gabah dan beras pecah kulit, mendapatkan nilai rata-rata di antara 84,50% hingga 98,50%. Sedangkan nilai rata-rata lainnya dijabarkan dalam tabel 9 yaitu:

Tabel 10. Pengaruh Interaksi Konsentrasi Ozon dan Kondisi Beras Terhadap (%) Rendemen Beras Kecambah Varietas Inpari 32

Konsentrasi Ozon (o)	(%) Rendemen		Taraf Nyata 5%
	Kondisi Beras (b)	Rata-rata	
0 ppm (o1)	b1	98,33	e
	b2	84,50	a
2 ppm (o2)	b1	98,21	e
	b2	93,25	c
4 ppm (o3)	b1	97,14	d
	b2	86,17	b
6 ppm (o4)	b1	98,33	e
	b2	86,15	b
8 ppm (o5)	b1	98,50	e
	b2	86,06	b

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

Berdasarkan hasil Uji Lanjut Duncan pada taraf 5%, diketahui bahwa terdapat perbedaan signifikan antar perlakuan penerapan konsentrasi ozon dan kondisi

beras, nilai rata-rata % Rendemen tertinggi didapatkan melalui konsentrasi ozon (8 ppm) dan kondisi beras (gabah) atau pada perlakuan (o5b1) dengan nilai 98,50%. Sedangkan nilai rata-rata % rendemen terendah didapatkan melalui perlakuan konsentrasi ozon (0 ppm) dan kondisi beras (beras pecah kulit) pada perlakuan (o1b2) dengan nilai 84,50%.

Rendemen merupakan parameter proses yang menunjukkan perbandingan berat akhir produk dibandingkan dengan berat bahan awal. Penurunan (%) Rendemen dalam penelitian ini berkaitan erat dengan proses metabolisme yang terjadi selama perkecambahan. Selama fase ini, benih melakukan aktivitas respirasi dan hidrolisis cadangan makanan pati dan protein untuk menyediakan energi bagi pertumbuhan embrio. Konsumsi cadangan makanan tersebut secara alami akan menurunkan bobot kering bahan, yang terlihat pada penurunan (%) rendemen. Hasil analisis Dwi Arah antara konsentrasi ozon dan kondisi beras terhadap % rendemen dijabarkan pada tabel 10 yaitu:

Tabel 11. Dwi Arah Antara Konsentrasi Ozon dan Kondisi Beras Terhadap (%) Rendemen Beras Kecambah Varietas Inpari 32

Konsentrasi Ozon (o)	Kondisi Beras (b)	
	b1 (Gabah)	b2 (Beras pecah kulit)
o1 (0ppm)	98,33 b	84,50 a
o2 (2ppm)	98,21 b	93,25 a
o3 (4ppm)	97,14 b	86,17 a
o4 (6ppm)	98,33 b	86,15 a
o5 (8ppm)	98,50 b	86,06 a

Keterangan: Nilai rata-rata yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji lanjut Duncan. Notasi huruf kecil dibaca horizontal sedangkan huruf kapital di baca vertikal.

Paparan ozon bertindak sebagai stresor oksidatif yang memodifikasi laju metabolisme yang terjadi selama perkecambahan. Pada kondisi Beras Pecah kulit (b2), paparan ozon yang tidak terproteksi oleh sekam, paparan ozon konsentrasi rendah (2 ppm) terbukti menghasilkan rendemen tertinggi sebesar 93,25% dibandingkan perlakuan lainnya. Hal ini diduga karena ozon pada konsentrasi rendah berfungsi sebagai stimulan ringan yang mengoptimalkan efisiensi penggunaan cadangan makanan untuk energi pertumbuhan, sehingga meminimalkan kehilangan bobot kering akibat respirasi.

Namun, ketika konsentrasi ozon ditingkatkan menjadi 4-8 ppm, nilai % rendemen beras pecah kulit kembali menurun nyata berkisar 86%. Peningkatan konsentrasi ozon ini memicu stres oksidatif yang lebih tinggi, sehingga meningkatkan laju imbibisi air secara berlebih dan memicu aktivitas enzim hidrolitik seperti amilase menjadi lebih agresif di awal perkecambahan. Menurut (Pandiselvam et al., 2019), peningkatan aktivitas metabolik yang dipicu oleh stress oksidatif ini mempercepat degradasi cadangan pati, sehingga kehilangan massa pada beras pecah kulit menjadi lebih besar.

Pada kondisi gabah (b1), struktur sekam berfungsi sebagai barrier fisik yang mengatur laju difusi air dan gas. Hal ini menyebabkan proses metabolisme selama perkecambahan jauh lebih terkontrol dibandingkan beras pecah kulit. Penurunan rendemen pada gabah yang diberi perlakuan ozon lebih stabil di kisaran 97-98% karena ozon tidak berinteraksi langsung dengan endosperma, sehingga kehilangan massa akibat pelarutan padatan (*leaching*) selama proses perendaman dan perkecambahan menjadi lebih sedikit.

Terdapat tren fluktuasi numerik pada kelompok perlakuan gabah (b1) dari konsentrasi 0 ppm hingga 8 ppm. Penurunan rendemen yang signifikan hingga titik terendah pada perlakuan 4 ppm (o3b1) mengindikasikan fase dominasi metabolisme internal, di mana dosis sub-letal ozon berhasil memicu pelepasan enzim amilolitik secara masif untuk mempercepat laju respirasi benih (Patil & Khan, 2011). Karena proses respirasi mengkonversi cadangan karbohidrat menjadi gas CO₂ dan uap air yang dilepaskan ke udara, terjadi kehilangan bobot kering bahan (Copeland, 2001). Namun, saat konsentrasi ditingkatkan ke rentang 6-8 ppm

(o4b1 dan o5b1), rendemen perlahan naik Kembali hingga mencapai puncaknya di angka 98,50%. Hal ini dipicu oleh efek konsentrasi ozon tinggi yang mampu menekan kembali laju respirasi berlebih agar tidak boros energi (*metabolic arrest*) (Zhu, 2018), sekaligus mengoksidasi dinding sel sekam bagian dalam sehingga meminimalkan keluarnya komponen padatan terlarut seperti gula pereduksi, asam amino bebas, dan mineral menuju air rendaman (Cho & Lim, 2016).

Perbandingan yang sangat kontras juga terlihat pada kondisi control tanpa ozon (0 ppm), di mana rendemen gabah berada di angka 98,33% (o1b1) sedangkan beras pecah kulit hanya 84,50% (o1b2). Penurunan ini disebabkan oleh hilangnya lapisan sekam pelindung pada beras pecah kulit yang memicu terjadinya kebocoran padatan dalam jumlah besar ke media cair (Juliano, 1993b). Karakteristik air rendaman beras pecah kulit kontrol yang kaya akan nutrisi terlarut tersebut menjadi media pertumbuhan yang sangat ideal bagi mikroflora *indigenous* seperti bakteri, kapang, dan khamir (Yang et al., 2023). Karena tidak ada agen *sanitizer* (ozon) pada perlakuan ini, mikroba berkembang biak secara agresif dan memfermentasi karbohidrat pada permukaan terbuka beras pecah kulit menjadi asam organik dan gas (Guzel-Seydim et al., 2004). Aktivitas metabolisme mikroba pencemar inilah yang secara masif mendegradasi bobot kering beras, sehingga nilai % rendemen akhir pada perlakuan o1b2 jatuh ke titik paling rendah.

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan (Banurea et al., 2020), yang menyatakan bahwa efisiensi berat akhir (rendemen) selama perkecambahan sangat dipengaruhi oleh integritas struktur benih dan kontrol laju metabolisme. Maka dari itu, penurunan rendemen pada perlakuan ozon konsentrasi tinggi merupakan hasil

akumulatif dari *leaching* permukaan akibat oksidasi ozon dan percepatan metabolisme selama proses perkecambahan.

3. % Germinasi

Berdasarkan tabel ANAVA diketahui bahwa $F_{hitung} > F_{tabel}$ 5%, maka dapat disimpulkan bahwa faktor (o) konsentrasi ozon, faktor (b) kondisi beras, dan interaksi (ob) berpengaruh nyata terhadap % Germinasi. Oleh karena itu, uji lanjut Duncan dilakukan pada interaksi (ob) untuk melihat kombinasi perlakuan terbaik secara menyeluruh. Uji lanjut Duncan tidak dilakukan pada faktor (o) konsentrasi ozon dan faktor (b) kondisi beras karena pengaruh kedua faktor tunggal tersebut sudah terwakili secara detail di dalam hasil uji interaksi (ob). Perlakuan konsentrasi ozon pada kondisi beras gabah dan beras pecah kulit, mendapatkan nilai rata-rata di antara 46,00% hingga 97,33%. Sedangkan nilai rata-rata lainnya dijabarkan dalam tabel 11 yaitu:

Tabel 12. Pengaruh Interaksi Konsentrasi Ozon dan Kondisi Beras Terhadap (%) Germinasi Beras Kecambah Varietas Inpari 32

Konsentrasi Ozon (o)	(%) Germinasi		Taraf Nyata 5%
	Kondisi Beras (b)	Rata-rata	
0 ppm (o1)	b1	74,67	c
	b2	52,67	b
2 ppm (o2)	b1	86,67	d
	b2	75,33	c
4 ppm (o3)	b1	87,33	d
	b2	54,67	b
6 ppm (o4)	b1	95,33	e
	b2	47,33	a
8 ppm (o5)	b1	97,33	e
	b2	46,00	a

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

Berdasarkan hasil Uji Lanjut Duncan pada taraf 5%, diketahui bahwa terdapat perbedaan signifikan antar perlakuan penerapan konsentrasi ozon dan kondisi beras, nilai rata-rata % Germinasi tertinggi didapatkan melalui konsentrasi ozon (8 ppm) dan kondisi beras (gabah) atau pada perlakuan (o5b1) dengan nilai 97,33%. Sedangkan nilai rata-rata % germinasi terendah didapatkan melalui perlakuan konsentrasi ozon (8 ppm) dan kondisi beras (beras pecah kulit) atau pada perlakuan (o5b2) dengan nilai 46,00%.

% Germinasi merupakan indikator vital yang mencerminkan viabilitas dan vitalitas benih. Hasil analisis Dwi Arah antara konsentrasi ozon dan kondisi beras terhadap % germinasi dijabarkan pada tabel 12 yaitu:

Tabel 13. Dwi Arah Antara Konsentrasi Ozon dan Kondisi Beras Terhadap (%) Germinasi Beras Kecambah Varietas Inpari 32

Konsentrasi Ozon (o)	Kondisi Beras (b)	
	b1 (Gabah)	b2 (Beras pecah kulit)
o1 (0ppm)	74,67 A b	52,67 B a
o2 (2ppm)	86,67 B b	75,33 C a
o3 (4ppm)	87,33 B b	54,67 B a
o4 (6ppm)	95,33 C b	47,33 A a
o5 (8ppm)	97,33 C b	46,00 A a

Keterangan: Nilai rata-rata yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji lanjut Duncan. Notasi huruf kecil dibaca horizontal sedangkan huruf kapital di baca vertikal.

Kedua kondisi beras memberikan respon yang sangat kontras terhadap peningkatan konsentrasi ozon, pada kondisi gabah (b1), persentase germinasi menunjukkan peningkatan yang signifikan seiring bertambahnya dosis ozon, di mana perlakuan 6-8 ppm memicu kapabilitas germinasi tertinggi (95,33-97,33%). Peningkatan ini diduga berkaitan dengan efek stimulasi dari stress oksidatif ringan yang memicu aktivitas metabolik benih tanpa merusak strukturnya. Paparan ozon yang terkontrol mampu mengaktifkan enzim-enzim hidrolitik di dalam benih serta meningkatkan permeabilitas membran sel terhadap air dan gas. Menurut (Pandiselvam et al., 2019), mekanisme ini mempercepat proses imbibisi yang merupakan tahap awal yang krusial dalam perkecambahan, sehingga memacu benih untuk tumbuh lebih cepat dan seragam.

Pada konsentrasi beras pecah kulit (b2), % germinasi hanya mengalami peningkatan optimal pada konsentrasi rendah yaitu 2 ppm sebesar 75,33%, namun langsung menurun Ketika dosis ozon di tingkatkan ke 4-8 ppm hingga menyentuh angka terendah 46,00%. Penurunan drastis pada konsentrasi tinggi ini mengindikasikan bahwa kapasitas antioksidan alami pada beras pecah kulit telah terlampaui. Tanpa adanya proteksi sekam, ozon dosis tinggi bertindak sebagai agen toksik yang memicu akumulasi *Reactive Oxygen Species* (ROS) secara berlebihan. Akumulasi ROS yang tidak terkendali ini akan merusak integritas membran sel embrio melalui peroksidasi lipid dan menghambat sintesis protein (Gill & Tuteja, 2010) kecambah (Gill & Tuteja, 2010).

Perbedaan kondisi fisik benih memberikan respon kontras. Gabah (b1) menunjukkan % germinasi yang lebih stabil karena keberadaan sekam yang berfungsi sebagai penghalang fisik. Sekam melindungi jaringan embrio dari kontak langsung dengan gas ozon berkonsentrasi tinggi, sehingga ozon hanya memodifikasi permukaan untuk mempercepat imbibisi tanpa merusak bagian dalam benih. Sebaliknya pada beras pecah kulit (b2) memiliki resiko kerusakan lebih tinggi. Tanpa adanya sekam, embrio terekspos langsung oleh oksidator, sehingga sangat sensitif terhadap perubahan konsentrasi ozon yang drastis. Hal ini sejalan dengan temuan (Tiwari et al., 2010), bahwa efektivitas paparan ozon sangat dipengaruhi oleh integritas struktural benih, benih yang kehilangan lapisan pelindung alami menjadi jauh lebih rentan terhadap kerusakan fungsional dibandingkan benih utuh.

Karakteristik % germinasi dalam penelitian ini menunjukkan sebab akibat yang linear dengan nilai % rendemen, kadar pati dan aktivitas mikrobiologi bahan. Pada beras pecah kulit 0 ppm (o1b2), tidak adanya sekam memicu padatan terlarut ke media perendaman yang menjadi nutrisi bagi pertumbuhan mikroflora *indigenous* seperti bakteri, kapang, dan khamir karena tidak adanya sanitiser ozon (Juliano, 1993; Wu et al., 2013). Aktivitas fermentasi mikroba tersebut tidak hanya mendegradasi pati yang menurunkan rendemen hingga titik terendah (84,50%), tetapi juga menghasilkan metabolit asam yang meracuni embrio sehingga % germinasinya rendah (Guzel-Seydim et al., 2004). Sebaliknya, konsentrasi ozon 2 ppm (o2b2) efektif mensanitasi permukaan beras pecah kulit tanpa merusak jaringan internal, sehingga menekan kerusakan oleh mikroba, mempertahankan

berat komponen pati (% rendemen tinggi 93,25%), dan memacu hormon giberelin untuk perkecambahan optimal (75,33%) (do Nascimento et al., 2022).

Korelasi antar parameter yang konsisten juga terjadi pada kelompok gabah (b1). Pada konsentrasi 4 ppm (o3b1), kenaikan nyata % germinasi (87,33%) berbanding lurus dengan penurunan kadar pati dan % rendemen ke titik terendah (97,14%). Dosis sub-lethal 4 ppm ini mengaktifasi enzim α -amilase untuk merombak pati menjadi gula pereproduksi sebagai energi respirasi seluler perkecambahan (Patil & Khan, 2011). Respirasi tersebut mengkonversi massa karbon padat menjadi gas CO₂ yang menguap, sehingga terjadi susut bobot kering yang menurunkan nilai rendemen (Copeland, 2001). Namun pada konsentrasi 8 ppm (o5b1), % germinasi mencapai puncak tertinggi (97,33%), diikuti kembalinya % rendemen ke tingkat maksimal (98,50%). Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi ozon tinggi mampu memicu fiksasi oksidatif sekam untuk menekan laju *leaching* zat terlarut (Cho & Lim, 2016) sekaligus mengontrol laju respirasi agar tidak terjadi pemborosan cadangan makanan (Zhu, 2018).

Fenomena fluktuasi ini secara komprehensif mengonfirmasi adanya pengaruh hormesis yang jalurnya dimodifikasi oleh kondisi fisik pelindung benih. Hormesis merupakan suatu fenomena respon biologis di mana suatu stresor atau senyawa zat aktif (ozon kering) memberikan efek stimulasi, atau menguntungkan pada dosis rendah hingga menengah, namun bergeser menjadi efek inhibisi, toksik, hingga letal ketika dosisnya melewati ambang batas toleransi sel. Pada kondisi beras pecah kulit (b2), ambang batas hormesis positif ini tercapai sangat awal yaitu hanya pada dosis rendah 2 ppm (75,33%), karena ketiadaan sekam menyebabkan radikal bebas

langsung berpenetrasi ke dalam jaringan. Sebaliknya pada kondisi gabah (b1), keberadaan sekam menggeser kurva respons hormesis ke arah dosis yang lebih tinggi, sehingga paparan ozon hingga 6–8 ppm justru menjadi stimulan optimum (95,33%–97,33%) tanpa merusak sel internal. Stres oksidatif ringan pada fase hormesis positif ini bertindak sebagai molekul sinyal yang mengupregulasi ekspresi gen dan mengaktifasi enzim-enzim hidrolitik endogen untuk metabolisme perkecambahan. Namun, ketika dosis ozon ditingkatkan melewati ambang batas toleransinya terutama pada perlakuan beras pecah kulit dosis 4–8 ppm akumulasi *Reactive Oxygen Species* (ROS) yang radikal menjadi tidak terkendali dan memicu terjadinya fase *metabolic arrest*.

Fase *metabolic arrest* merupakan mekanisme pertahanan seluler tingkat lanjut di mana embrio secara aktif menghentikan atau menurunkan laju metabolisme ke titik minimum untuk mempertahankan viabilitas makromolekul esensial dari degradasi permanen. Dalam kondisi stres oksidatif ekstrem ini, sel menghentikan sintesis protein non-esensial untuk perkecambahan dan menekan respirasi seluler secara drastis untuk mencegah lisis sel, yang secara visual menjelaskan mengapa persentase germinasi kelompok BPK langsung merosot tajam hingga menyentuh angka 46,00%.

Dinamika fluktuasi aktivitas enzimatis selama fase perkecambahan ini secara linier menjadi landasan utama yang mengontrol profil viskositas pada pengujian amilografi RVA selanjutnya (Pandiselvam et al., 2019; Wu et al., 2013). Pola tersebut menjelaskan mengapa degradasi pati oleh enzim internal mencapai puncaknya pada perlakuan gabah (4 ppm) yang berkorelasi dengan raihan kurva

viskogram RVA paling landai akibat hilangnya tekanan turgor granula pati, serta berbalik naik secara signifikan pada dosis 6–8 ppm akibat terjadinya penahanan aktivitas metabolisme serta inaktivasi parsial pada gugus fungsi sisi aktif enzim hidrolitik tersebut (Khadre et al., 2001; Pandiselvam et al., 2019).

4. Derajat Putih

Berdasarkan tabel ANAVA diketahui bahwa $F_{hitung} > F_{tabel}$ 5%, maka dapat disimpulkan bahwa faktor (o) konsentrasi ozon, faktor (b) kondisi beras, dan interaksi (ob) berpengaruh nyata terhadap Derajat Putih. Oleh karena itu, uji lanjut Duncan dilakukan pada interaksi (ob) untuk melihat kombinasi perlakuan terbaik secara menyeluruh. Perlakuan konsentrasi ozon pada kondisi beras gabah (b1) dan beras pecah kulit (b2), mendapatkan nilai rata-rata di antara 76,03 hingga 80,68. Sedangkan nilai rata-rata lainnya dijabarkan dalam tabel 13 yaitu:

Tabel 14. Pengaruh Konsentrasi Ozon dan Kondisi Beras Terhadap Derajat Putih Beras Kecambah Varietas Inpari 32

Konsentrasi Ozon (o)	Derajat Putih		Taraf Nyata 5%
	Kondisi Beras (b)	Rata-rata	
0 ppm (o1)	b1	79,93	h
	b2	77,19	c
2 ppm (o2)	b1	78,63	g
	b2	77,28	d
4 ppm (o3)	b1	80,68	j
	b2	78,00	e
6 ppm (o4)	b1	78,49	f
	b2	76,03	a
8 ppm (o5)	b1	80,07	i
	b2	76,85	b

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

Berdasarkan Uji Lanjut Duncan pada taraf 5%, diketahui bahwa terdapat perbedaan signifikan antar perlakuan konsentrasi ozon dan kondisi beras terhadap peningkatan derajat putih. Nilai rata-rata derajat putih tertinggi diperoleh pada perlakuan konsentrasi ozon (4 ppm) pada kondisi beras (gabah) atau pada perlakuan (o3b1) dengan nilai sebesar 80,68. Sedangkan nilai rata-rata derajat putih terendah didapatkan melalui perlakuan konsentrasi ozon (6 ppm) dan kondisi beras (beras pecah kulit) atau pada perlakuan (o4b2) dengan nilai 76,03.

Derajat putih merupakan parameter yang menentukan kualitas visual dan daya terima konsumen terhadap beras. Peningkatan derajat putih pada perlakuan ozon terjadi karena sifat oksidator kuat yang dimiliki oleh ozon dalam memicu efek pemutihan (*bleaching*). Menurut (Pandiselvam et al., 2019), ozon efektif mengoksidasi pigmen-pigmen permukaan, seperti karotenoid dan senyawa fenolik yang terkandung pada lapisan luar beras, sehingga meningkatkan kecerahan warna butiran. Hal ini didukung oleh data pengukuran warna, di mana peningkatan derajat putih (*Whiteness Index*) sejalan dengan adanya penurunan nilai kekuningan (b^*) dan peningkatan kecerahan (L^*) pada sampel setelah diberikan paparan ozon. Penurunan nilai b^* menunjukkan bahwa pigmen karotenoid alami yang memberikan rona kuning pada beras kecambah telah terdegradasi akibat agen pengoksidasi dari ozon. Hasil analisis Dwi Arah antara konsentrasi ozon dan kondisi beras terhadap derajat putih dijabarkan pada tabel 14 yaitu:

Tabel 15. Dwi Arah Antara Konsentrasi Ozon dan Kondisi Beras Terhadap Derajat Putih Beras Kecambah Varietas Inpari 32

Konsentrasi Ozon (o)	Kondisi Beras (b)	
	b1 (Gabah)	b2 (Beras pecah kulit)
o1 (0ppm)	79,93 b C	77,19 a C
o2 (2ppm)	78,63 b B	77,28 a D
o3 (4ppm)	80,68 b E	78,00 a E
o4 (6ppm)	78,49 b A	76,03 a A
o5 (8ppm)	80,07 b D	76,85 a B

Keterangan: Nilai rata-rata yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji lanjut Duncan. Notasi huruf kecil dibaca horizontal sedangkan huruf kapital di baca vertikal.

Pada kondisi beras pecah kulit (b2) lapisan endosperma dan aleuron lebih terekspos secara langsung terhadap paparan gas ozon, sehingga oksidasi pigmen alami seperti karotenoid terjadi secara lebih intensif yang memicu penurunan rona kuning. Sebaliknya, pada gabah (b1), keberadaan sekam berfungsi sebagai pelindung yang membatasi kontak langsung antara ozon dengan butiran beras, sehingga nilai derajat putihnya tetap terjaga lebih tinggi mendekati kondisi awalnya.

Karakteristik derajat putih dalam penelitian ini memiliki hubungan dengan perubahan morfologi permukaan (densitas kamba) dan aktivitas mikrobiologis

bahan. Pada kelompok beras pecah kulit, kenaikan derajat putih rentang 2-4 ppm (o2b2 dan o3b2) terjadi karena ozon bertindak sebagai agen *sanitizer* yang mereduksi mikroba menyebabkan diskolorasi warna (pencoklatan), sekaligus mengoksidasi pigmen karotenoid (*bleaching*) secara optimal (Guzel-Seydim et al., 2004; Pandiselvam et al., 2019). Namun, Ketika dosis ditingkatkan ke 6-8 ppm (o4b2 dan o5b2), nilai derajat putih justru turun drastis hingga titik terendah (76,03). Fenomena ini berkaitan dengan erat dengan efek destruktif ozon pekat yang memicu erosi mikro (*surface pitting*) pada permukaan endosperma sebagaimana dijelaskan pada parameter densitas kamba (Shah et al., 2015).

Matriks permukaan yang tererosi mikro dan kasar ini mengubah sifat optik bahan dengan meningkatkan hamburan cahaya, sehingga secara visual beras pecah kulit terlihat lebih kusam dan gelap. Sementara itu pada kelompok gabah, pencapaian derajat putih tertinggi pada perlakuan 4 ppm (o3b1) berkolorasi linier dengan fase dominasi metabolisme internal yang di bahas pada parameter % rendemen dan densitas kamba. Konsentrasi sub-letal 4 ppm memacu laju imbibisi air yang masif dan hidrolisis pati oleh enzim amilase (Patil & Khan, 2011). Proses hidrasi seluler dan perombakan pati ini yang mengubah susunan fisik dan sifat optik struktur granula pati di dalam biji menjadi lebih padat, yang secara fisik meningkatkan kapasitas butiran untuk memantulkan cahaya putih secara merata (*Whiteness Index* meningkat) sebelum akhirnya mengalami degradasi permukaan akibat ozon konsentrasi tinggi pada 6-8 ppm (Juliano, 1993b; Zhu, 2018).

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan (Tiwari et al., 2010), yang menyatakan bahwa aplikasi ozon pada bahan pangan sangat efektif untuk

memperbaiki aspek visual melalui mekanisme oksidasi pigmen tanpa meninggalkan residu kimia berbahaya. Efek pemutihan ini menunjukkan bahwa teknologi ozon berpotensi sebagai alternatif pengganti agen pemutih konvensional dalam industri penggilingan padi, karena sifatnya yang ramah lingkungan dan mampu meningkatkan nilai tambah visual produk beras tanpa merusak struktur pati secara berlebihan, selama digunakan dalam konsentrasi yang tepat.

5. *Rapid Visco Analyzer (RVA)*

Secara prinsip, pengujian RVA ini memiliki tujuan utama untuk memetakan perubahan sifat rheologi pasta pati secara kuantitatif setelah mengalami proses perkecambahan. Keterkaitannya dengan perlakuan ozon terletak pada peran ozon sebagai agen oksidator kuat yang memodifikasi ikatan makromolekul amilosa dan amilopektin, sehingga pengujian RVA ini menjadi instrumen pembuktian fisik yang krusial untuk mendeteksi dampak modifikasi kimia tersebut terhadap karakteristik tekstur dan kepulenan produk akhir saat dimasak. Penyajian data karakteristik amilografi RVA tidak melibatkan Analisis Varians (ANAVA) karena pengujian dilakukan menggunakan sistem satu kali ulangan untuk setiap perlakuan. Justifikasi ilmiah dari langkah ini berdasar pada homogenitas analisis kadar pati beras kecambah yang telah dibuktikan melalui uji ANAVA dan Duncan.

Pengujian tersebut mengonfirmasi bahwa proporsi matriks karbohidrat utama di semua variasi perlakuan sangat stabil, yaitu berkisar antara 63,17% hingga 67,24%. Mengingat kuantitas komponen kunci yang mengontrol sifat rheologi ini sudah terbukti seragam, satu kali pemetaan dengan RVA sudah sepenuhnya representatif untuk melihat perubahan fisikokimia dan daya hidrasi pati secara

akurat. Ketiadaan replikasi pengujian secara statistik memang membuat nilai galat (*error*) tidak tersedia sehingga uji signifikansi ANAVA tidak dapat dilakukan. Namun, mutu dan validitas data ini tetap terjaga berkat tingginya keterulangan (*reproducibility*) termomekanis alat RVA serta keseragaman kadar pati pada sampel bahan.

Pengujian karakteristik amilografi menggunakan *Rapid Visco Analyzer* (RVA) dilakukan untuk mengevaluasi sifat gelatinisasi dan pati dari beras kecambah varietas Inpari 32 yang dimodifikasi melalui paparan ozon kering. Rekapitulasi nilai parameter RVA yang meliputi *Peak Viscosity* (Viskositas Puncak), *Trough* (Viskositas Pasta Panas), *Breakdown*, *Final Viscosity* (Viskositas Akhir), *Setback*, *Peak Time* dan *Pasting Temperature* (Suhu Gelatinisasi) dijabarkan pada tabel 16 sebagai berikut:

Tabel 16. Karakteristik Amilografi Beras Kecambah Varietas Inpari 32

Kondisi Beras	Konsentrasi Ozon	Peak (cP)	Trough (cP)	Breakdown	Final (cP)	Setback (cP)	Peak Time	Pasting Temp (°C)
Gabah	0 ppm	1950	1631	319	2707	1076	6,13	51,8
	2 ppm	1404	1190	214	2217	1027	6,07	83,2
	4 ppm	862	491	371	844	353	5,07	83,15
	6 ppm	922	712	210	1319	607	5,53	83,25
	8 ppm	1435	1177	258	1716	539	5,67	83,2
Beras Pecah Kulit	0 ppm	3360	2880	480	4422	1542	6,87	83,15
	2 ppm	3101	2647	454	4151	1504	6,33	83,2
	4 ppm	3793	3243	550	4813	1570	7	83,15
	6 ppm	3868	3478	390	5106	1628	6,87	84,65
	8 ppm	3945	3303	642	5074	1771	7	83,3

Viskositas puncak (*peak Viscosity*) merepresentasikan kemampuan pembengkakan granula pati secara maksimal (*swelling capacity*) sebelum mengalami pecah struktur akibat desintegrasi termal selama proses gelatinisasi

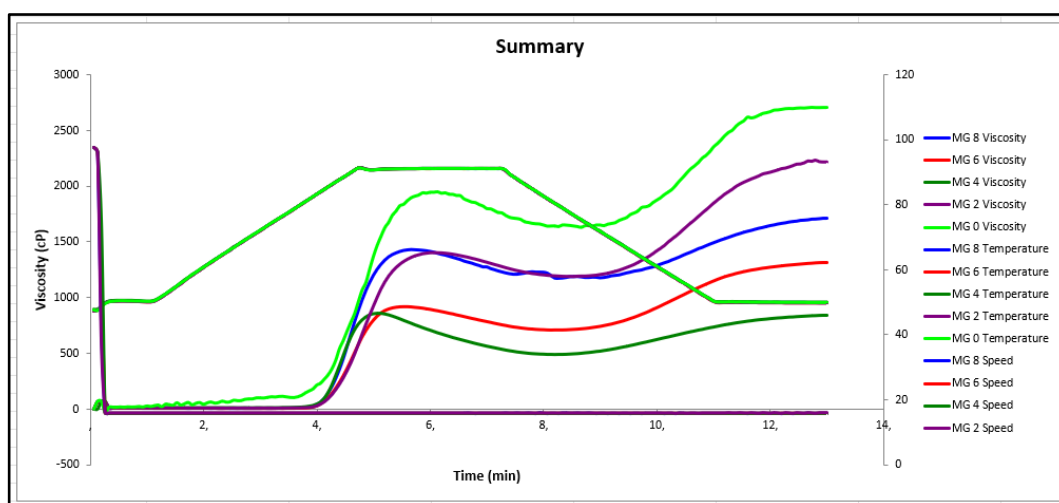
suspensi pati (Salehi, 2019). *Trough* atau viskositas lembah mengukur ketahanan pasta panas terhadap gaya geser mekanis, sedangkan *Breakdown* (selisih antara *Peak* dan *Trough*) menjadi parameter fungsional untuk menilai tingkat kestabilan termal serta kerapuhan granula pati saat dimasak (Salehi, 2019).

Pada fase pendinginan, Viskositas Akhir (*Final Viscosity*) dan *Setback* menggambarkan kecepatan retrogradasi molekul amilosa dalam menyusun kembali anyaman gel tiga dimensi melalui ikatan hidrogen (Zhu, 2018). Nilai *setback* yang tinggi memproyeksikan kecenderungan sifat retrogradasi yang masif, yang berkorelasi linear dengan tingkat kekerasan (*hardness*) tekstur produk atau nasi yang cenderung keras dan pera setelah dingin (Pang et al., 2016). Selain parameter kekentalan, *Peak Time* menunjukkan laju kecepatan kinetika pati untuk menyentuh viskositas maksimumnya, sedangkan *Pasting Temperature* menandai ambang suhu awal terjadinya gelatinisasi ketika granula mulai mengikat air secara viskoelastis (Salehi, 2019; Shoukat et al., 2025).

Terdapat perbedaan profil viskositas yang sangat kontras antara perlakuan Gabah dan Beras Pecah Kulit. Kelompok kurva Beras Pecah Kulit secara konsisten mendominasi nilai skala viskositas yang jauh lebih tinggi (mencapai rentang 3000–5000 cP) dibandingkan kelompok Gabah yang hanya berkisar pada rentang 800–2700 cP di semua tingkat dosis ozon. Fenomena fisikokimia ini dilandasi oleh efek pengenceran matriks (*dilution effect*) oleh serat sekam pada kelompok Gabah, yang sejalan dengan teori tumpukan fisik serealialia (Banurea et al., 2020).

Selama preparasi tepung sampel gabah, fraksi sekam kasar (*husk*) yang kaya silika ikut tergiling, sekam yang didominasi serat kasar tidak memiliki kemampuan

fungsional untuk memicu gelatinisasi maupun mengikat air secara viskoelastis (Shah et al., 2015). Keberadaan komponen non-pati ini bertindak sebagai pengisi (*filler*) mekanis yang memperkecil konsentrasi pati murni per gram sampel tepung. Hal ini membatasi kapasitas hidrasi total endosperma dan menurunkan tinggi kurva viskogram secara keseluruhan jika dibandingkan dengan tepung Beras Pecah Kulit yang murni mengandung fraksi pati karbohidrat utuh (Banurea et al., 2020; Shah et al., 2015).



Gambar 8. Kurva Amilografi RVA Beras Kecambah Varietas Inpari 32 pada Kondisi Gabah

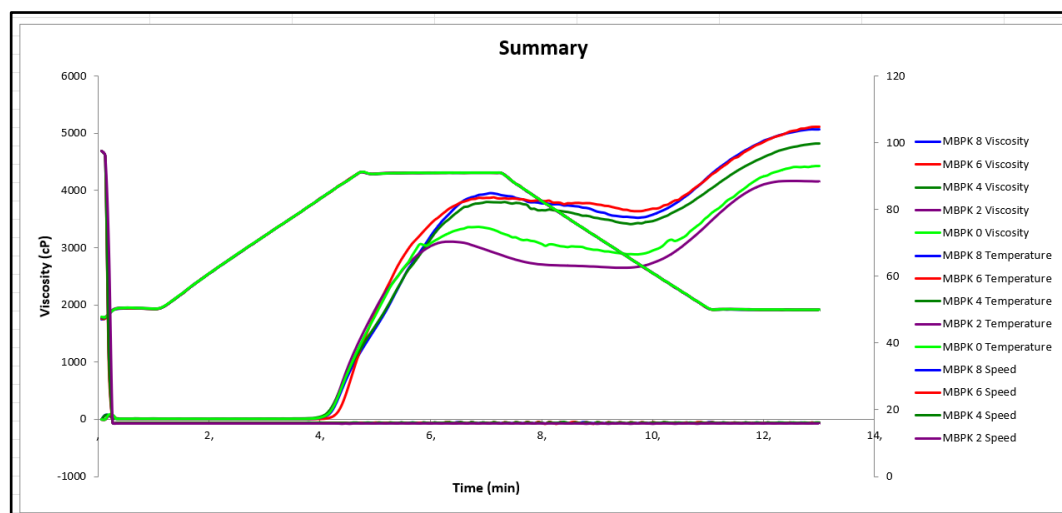
Apabila ditinjau dari visualisasi grafik amilografi pada gambar 8, paparan gas ozon kering secara nyata menginduksi pola pergeseran kurva yang sangat khas dan unik pada tiap kelompok kondisi beras. Profil kurva viskositas tertinggi didominasi secara mutlak oleh sampel kontrol tanpa perlakuan (0 ppm) yang direpresentasikan oleh garis hijau terang. Pada fase awal pengujian (menit ke-0 hingga menit ke-1), seluruh sampel secara konsisten menunjukkan nilai kekentalan awal yang minimum (mendekati 0 cP) karena kondisi suhu instrumen masih tertahan pada fase *holding* awal sebesar $\pm 50^{\circ}\text{C}$.

Namun, karakteristik yang sangat krusial teramati segera setelah fase tersebut berjalan, di mana sampel kontrol (0 ppm) langsung memulai gelatinisasi pada temperatur yang tergolong sangat rendah, yaitu berada di angka 51,8°C. Nilai *Pasting Temperature* yang sangat rendah ini mengindikasikan bahwa ketidakhadiran gas ozon sebagai agen inhibitor menyebabkan proses hidrolisis pati alami oleh gugus enzim internal benih berlangsung secara masif selama proses perkecambahan (Wu et al., 2013). Dampak dari degradasi tersebut memicu terbentuknya serpihan polimer berbobot molekul rendah yang bersifat sangat hidrofilik, sehingga sangat peka dalam mengabsorpsi air dan membengkak pada temperatur yang jauh lebih dingin saat siklus pemanasan alat RVA dimulai (Shoukat et al., 2025).

Seiring dengan peningkatan konsentrasi ozon kering yang diaplikasikan, kurva viskogram mengalami penurunan tajam hingga menyentuh titik terendah pada perlakuan (4 ppm) (garis hijau tua). Kondisi ini mengonfirmasi bahwa paparan ozon dosis 4 ppm berperan sebagai pemicu stres oksidatif positif (*hormesis*) yang menstimulasi aktivitas enzim hidrolitik α -amilase endogen secara ekstrem untuk mendepolimerisasi molekul pati menjadi fragmen dekstrin berantai pendek (Pandiselvam et al., 2019; Wu et al., 2013). Akibat pemutusan ikatan glukosida tersebut, granula pati kehilangan tekanan turgor internalnya untuk dapat membengkak secara optimal, sehingga profil kurva menjadi melandai (Shoukat et al., 2025).

Pembalikan tren kurva kemudian terdeteksi ketika dosis dinaikkan menuju (6 ppm) (garis merah) dan (8 ppm) (garis biru), di mana tinggi kurva berbalik naik

secara signifikan. Perubahan tren ini menjadi bukti valid atas terjadinya fenomena penahanan aktivitas metabolisme (*metabolic arrest*). Radikal bebas dari ozon dosis tinggi terbukti mampu menginaktivasi kinerja enzim hidrolitik secara parsial melalui mekanisme modifikasi oksidatif pada gugus fungsi thiol di sisi aktif enzim (Khadre et al., 2001), yang secara simultan diikuti dengan induksi reaksi ikatan silang (*cross-linking*) antar makromolekul pati untuk memperkokoh densitas anyaman matriks gel (Zhu, 2018).



Gambar 9. Kurva Amilografi RVA Beras Kecambah Varietas Inpari 32 pada

Kondisi Beras Pecah Kulit

Dinamika kurva beras pecah kulit gambar 9, karakteristik yang bertolak belakang terlihat pada kelompok kurva Beras Pecah Kulit. Pada kelompok ini, titik kurva paling landai justru dicapai oleh sampel dengan dosis rendah, yaitu (2 ppm) (garis ungu). Sementara itu, kurva untuk perlakuan (4 ppm) (garis hijau tua), (6 ppm) (garis merah), dan (8 ppm) (garis biru) terlihat saling berhimpit rapat dan mendominasi di barisan kurva teratas, bahkan posisinya melampaui kurva sampel kontrol (0 ppm) (garis hijau terang).

Terjadinya transisi titik balik minimum yang jauh lebih cepat pada kelompok beras pecah kulit (pada dosis 2 ppm) jika dibandingkan dengan kelompok Gabah (pada dosis 4 ppm) mempertegas arti penting sekam gabah sebagai tameng fisik mekanis (*physical barrier*) yang kaku (Shah et al., 2015). Pada kondisi beras pecah kulit, tidak adanya lapisan sekam menyebabkan gas ozon kering dapat langsung berdifusi secara bebas tanpa hambatan menuju lapisan endosperma. Akibatnya, paparan ozon dosis rendah (2 ppm) sudah sangat optimal untuk memicu efek *hormesis* yang menurunkan viskositas (Pandiselvam et al., 2019). Begitu konsentrasi ozon ditingkatkan menuju skala 4, 6, dan 8 ppm, kelimpahan senyawa oksidator tersebut langsung menghentikan aktivitas enzim hidrolitik secara instan dan menginduksi reaksi ikatan silang (*cross-linking*) secara masif pada matriks kompleks pati-protein endosperma (Zhu, 2018).

Secara molekuler, reaksi *cross-linking* ini terjadi ketika radikal bebas dari ozon mengoksidasi gugus hidroksil (-OH) pati menjadi gugus karbonil (-C=O) yang saling berikatan membentuk jembatan kovalen intermolekul antar-rantai amilosa, sekaligus mengoksidasi gugus sulfhidril (-SH) pada protein endosperma menjadi ikatan disulfida. Pembentukan jaringan kovalen ganda ini memperkuat struktur matriks pati-protein secara artifisial. Integritas dan kekuatan mekanis dinding granula pati tetap terjaga kokoh dari degradasi, yang pada akhirnya memproduksi kekuatan gelasi yang jauh lebih kental dan pekat daripada komoditas beras kontrolnya (Khadre et al., 2001; Zhu, 2018).

Penurunan nilai *setback* yang signifikan pada perlakuan o4b1 hingga mencapai 607 cP dibandingkan dengan kontrol gabah yang mencapai 1076 cP

mengindikasikan telah terjadinya perubahan struktural pada komponen makromolekul pati akibat paparan ozon kering. Secara molekuler, perubahan sifat amilografi dan viskositas pasta setelah perlakuan ozon kering dikendalikan oleh mekanisme depolimerisasi pati yang berlangsung melalui jalur reaksi radikal bebas. Ozon (O_3) yang berpenetrasi ke dalam matriks internal biji akan berinteraksi dengan kadar air bahan dan mengalami dekomposisi kimia menjadi *Reactive Oxygen Species* (ROS), dengan radikal hidroksil sebagai derivat paling reaktif. Radikal hidroksil ini melakukan serangan kimia pada rantai polimer amilosa dan amilopektin melalui penarikan (abstraksi) atom hidrogen dari ikatan karbon hidrogen pada cincin anhidroglukosa, terutama pada posisi atom karbon nomor C-1, C-4, atau C-6. Kehilangan atom hidrogen tersebut menyebabkan terbentuknya radikal makro berbasis karbon yang tidak stabil di sepanjang rantai pati, memicu penataan ulang struktur molekul yang berujung pada pemutusan ikatan glikosidik (α -1,4 dan α -1,6) (Zhu, 2018).

Proses pemutusan rantai makromolekul panjang menjadi fragmen rantai yang lebih pendek inilah yang menghasilkan pati teroksidasi sebagai produk utama. Bersamaan dengan pemutusan ikatan tersebut, terjadi oksidasi lanjut pada gugus hidroksil bebas pada posisi C-2, C-3, dan C-6 menjadi gugus karbonil dan gugus karboksil. Selain pati teroksidasi, proses depolimerisasi intensif pada daerah amorf pati ini juga menghasilkan produk turunan berbobot molekul rendah berupa maltodekstrin, oligosakarida, serta glukosa bebas. Keberadaan gugus karboksil yang bermuatan negatif serta fragmen rantai pendek ini memberikan efek rintangan sterik (*steric hindrance*) yang kuat, sehingga mencegah rantai amilosa untuk saling

mendekat dan berasosiasi kembali selama proses pendinginan. Mekanisme kimia inilah yang mendasari penurunan nilai *setback* secara signifikan pada perlakuan terbaik gabah 6 ppm (o4b1), yang secara ilmiah membuktikan bahwa modifikasi ozon sukses menghambat retrogradasi pati dan menjaga tekstur produk akhir agar tidak mudah mengeras (Zhu, 2018). Dengan demikian, terbentuknya produk-produk depolimerisasi berantai pendek dan pati teroksidasi ini secara langsung menguntungkan mutu fisikokimia produk, karena nasi yang dihasilkan diproyeksikan akan tetap empuk dan pulen meskipun telah mengalami proses pendinginan.

4.2.2 Respon Kimia

1. % Kadar Air

Berdasarkan tabel ANAVA diketahui bahwa $F_{hitung} > F_{tabel}$ 5%, hanya pada faktor (b) kondisi beras, yang menunjukkan bahwa faktor tunggal tersebut berpengaruh nyata terhadap % Kadar Air. Oleh karena itu, uji lanjut tidak dilakukan pada interaksi (ob) maupun faktor (o) karena kedua komponen tersebut tidak memberikan pengaruh yang nyata. Uji lanjut Duncan dilakukan hanya pada faktor (b) (Gabah dan Beras Pecah Kulit) yang berbeda nyata. Perlakuan konsentrasi ozon dan kondisi beras gabah (b1) dan beras pecah kulit (b2), diperoleh nilai rata-rata di antara 13,08% hingga 13,59%. Sedangkan nilai rata-rata lainnya dijabarkan dalam tabel 15 yaitu:

Tabel 17. Pengaruh Kondisi Beras Terhadap (%) Kadar Air Beras Kecambah Varietas Inpari 32

Konsentrasi Ozon (o)	(%) Kadar Air		Taraf Nyata 5%
	Kondisi Beras (b)	Rata-rata	
0 ppm (o1)	b1	13,08	a
	b2	13,48	a
2 ppm (o2)	b1	13,19	a
	b2	13,59	a
4 ppm (o3)	b1	13,30	a
	b2	13,35	a
6 ppm (o4)	b1	13,37	a
	b2	13,49	a
8 ppm (o5)	b1	13,31	a
	b2	13,56	a

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

Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI 6128:2020) (BSN, 2020), batas maksimum kadar air untuk beras adalah 14%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh perlakuan konsentrasi ozon (0-8 ppm) menghasilkan nilai kadar air yang berada di bawah ambang batas maksimum tersebut. Hal ini mengindikasikan bahwa perlakuan ozon yang diterapkan tidak menyebabkan peningkatan kelembapan yang berlebih, sehingga beras hasil penelitian ini tetap aman memenuhi standar kualitas dan keamanan untuk penyimpanan.

Kadar air merupakan parameter yang menentukan stabilitas kimiawi dan mikrobiologi beras. Menurut (Pandiselvam et al., 2019), aplikasi ozon dalam bentuk gas pada proses pengolahan biji-bijian umumnya tidak secara signifikan mengubah kadar air asalkan kondisi lingkungan selama proses ozonisasi terkendali. Hasil penelitian ini sejalan dengan (Tiwari et al., 2010), bahwa efektivitas teknologi ozon dalam disinfeksi biji-bijian harus tetap memperhatikan kestabilan kadar air

agar resiko pertumbuhan kapang dan degradasi nutrisi selama penyimpanan dapat diminimalisir.

Pada kondisi gabah (b1), kadar air cenderung lebih stabil dibandingkan beras pecah kulit (b2) karena sekam berfungsi sebagai *barrier* fisik terhadap fluktuasi kelembapan udara. Namun, karena seluruh perlakuan masih berada di bawah standar SNI 14%, maka perlakuan ozon hingga konsentrasi 8 ppm dapat dinyatakan aman dan tidak mengganggu integritas butiran beras secara fisik hingga menyebabkan penurunan kadar air ekstrem.

Kestabilan nilai kadar air yang seragam di bawah 14% pada seluruh tingkatan dosis ozon menunjukkan bahwa meskipun paparan ozon memodifikasi morfologi permukaan (seperti erosi mikro yang dibahas pada densitas kamba dan derajat putih), perlakuan tersebut tidak sampai merusak matriks pati internal hingga mengubah kapasitas hidrasi atau pengikatan airnya (*water binding capacity*). Kondisi kadar air yang aman di kisaran 13% setelah pengeringan ini secara fungsional sangat krusial untuk mengunci aktivitas biologis pasca-perkecambahan.

Rendahnya kelembapan ini secara efektif menghentikan laju respirasi benih agar tidak terus membongkar cadangan karbohidrat, sekaligus mencegah proliferasi kembali mikroflora *indigenous* yang sebelumnya telah disanitasi oleh ozon (Guzel-Seydim et al., 2004; Wu et al., 2013). Dengan demikian, keutuhan komponen padatan beras dapat dipertahankan secara stabil selama masa simpan, yang secara tidak langsung menjamin produk terhindar dari risiko penurunan % rendemen susulan maupun kerusakan fungsional (Pandiselvam et al., 2019).

Keseragaman kadar air pada tingkat yang aman ini memegang peranan penting untuk menjamin validitas evaluasi sifat reologi sampel. Melalui penyeragaman kelembapan ini, dinamika fluktuasi, tinggi kurva viskositas, maupun pergeseran profil amilografi yang terdeteksi oleh *Rapid Visco Analyzer* (RVA) dipastikan sepenuhnya menggambarkan pengaruh nyata dari interaksi ozon kering dan kondisi struktural matriks bahan (Gabah dan Beras Pecah Kulit). Kondisi tersebut sekaligus mengeliminasi potensi bias akibat ketidakseimbangan tingkat hidrasi awal ataupun daya basah tepung sampel sewaktu pengujian berlangsung (Salehi, 2019; Shoukat et al., 2025).

2. (%) Kadar Pati

Berdasarkan tabel ANAVA diketahui bahwa $F_{hitung} > F_{tabel}$ 5%, maka dapat disimpulkan bahwa faktor (o) konsentrasi ozon, interaksi (ob) berpengaruh nyata terhadap % Kadar Pati. Oleh karena itu, uji lanjut Duncan dilakukan pada interaksi (ob) untuk melihat kombinasi perlakuan terbaik secara menyeluruh. Uji lanjut Duncan tidak dilakukan pada faktor (o) konsentrasi ozon karena pengaruh faktor tunggal tersebut sudah terwakili secara detail di dalam hasil uji interaksi (ob). Sedangkan, faktor (b) kondisi beras tidak berpengaruh nyata terhadap % Kadar Pati sehingga tidak dilakukan uji lanjut. Perlakuan konsentrasi ozon dan kondisi beras gabah (b1) dan beras pecah kulit (b2), diperoleh nilai rata-rata di antara 63,17% hingga 67,24%. Sedangkan nilai rata-rata lainnya dijabarkan dalam tabel 17 yaitu:

Tabel 18. Pengaruh Konsentrasi Ozon dan Kondisi Beras Terhadap (%) Kadar Pati Beras Kecambah Varietas Inpari 32

Konsentrasi Ozon (o)	(%) Kadar Pati		Taraf Nyata 5%
	Kondisi Beras (b)	Rata-rata	
0 ppm (o1)	b1	66,05	b
	b2	67,24	b
2 ppm (o2)	b1	64,55	a
	b2	66,11	b
4 ppm (o3)	b1	65,79	ab
	b2	64,61	a
6 ppm (o4)	b1	63,80	a
	b2	64,61	a
8 ppm (o5)	b1	64,35	a
	b2	63,17	a

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

Berdasarkan Uji Lanjut Duncan pada taraf 5%, diketahui bahwa terdapat perbedaan signifikan antar perlakuan konsentrasi ozon dan kondisi beras terhadap % kadar pati. Nilai rata-rata % kadar pati tertinggi diperoleh pada perlakuan konsentrasi ozon (0 ppm) pada kondisi beras (Beras Pecah Kulit) atau pada perlakuan (o1b2) dengan nilai sebesar 67,24%. Sedangkan nilai rata-rata % kadar pati terendah didapatkan melalui perlakuan konsentrasi ozon (8 ppm) dan kondisi beras (beras pecah kulit) atau pada perlakuan (o5b2) dengan nilai 63,17%.

Penurunan kadar pati pasca perkecambahan merupakan hasil dari proses amilolisis, yaitu hidrolisis pati oleh enzim α -amilase endogen menjadi dua gula sederhana yaitu maltosa dan glukosa untuk energi pertumbuhan benih. Perlakuan ozon dalam penelitian ini bertindak sebagai modifikator yang mempercepat laju degradasi tersebut. Menurut (Chan et al., 2009), oksidasi menyebabkan

depolimerisasi molekul pati melalui pemutusan ikatan glikosidik α -1,4 dan α -1,6, yang menurunkan derajat polimerisasi pati.

Modifikasi kimiawi ini secara signifikan meningkatkan kelarutan granula pati, sehingga meningkatkan kerentanan pati terhadap serangan enzimatik selama fase perkecambahan. Hasil analisis Dwi Arah antara konsentrasi ozon dan kondisi beras terhadap % kadar pati dijabarkan pada tabel 18 yaitu:

Tabel 19. Dwi Arah Antara Konsentrasi Ozon dan Kondisi Beras Terhadap (%) Kadar Pati Beras Kecambah Varietas Inpari 32

Konsentrasi Ozon (o)	Kondisi Beras (b)	
	b1 (Gabah)	b2 (Beras pecah kulit)
o1 (0ppm)	66,05 a	67,24 a
o2 (2ppm)	64,55 a	66,11 b
o3 (4ppm)	65,79 a	64,61 a
o4 (6ppm)	63,80 a	64,61 a
o5 (8ppm)	64,35 a	63,17 a

Keterangan: Nilai rata-rata yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji lanjut Duncan. Notasi huruf kecil dibaca horizontal sedangkan huruf kapital di baca vertikal.

Peningkatan konsentrasi ozon secara umum memicu penurunan kadar pati pada dua kondisi beras. Pada kondisi beras pecah kulit (b2), degradasi pati berlangsung secara konsisten dan signifikan seiring meningkatnya dosis ozon.

Menurut (Pandiselvam et al., 2019), integritas struktur fisik benih merupakan faktor yang menentukan efisiensi difusi ozon. Hilangnya lapisan sekam pada beras pecah kulit menyebabkan permukaan endosperma terpapar langsung oleh gas ozon. Paparan langsung ini memicu oksidasi permukaan (*surface oxidation*) yang lebih masif, yang tidak hanya mendegradasi pati, tetapi juga mempercepat proses imbibisi dan aktivitas enzimatis, sehingga laju penurunan kadar pati menjadi lebih tinggi.

Sebaliknya, struktur sekam pada gabah (b1) berfungsi sebagai *barrier* difusi yang membatasi kontak langsung antara ozon dengan endosperma. Kondisi ini menyebabkan fluktuasi penurunan kadar pati berlangsung lebih terkontrol. Secara akumulatif, data ini menunjukkan bahwa penurunan kadar pati selama perkecambahan dipicu oleh ozon dan hambatan fisik struktur benih.

Kelompok gabah (b1) menunjukkan tren fluktuasi numerik yang unik, fenomena naik turun ini tidak berdiri sendiri, melainkan merepresentasikan antara laju hidrolisis pati dan penurunan bobot kering akibat respirasi. Penurunan kadar pati pada 2 ppm (o2b1) sejalan dengan melonjaknya % germinasi dari (74,67% ke 86,67%), yang menandakan bahwa ozon konsentrasi rendah berhasil memicu enzim α -amilase untuk menghidrolisis pati menjadi gula reduksi sebagai substrat utama pertumbuhan (Patil & Khan, 2011). Namun, pada perlakuan 4 ppm (o3b1), kadar pati meningkat kembali ke angka 65,79%. Hal ini berkaitan erat dengan data % rendemen dan densitas kamba pada 4 ppm yang sebelumnya terbukti turun ke titik terendah akibat tingginya laju respirasi seluler (Copeland, 2001). Karena respirasi merombak dan membuang komponen gula terlarut menjadi CO₂ yang menguap ke

udara, proporsi persentase pati tersisa di dalam matriks endosperma secara matematis menjadi terhitung lebih tinggi dibanding total bobot kering bahan yang sudah menyusut (Juliano, 1993).

Selanjutnya, penurunan kadar pati kembali terjadi pada perlakuan 6 ppm (o4b1) hingga menyentuh 63,80%. Penurunan tajam ini berkorelasi langsung dengan fase pertumbuhan aktif benih, di mana data % germinasi gabah naik hingga 95,33%, sehingga memaksa enzim amilolitik bekerja linear menghidrolisis pati secara masif untuk menyuplai energi kecambah (do Nascimento et al., 2022). Terakhir, pada konsentrasi maksimal 8 ppm (o5b1) kadar pati sedikit meningkat kembali ke angka 64,35% yang selaras dengan kembalinya % rendemen gabah ke titik tertinggi (98,50%). Fenomena ini mengonfirmasi terjadinya efek *metabolic arrest* akibat stres oksidatif tinggi dari ozon pekat, yang secara efektif menghambat laju respirasi berlebih dan menginduksi modifikasi struktur granula pati permukaan sehingga lebih resisten terhadap degradasi enzimatik lanjutan (Zhu, 2018).

Seluruh dinamika perombakan kuantitas pati serta modifikasi struktural komponen amilosa-amilopektin ini pada akhirnya berkorelasi langsung terhadap perubahan sifat fungsional termal tepungnya. Fenomena perombakan struktur pati oleh enzim hidrolitik internal yang masif terutama pada sampel kontrol gabah (0 ppm) membuat granula pati menjadi jauh lebih rapuh dan hidrofilik. Hal ini secara akurat menjawab mengapa sampel kontrol tersebut memiliki karakteristik suhu gelatinisasi (*Pasting Temperature*) yang ekstrem rendah, yaitu sebesar 51,8°C pada visualisasi data RVA pada (tabel 16). Komponen pati yang telah terdegradasi tersebut menjadi sangat peka untuk mengabsorpsi air dan memulai pembengkakan

(*swelling*) pada temperatur yang jauh lebih dingin segera setelah siklus pemanasan instrumen dimulai (Shoukat et al., 2025).

4.2.3 Perlakuan Terbaik Menggunakan Metode *De Garmo*

Berdasarkan hasil perhitungan Indeks Efektivitas *De Garmo* yang mengintegrasikan seluruh parameter mutu (multikriteria), diperoleh nilai total Nilai Perlakuan (NP) untuk masing-masing kombinasi yang tersusun pada tabel 19 sebagai berikut:

Tabel 20. Total Nilai Perlakuan (NP) metode *De Garmo*

Parameter	Kode Sampel										<i>X-maks</i>	<i>X-min</i>	Selisih
	o1b1	o1b2	o2b1	o2b2	o3b1	o3b2	o4b1	o4b2	o5b1	o5b2			
Densitas Kamba	1,37	1,16	1,38	1,16	1,35	1,23	1,37	1,20	1,39	1,17	1,39	1,16	0,23
% Rendemen	98,33	84,50	98,21	93,25	97,14	86,17	98,33	86,15	98,50	86,06	98,50	84,50	14,00
% Germinasi	74,67	52,67	86,67	75,33	87,33	54,67	95,33	47,33	97,33	46,00	97,33	46,00	51,33
Derajat Putih	79,93	77,19	78,63	77,28	80,68	78,00	78,49	76,03	80,07	76,85	80,68	76,03	4,65
% Kadar Air	13,08	13,48	13,19	13,59	13,30	13,35	13,37	13,49	13,31	13,56	13,59	13,08	0,51
% Kadar Pati	66,05	67,24	64,55	66,11	65,79	64,61	63,80	64,61	64,35	63,17	63,17	67,24	4,07

Berdasarkan tabel 19, parameter % germinasi memiliki selisih terbesar yaitu 51,33% rentang (46,00% - 97,33%), membuktikan viabilitas embrio sangat sensitif terhadap dosis ozon dan keberadaan sekam. Sebaliknya, % kadar air memiliki selisih terkecil yaitu 0,51% rentang (13,08% - 13,59%), menunjukkan proses pengeringan setelah perkecambahan berjalan homogen di bawah standar SNI 14% (BSN, 2020). Penentuan ambang batas menggunakan kriteria maksimasi untuk seluruh parameter, kecuali % kadar pati yang menggunakan kriteria minimasi (semakin kecil semakin baik). Oleh karena itu, nilai asli terkecil pati (63,17%) ditetapkan sebagai X_{maks} (kondisi terbaik) dan nilai terbesar (67,24%) sebagai X_{min} (kondisi terburuk) karena penurunan kadar pati mengindikasikan keberhasilan biotransformasi komponen makromolekul menjadi senyawa fungsional (Zhu, 2018).

Data tersebut ditransformasikan menjadi indeks Nilai Efektivitas (NE) pada tabel 20 sebagai berikut:

Tabel 21. Data Transformasi Indeks Nilai Efektifitas (NE)

Parameter	Kode Sampel										Skor <i>Importance</i> (1-5)	Bobot
	o1b1	o1b2	o2b1	o2b2	o3b1	o3b2	o4b1	o4b2	o5b1	o5b2		
Densitas Kamba	0.91	0.00	0.96	0.00	0.83	0.30	0.91	0.17	1.00	0.04	2	0.09
% Rendemen	0.99	0.00	0.98	0.63	0.90	0.12	0.99	0.12	1.00	0.11	4	0.18
% Germinasi	0.56	0.13	0.79	0.57	0.81	0.17	0.96	0.03	1.00	0.00	5	0.23
Derajat Putih	0.84	0.25	0.56	0.27	1.00	0.42	0.53	0.00	0.87	0.18	2	0.09
% Kadar Air	0.00	0.78	0.22	1.00	0.43	0.53	0.57	0.80	0.45	0.94	4	0.18
% Kadar Pati	0.29	0.00	0.66	0.28	0.36	0.65	0.85	0.65	0.71	1.00	5	0.23
											22	1.00

Kriteria utama dengan bobot tertinggi (0,23) ditempatkan pada % germinasi dan % kadar pati karena merupakan indikator utama mutu beras kecambah (Juliano, 1993). Perlakuan (o5b1) konsentrasi 8 ppm dan pada kondisi gabah mencapai NE germinasi sempurna (1,00), sedangkan (o5b2) konsentrasi 8 ppm kondisi beras pecah kulit jatuh ke angka 0,00 akibat cekaman oksidatif pekat tanpa perlindungan sekam, meskipun NE pati (o5b2) bernilai 1,00 karena degradasi pati berjalan ekstrem (do Nascimento et al., 2022). Kriteria pendukung dengan bobot sedang (0,18) ditempatkan pada % rendemen dan % kadar air untuk mengontrol aspek ekonomi dan stabilitas simpan (Wu et al., 2013), di mana kondisi gabah (b1) mendominasi rendemen tinggi karena sekam mencegah peluruhan padatan terlarut ke media perendaman (Cho & Lim, 2016). Kriteria tambahan dengan bobot terendah (0,09) ditempatkan pada derajat putih dan densitas kamba karena aspek fisik-visual ini tidak memengaruhi esensi nilai gizi fungsional utama produk (Pandiselvam et al., 2019).

Akumulasi perkalian NE dan bobot menghasilkan Nilai Perlakuan (NP) total pada tabel 21 dan hasil penentuan perlakuan terbaik pada tabel 22 sebagai berikut:

Tabel 22. Data Nilai Perlakuan (NP) Total

Parameter	Kode Sampel									
	o1b1	o1b2	o2b1	o2b2	o3b1	o3b2	o4b1	o4b2	o5b1	o5b2
Densitas Kamba	0,08	0,00	0,09	0,00	0,08	0,03	0,08	0,02	0,09	0,00
% Rendemen	0,18	0,00	0,18	0,11	0,16	0,02	0,18	0,02	0,18	0,02
% Germinasi	0,13	0,03	0,18	0,13	0,18	0,04	0,22	0,01	0,23	0,00
Derajat Putih	0,08	0,02	0,05	0,02	0,09	0,04	0,05	0,00	0,08	0,02
% Kadar Air	0,00	0,14	0,04	0,18	0,08	0,10	0,10	0,15	0,08	0,17
% Kadar Pati	0,07	0,00	0,15	0,06	0,08	0,15	0,19	0,15	0,16	0,23
Total NP	0,532	0,195	0,685	0,513	0,673	0,369	0,825	0,336	0,822	0,439

Tabel 23. Hasil Penentuan Perlakuan Terbaik Metode *De Garmo*

Peringkat	Perlakuan (Kombinasi)	NP Total
1	o4b1	0,825
2	o5b1	0,822
3	o2b1	0,685
4	o3b1	0,673
5	o1b1	0,532
6	o2b2	0,513
7	o5b2	0,439
8	o3b2	0,369
9	o4b2	0,336
10	o1b2	0,195

Berdasarkan tabel 21 dan tabel 22, kombinasi (o4b1) konsentrasi ozon 6 ppm pada kondisi Gabah ditetapkan sebagai perlakuan paling optimal dengan nilai NP tertinggi sebesar 0,825. Perlakuan (o4b1) berhasil menciptakan titik kesetimbangan terbaik untuk menstimulasi % germinasi hingga 95,33% (NE = 0,96) dan merombak pati secara optimal hingga 63,80% (NE = 0,85) (Patil & Khan, 2011), sambil mempertahankan % rendemen tetap tinggi sebesar 98,33% (NE = 0,99) dan kadar air aman pada 13,37% (NE = 0,57). Sebaliknya, seluruh kelompok Beras Pecah Kulit (b2) terdapat di peringkat bawah (6 - 10) dengan (o1b2) sebagai perlakuan terburuk (NP = 0,195), ini menegaskan bahwa aplikasi ozon pada beras kecambah

varietas Inpari 32 jauh lebih efektif dan menguntungkan jika dilakukan dalam kondisi gabah (b1).

ini menegaskan bahwa aplikasi ozon pada beras kecambah varietas Inpari 32 jauh lebih efektif dan menguntungkan jika dilakukan dalam kondisi gabah (b1). Keunggulan fungsional dari perlakuan terbaik (o4b1) ini juga didukung kuat oleh profil reologi pati yang diperoleh dari pengujian karakteristik amilografi menggunakan *Rapid Visco Analyzer* (RVA). Sebagai parameter karakterisasi pendukung yang dianalisis secara deskriptif, nilai viskositas *breakdown* dan *setback* pada perlakuan (o4b1) memberikan konfirmasi ilmiah mengenai mutu fungsional dan proyeksi tekstur produk akhir saat dimasak.

Perlakuan optimal gabah dengan ozon 6 ppm (o4b1) mampu memberikan nilai *Breakdown* yang tergolong sangat rendah, yaitu sebesar 210 cP pada tabel 16. Karakteristik ini membuktikan bahwa pasta pati beras kecambah yang dihasilkan memiliki kestabilan termal dan mekanis yang sangat kokoh, sehingga struktur granula patinya tidak mudah hancur atau encer ketika dihadapkan pada suhu tinggi dan gaya geser mekanis selama proses pemasakan (Salehi, 2019). Kestabilan pasta panas ini menjadi indikator penting bahwa beras kecambah o4b1 memiliki kualitas masakan (*cooking quality*) yang unggul.

Selain aspek kestabilan pasta, nilai *setback* yang terkontrol pada sampel o4b1 (607 cP) juga berada jauh di bawah sampel kontrolnya, yaitu Gabah 0 ppm yang memiliki nilai *setback* sebesar 1076 cP. Fenomena penurunan nilai *setback* ini mengonfirmasi bahwa modifikasi oksidatif oleh ozon kering pada dosis 6 ppm efektif menghambat laju retrogradasi atau penataan ulang molekul amilosa ketika

pasta mulai mendingin (Zhu, 2018). Secara aplikatif, rendahnya nilai *setback* pada perlakuan terbaik ini memproyeksikan bahwa beras kecambah varietas Inpari 32 yang dihasilkan akan memiliki karakteristik tekstur nasi yang tetap empuk, pulen, dan tidak cepat mengeras (pera) setelah dingin (Pang et al., 2016). Dengan demikian, integrasi antara nilai indeks efektifitas De Garmo yang tinggi dan sifat amilografi yang stabil menegaskan bahwa kombinasi perlakuan o4b1 merupakan kondisi paling ideal untuk menghasilkan beras kecambah dengan mutu kimia, fisik, dan fungsional yang seimbang.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

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

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Konsentrasi ozon kering berpengaruh nyata terhadap respon fisik (%) rendemen, (%) germinasi, dan derajat putih, dan respon kimia (%) kadar pati. Konsentrasi ozon kering tidak berpengaruh nyata terhadap densitas kamba dan (%) kadar air beras kecambah varietas Inpari 32.
2. Kondisi beras berpengaruh nyata terhadap respon fisik densitas kamba, (%) rendemen, (%) germinasi, derajat putih, dan respon kimia (%) kadar air. Kondisi beras tidak berpengaruh nyata terhadap (%) kadar pati beras kecambah varietas Inpari 32.
3. Interaksi antara konsentrasi ozon dan kondisi beras berpengaruh nyata terhadap respon fisik densitas kamba, (%) rendemen, (%) germinasi, dan derajat putih, dan respon kimia (%) kadar pati. Interaksi kedua faktor tidak berpengaruh nyata terhadap (%) kadar air beras kecambah varietas Inpari 32.
4. Perlakuan gabah dengan ozon 6 ppm (o4b1) merupakan kondisi paling optimal berdasarkan Metode *De Garmo* ($NP = 0,825$). Kombinasi ini menghasilkan kesetimbangan mutu terbaik meliputi germinasi 95,33%, kadar pati 63,80%, rendemen 98,33%, dan kadar air aman 13,37%. Kualitas ini didukung profil amilografi RVA yang stabil (*breakdown* 210 cP dan serta *setback* 607 cP) untuk proyeksi tekstur nasi yang empuk dan pulen setelah dingin.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai analisis ekonomi dan efisiensi energi dari penerapan teknologi generator ozon kering skala pilot *plant* atau industri, sehingga dapat diketahui kelayakan penerapannya dalam produksi beras kecambah fungsional secara komersial.
2. Perlu dikaji lebih lanjut pengaruh jenis kemasan dan kondisi suhu penyimpanan terhadap stabilitas fisikokimia khususnya laju ketengikan akibat peroksidasi lipid pada bekatul, profil mikrobiologi dan umur simpan dari produk beras kecambah varietas Inpari 32 yang dihasilkan.
3. Perlu dilakukan eksplorasi terhadap varietas padi unggul nasional lainnya seperti Ciherang, IR 64, atau Sintanur untuk mengetahui pengaruh perbedaan struktur matriks biji dan komposisi kimia awal beras terhadap efektivitas proses ozonisasi kering dan laju perkecambahan.
4. Disarankan untuk mengkaji penambahan parameter respon lain seperti analisis kandungan senyawa bioaktif fungsional *Gamma-Aminobutyric Acid* (GABA), total senyawa fenolik, aktivitas antioksidan, dan pengamatan visual mikrostruktur granula pati menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

DAFTAR PUSTAKA

- Adzigbe, J., Frimpong, F., Danquah, A., Danquah, E. Y., Asante, I. K., Abebrese, S. O., Dormatey, R., Afriyie-Debrah, C., Ribeiro, P. F., Owusu Danquah, E., Agyeman, K., Bam, R. K., & Asante, M. D. (2025). *The responses and adaptations of rice (Oryza sativa L.) to drought stress: A review. In Climate Smart Agriculture* (Vol. 2, Number 4). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.csag.2025.100080>
- Aenunnisa, N., Sumarjono, D., Program Studi, M. S., & Pertanian, D. (2017). Pola Distribusi dan Margin Pemasaran Gabah di Kabupaten Karawang. In *MEDIAGRO* (Vol. 33, Number 1).
- Anggraini U. (2011). Studi Sintesis Ozon dengan Metode Lucutan Plasma. Universitas Brawijaya. Malang, 1–79.
- AOAC. (2006). *Official methods of analysis of AOAC International*. AOAC International.
- Badan Pangan Nasional. (2023). Harga Pembelian Pemerintah dan Rafaksi Harga Gabah dan Beras. Badan Pangan Nasional, Jakarta.
- Balet, S., Guelpa, A., Fox, G., & Manley, M. (2019). *Rapid Visco Analyser (RVA) as a Tool for Measuring Starch-Related Physiochemical 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>
- Banurea, I., Sasmitaloka, K. S., Sukasih, E., Widowati, D. S., Besar, B., Dan, P., Pascapanen, P., Jalan, P., Pelajar, T., 12, N., & Barat, J. (2020). Karakterisasi Nasi Instan yang Diproduksi dengan Metode *Freeze Drying*. *Characterization of Instant Rice Produced by Freeze Drying. Warta IHP/Journal of Agro-Based Industry*, 37(2), 133–143. <https://doi.org/https://doi.org/10.32765/wartaihp.v37i2.5998>
- Bao. (2019). *Rice Chemistry and Technology* (4th ed.). Woodhead Publishing.

- Bao-Rong LU, Song GE, Tao SANG, Jia-Kuan CHEN, & De-Yuan HONG. (2001). *The current taxonomy and perplexity of the genus Oryza (Poaceae)*. *Journal of Systematics and Evolution*, 39 (4), 373–388.
- BBPSI Padi. (2023). Deskripsi Varietas Unggul Baru Padi. Balai Besar Pengujian Standar Instrumen Padi, 37.
- Bewley, J. D. (1997). *Seed Germination and Dormancy*. In *The Plant Cell* (Vol. 9). *American Society of Plant Physiologists*.
- Bimo, Syakur Abdul, & Warsito Agung. (2011). Aplikasi Ignition Coil Sebagai Pembangkit Tegangan Tinggi Implus Untuk Penyedia Daya Reaktor Ozon.
- BPS. (2024). Luas Panen dan Produksi Padi di Indonesia. Badan Pusat Statistik. Jakarta, 6.
- BSN. (2020). SNI 6128:2020 Beras. Badan Standarisasi Nasional, Jakarta. www.bsn.go.id
- BSN. (2023). SNI-224-2023-Gabah. *Badan Standarisasi Nasional, Jakarta*.
- 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>
- Cho, D. H., & Lim, S. T. (2016). *Germinated brown rice and its bio-functional compounds*. In *Food Chemistry* (Vol. 196, pp. 259–271). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.025>
- Ciccarese, F., Sasanelli, N., Ciccarese, A., Ziadi, T., Ambrico, A., & Mancini, L. (2007). *Seed disinfestation by ozone treatments*.
- Copeland, L. O., & M. M. B. (2001). *Principles of seed science and technology* (4th ed.). Springer.
- DeGarmo, E. P., S. W. G., & C. J. R. (1984). *Engineering economy* (7th ed.). Macmillan.
- Ding, W., Wang, Y., Zhang, W., Shi, Y., & Wang, D. (2015). *Effect of ozone treatment on physicochemical properties of waxy rice flour and waxy rice starch*. *International Journal of Food Science and Technology*, 50(3), 744–749. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12691>

- do Nascimento, L. Á., Abhilasha, A., Singh, J., Elias, M. C., & Colussi, R. (2022). *Rice Germination and Its Impact on Technological and Nutritional Properties: A Review*. In *Rice Science* (Vol. 29, Number 3, pp. 201–215). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2022.01.009>
- Duka, F. S., & Rahman, A. N. F. (2023). *Germinated rice: An overview of gaba, phenolic components and antioxidant activity*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1230(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1230/1/012172>
- Fathoni, A., Hidayat, R., & Santoso, J. (2025). *Physical and Physiological Quality of Rice Seeds of Inpari 32 Variety Under Different Harvest Ages, Packaging Types, and Storage Durations*. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, Vol. 14, No. 5, 1869–1881. <https://doi.org/10.23960/jtep-l.v14i5.1869-1881>
- FDA. (2001). *Secondary Direct Food Additives Permitted in Food for Human Consumption Ozone*. *Food and Drug Administration*, 66, 123, 33829–33830.
- Gaspersz. (2006). *Teknik Analisis Dalam Penelitian Percobaan* (3rd ed., Vol. 1). PT Tarsito Bandung.
- Gill, S. S., & Tuteja, N. (2010). *Reactive Oxygen Species and Antioxidant Machinery in Abiotic Stress Tolerance in Crop Plants*. In *Plant Physiology and Biochemistry* (Vol. 48, Number 12, pp. 909–930). <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
- Guzel-Seydim, Z. B., Greene, A. K., & Seydim, A. C. (2004). *Use of ozone in the food industry*. *LWT*, 37(4), 453–460. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2003.10.014>
- Hasanuzzaman, M. (n.d.). *Germination of seeds Determination of Germination Percentage of the Supplied Seed Sample*. Retrieved www.hasanuzzaman.webs.com
- He, D., & Yang, P. (2013). *Proteomics of rice seed germination*. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 4, Number JUL). *Frontiers Research Foundation*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00246>

- Hebishy, E., Buchanan, D., Rice, J., & Oyeyinka, S. A. (2024). *Variation in amylose content in three rice variants predominantly influences the properties of sushi rice. Journal of Food Measurement and Characterization*, 18(6), 4545–4557. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02513-x>
- 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*). In *Jurnal Kesehatan Bakti Tunas Husada* (Vol. 15).
- Hudson, J. B., Sharma, M., & Vimalanathan, S. (2009). *Development of a practical method for using ozone gas as a virus decontaminating agent. Ozone: Science and Engineering*, 31(3), 216–223. <https://doi.org/10.1080/01919510902747969>
- Ifmaily. (2018). Penetapan Kadar Pati Pada Buah Mangga Muda (*Mangifera Indica* L.) Menggunakan Metode Luff Schoorl. *Jurnal Katalisator*, 3(2), 106. <https://doi.org/10.22216/jk.v3i2.3406>
- Juliano, B. O. (1993a). *Rice In Human Nutrition*. Rome: *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO).
- Juliano, B. O. (1993b). *Rice in human nutrition*. the collaboration of the International Rice Research Institute, *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Kaur, K., Kaur, P., Kumar, S., Zalpour, 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).
- Khatun, L., Brahma, R., & Ray, S. (2023). *Food Science and Applied Biotechnology Nutritional and functional potentials of germinated rice: A*

- systematic review. Food Science and Applied Biotechnology*, 2023(2), 263–281. <https://doi.org/10.30721/fsab2023.v6.i2>
- Khwanchai, P., Fong-In, S., Prommajak, T., & Phandaeng, N. (2024). *Effect of soaking conditions on physicochemical properties and sensory quality of cooked glutinous rice with an electric rice cooker. Food Science and Preservation*, 31(4), 507–517. <https://doi.org/10.11002/fsp.2024.31.4.507>
- Kim, J.-G., Yousef, A. E., & Dave, S. (1999). *Application of Ozone for Enhancing the Microbiological Safety and Quality of Foods: A Review. In Journal of Food Protection* (Vol. 62, Number 9).
- Koswara. (2009). *Teknologi Pengolahan Beras (Teori dan Praktek)*. EBookPangan.Com.
- Kumoro, A. C., Ratnawati, R., & Retnowati, D. S. (2017). *Reaction and mass transfer kinetics model of hydrogen peroxide oxidation of starch under influence of ultraviolet irradiation. Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 61(3), 236–245. <https://doi.org/10.3311/PPch.9354>
- Millati, T., Pranoto, Y., Bintoro, N., & Utami, T. (2017). Pengaruh Suhu Penyimpanan pada Gabah Basah yang Baru Dipanen terhadap Perubahan Mutu Fisik Beras Giling. *Agritech*, 37(4)(4), 477–485. <https://doi.org/10.22146/agritech.12015>
- 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>
- Nurmala, T. (1998). *Serealia: Sumber Karbohidrat Utama*. Jakarta. PT. Rineka Cipta.
- Nursalim, Y., & Razali, Z. Y. (2007). *Bekatul Makanan yang Menyehatkan*. ArgoMedia Pustaka.
- O'Donnell, C. P. (2012). *Ozone in food processing*. Blackwell Pub.
- Pandiselvam, R., Subhashini, S., Banuu Priya, E. P., Kothakota, A., Ramesh, S. V., & Shahir, S. (2019). *Ozone based food preservation: a promising green*

- technology for enhanced food safety. In Ozone: Science and Engineering* (Vol. 41, Number 1, pp. 17–34). Taylor and Francis Inc. <https://doi.org/10.1080/01919512.2018.1490636>
- 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>
- Patil, S. B., & Khan, M. K. (2011). *Germinated Brown Rice as a Value Added Rice Product: A review. In Journal of Food Science and Technology* (Vol. 48, Number 6, pp. 661–667). <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0232-4>
- Peng, S., Caihua, X., Feng, X., Wudong, C., Jifu, B., Changsheng, H., Tong, T., & Chenghai, L. (2021). *Quality Formation of Germination Brown Rice Under Microwave Drying: From GABA Content to Color Value. Emirates Journal of Food and Agriculture, 33*(8), 621–628. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2021.v33.i8.2735>
- Pradipta, S., Ubaidillah, M., & Siswoyo, T. A. (2020). *Physicochemical, functional and antioxidant properties of pigmented rice. Current Research in Nutrition and Food Science, 8*(3), 837–851. <https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.8.3.15>
- Purwadi, Usada Widdi, & Suryadi dan Isyuniarto. (2007). *Konstruksi Tabung Lucutan Plasma Pembangkit Ozon 100 Watt dan Karakteristiknya. Jurnal Kimia Indonesia, Vol. 2* (1), 31–36.
- Rachmaselly & Setiasih. (2019). *Kajian Proses Ozonisasi Tepung Hanjeli. Jurnal Teknologi Pangan Dan Hasil Pertanian. Universitas Semarang, 14*(1), 1–6. <https://doi.org/10.26623/jtphp.v13i1.1845>
- Ramadiansyah. (2021). *Pengaruh Waktu Penundaan Pengeringan Terhadap Kualitas Gabah Padi (Oryza Sativa L.) Varietas Inpari 36 di Kab Pinrang, Sulawesi Selatan. Universitas Hasanuddin Makasar.*
- Ravichanthiran, K., Ma, Z. F., Zhang, H., Cao, Y., Wang, C. W., Muhammad, S., Aglago, E. K., Zhang, Y., Jin, Y., & Pan, B. (2018). *Phytochemical*

- profile of brown rice and its nutrigenomic implications. In Antioxidants* (Vol. 7, Number 6). MDPI. <https://doi.org/10.3390/antiox7060071>
- Saleh, A. S. M., Wang, P., Wang, N., Yang, L., & Xiao, Z. (2019). *Brown Rice Versus White Rice: Nutritional Quality, Potential Health Benefits, Development of Food Products, and Preservation Technologies. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(4), 1070–1096. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12449>
- Salehi, F. (2019). *Improvement of gluten-free bread and cake properties using natural hydrocolloids: A review. In Food Science and Nutrition* (Vol. 7, Number 11, pp. 3391–3402). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1245>
- Saputra, Saputra Dwi Wahyu, & Triwitono, P. (2024). *Germination Changes The Chemical Composition and Improves Antioxidant Activity of Indonesian Local Brown Rice var Mentikwangi. In JITIPARI* (Vol. 9, Number 2). <http://ejurnal.unisri.ac.id/index.php/jtpr/index>
- 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>
- Sitoe, E. da P. E., Pacheco, F. C., & Chilala, F. D. (2025). *Advances in ozone technology for preservation of grains and end products: Application techniques, control of microbial contaminants, mitigation of mycotoxins, impact on quality, and regulatory approvals. In Comprehensive Reviews*

- in Food Science and Food Safety (Vol. 24, Number 3). John Wiley and Sons Inc.* <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70173>
- Suarti, B., Setiavani, G., Nusa, M. I., Fuadi, M., & Apriyanti, I. (2023). Perbedaan Sifat Fisik dan Amilosa Beras Pecah Kulit dan Beras Sosoh (Vol. 17).
- Suarti, Sukarno, Ardiansyah, & Budijanto Slamet. (2021). Karakterisasi Sifat Fisikokimia dan Fungsional Beras Pecah Kulit Berpigmen dan Tanpa Pigmen. *Jurnal Pangan*, 30 (1).
- Sugiyono. (2017). Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D (25th ed.). Alfabeta.
- Suliartini, Sadimantara. G. R, Wijayanto. T, & Muhidin. (2011). pengujian kadar antosianin padi gogo beras merah hasil koleksi plasma nutfah sulawesi tenggara. *Crop Argo*, 4 (2), 43–48.
- Suparto, H., Gazali, A., Widydwati, W., Syifa Badalliah, N., Mariatul Kiftiah, dan, & Agroekoteknologi ULM, P. F. (2024). Uji Berbagai Bahan Matriconditioning Terhadap Viabilitas dan Vigor Benih Padi (*Oryza Sativa* L.) Varietas Inpari 32. In *Jurnal AGRI PEAT* (Vol. 25, Number 2). Elektronik.
- Swastika. (2012). Teknologi Panen dan Pascapanen Padi: Kendala Adopsi dan Kebijakan Strategi Pengembangan.
- Tiwari, B. K., Brennan, C. S., Curran, T., Gallagher, E., Cullen, P. J., & O' Donnell, C. P. (2010). *Application of ozone in grain processing. In Journal of Cereal Science (Vol. 51, Number 3, pp. 248–255).* <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.01.007>
- Toyoizumi, T., Kosugi, T., Toyama, Y., & Nakajima, T. (2021). *Effects of high-temperature cooking on the gamma-aminobutyric acid content and antioxidant capacity of germinated brown rice (Oryza sativa L.). CYTA - Journal of Food*, 19(1), 360–369. <https://doi.org/10.1080/19476337.2021.1905721>

- Upadhyay, A., & Kumar Karn, S. (2018). *Brown Rice: Nutritional Composition and Health Benefits. REVIEW ARTICLE J. Food Sci. Technol. Nepal*, 10, 48–54.
- Wang, W., Jiang, Q., Tan, B., Yang, H., Cao, F., Chen, J., Huang, M., & Zheng, H. (2025). *The Physio-Biochemical Changes Induced by Gibberellic Acid Seed Priming in Rice Seeds against Submergence Stress: Consequences for Starch Degradation, Energy Metabolism and Hormonal Metabolism. Rice*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12284-025-00870-9>
- Watanabe, M., Maeda, T., Tsukahara, K., Kayahara, H., & Morita, N. (2004). *Application of Pregerminated Brown Rice for Breadmaking*. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2004.81.4.450>.
- Wu, F., Yang, N., Touré, A., Jin, Z., & Xu, X. (2013). *Germinated Brown Rice and Its Role in Human Health. Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53(5), 451–463. <https://doi.org/10.1080/10408398.2010.542259>
- Yang, G., Xu, J., Xu, Y., Li, R., & Wang, S. (2023). *Analysis of Dynamics and Diversity of Microbial Community during Production of Germinated Brown Rice. Foods*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/foods12040755>
- Yılmaz Tuncel, N. (2023). *Stabilization of Rice Bran: A Review. In Foods (Vol. 12, Number 9). MDPI*. <https://doi.org/10.3390/foods12091924>
- Yodpitak, S. (2019). *Effect of Non-Termal Plasma On Changes in Physicochemical Properties and Contents Of Phytochemicals In Pre-Germination Rice Seeds*.
- Yuriyah, S., Purwanto, O. D., Afza, H., Dadang, A., Masyuri, A., Galurina, R. S., & Utami, D. W. (2024). *Evaluasi Mutu Fisikokimia Beras Hasil Persilangan antara Empat Padi Varietas Unggul dan Padi Liar (Oryza glaberrima dan O. rufipogon). Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 29(3), 397–407. <https://doi.org/10.18343/jipi.29.3.397>
- Yusuf, B., Warsito, A., Syakur, A., Widiassa, N., & Elektro, T. (2008). *Aplikasi Pembangkit Tegangan Tinggi Implus Untuk Pembuatan Reaktor Ozon*.

- Zhang, L., Hao, N., Li, W., Zhang, B., Shi, T., Xie, M., & Yu, M. (2022). *Effect of Ultrasonic Induction on the Main Physiological and Biochemical Indicators and γ -Aminobutyric Acid Content of Maize during Germination*. *Foods*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/foods11091358>
- Zhu, F. (2018). *Effect of ozone treatment on the quality of grain products*. In *Food Chemistry* (Vol. 264, pp. 358–366). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.047>

LAMPIRAN

Lampiran 1. Perhitungan Rancangan Percobaan Penelitian

Pada penelitian ini penentuan jumlah ulangan menggunakan rumus yang bersumber dari Gasperz (2006) sebagai berikut:

r = Ulangan

t = Perlakuan

Maka:

$$(r-1)(t-1) \geq 15 \qquad N = r \times t$$

$$(r-1)(10-1) \geq 15 \qquad N = 3 \times 10$$

$$9(r-1) \geq 15 \qquad N = 30 \text{ satuan percobaan}$$

$$9r - 9 \geq 15$$

$$9r \geq 24$$

$$r \geq 2,67 \sim 3 \text{ kali ulangan}$$

Keterangan :

t = Jumlah perlakuan

r = Jumlah pengulangan

15 = Derajat bebas galat

N = Satuan percobaan

Maka dari itu, penelitian ini didapatkan 10 perlakuan dengan 3 kali ulangan sehingga menghasilkan 30 satuan percobaan

Lampiran 2. Analisis Densitas Kamba (Banurea et al., 2020)

Analisis densitas kamba dihitung berdasarkan Banuera et al. (2020). Sampel diletakkan dalam gelas ukur hingga mencapai batas tera, kemudian ditimbang bobotnya pada neraca analitik. Densitas kamba dihitung dengan membandingkan

berat sampel sebelum direhidrasi sebanyak 50 ml dengan volume gelas ukur yang sama (50 ml).

$$\text{Densitas Kamba (g/ml)} = \frac{W_1 - W_2}{V}$$

Keterangan:

W1 = gelas ukur 50 ml

W2 = sampel

V = volume gelas ukur

Lampiran 3. Analisis (%) Rendemen (Yuriyah et al., 2024)

Prosedur diawali dengan menimbang beras sebelum dikecambahkan sebagai berat awal (W_0). Beras kemudian direndam dan dikecambahkan sesuai kondisi perlakuan hingga mencapai kriteria yang diinginkan, selanjutnya dikeringkan memakai oven atau pengering udara sampai kadar air setimbang. Setelah itu, beras kecambah ditimbang sebagai berat akhir (W_1). Rendemen beras kecambah dihitung sebagai presentase berat akhir terhadap berat awal.

$$\% \text{ Rendemen Beras Kecambah} = \frac{W_1}{W_0} \times 100\%$$

Lampiran 4. Analisis (%) Germinasi (Hasanuzzaman, n.d.)

Uji persentase perkecambahan dilakukan dengan menggunakan 50 butir benih yang diambil secara acak dari sampel benih murni. Benih diletakkan pada wadah bersih dan dilapisi kain lap lembab dan disusun dengan jarak seragam. Selanjutnya cawan petri diinkubasi pada suhu sekitar 18–25°C hingga kecambah muncul 2-5 mm. Persentase perkecambahan dihitung berdasarkan jumlah kecambah normal dibandingkan dengan jumlah benih yang diuji menggunakan rumus:

$$\text{Persentase Perkecambahan (\%)} = \frac{\text{Jumlah kecambah normal}}{\text{Jumlah benih yang diuji}} \times 100$$

Lampiran 5. Analisis Derajat Putih Metode Spektrofotometri Reflektans (Khwanchai et al., 2024)

Analisis derajat putih dengan instrumen *Bench-top Spectrophotometer* Konica Minolta CM-5 yang diintegrasikan dengan perangkat lunak *SpectraMagic* NX Pro pada jumlah iluminan D65. Prinsip kerja dari alat ini adalah mengukur nilai reflektansi cahaya standar pada permukaan sampel, yang kemudian dikonversikan menjadi koordinat warna sistem CIELAB diperoleh nilai L^* , a^* , dan b^* dengan nilai L (*lightness*) menunjukkan nilai kecerahan dengan 0 (hitam) sampai 100 (putih), nilai a^* (komponen (+) merah hingga (-) hijau) dan b^* (komponen (+) kuning hingga (-) biru). Catat nilai L^* , a^* , b^* pada layar, selanjutnya digunakan untuk menghitung nilai derajat putih *Whiteness Index* dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{Whiteness Index} = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}}$$

Lampiran 6. Analisis Pasting Rapid Visco Analyzer (Hebishy et al., 2024)

Analisis pasting profile menggunakan Rapid Visco Analyzer (RVA) dimulai dengan menimbang sampel beras halus sebanyak 3 g (basis kering) kemudian dimasukkan kedalam tabung canister RVA. Selanjutnya ditambahkan akuades hingga mencapai total bobot 28 g sesuai dengan metode standar RVA, lalu campuran dihomogenkan secara perlahan untuk mencegah pembentukan gumpalan. Canister dipasang pada instrumen RVA dan dijalankan menggunakan program pemanas-pendingin standar yang umumnya meliputi fase pemanasan bertahap hingga suhu gelatinisasi, penahanan pada suhu tinggi, serta pendinginan kembali ke

suhu awal dengan kecepatan dan waktu terkontrol. Selama pengujian, RVA merekam perubahan viskositas secara kontinyu sehingga diperoleh kurva pasting yang kemudian dianalisis untuk menentukan *peak viscosity* (viskositas maksimum saat gelatinisasi), *breakdown* (selisih antara peak dan viskositas minimum selama pemanasan yang mencerminkan stabilitas granula pati), serta *final viscosity* (viskositas akhir setelah pendinginan yang menggambarkan kemampuan pembentukan gel dan retrogradasi pati). Hasil analisis RVA digunakan untuk mengevaluasi karakteristik gelatinisasi dan stabilitas pati atau beras selama proses pemanasan dan pendinginan.

Lampiran 7. Analisis Kadar Air Metode Thermogravimetry (AOAC, 2006)

Analisis kadar air dilakukan menggunakan metode pengeringan oven (*Thermogravimetry*) mengacu pada AOAC 925.10. Proses diawali dengan mengeringkan cawan kosong pada suhu 105°C, mendinginkannya dalam eksikator, dan menimbanginya sebagai bobot cawan kosong. Selanjutnya, sampel sebanyak 1 gram dimasukkan ke dalam cawan dan ditimbang sebagai bobot awal, lalu dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 3–5 jam hingga mencapai bobot konstan. Setelah didinginkan kembali dalam eksikator, cawan berisi sampel kering ditimbang. Persentase kadar air kemudian dihitung dengan membandingkan selisih berat sebelum dan sesudah pengeringan terhadap berat sampel awal.

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

Keterangan:

W_0 = Berat sampel awal

W_1 = Berat cawan konstan + sampel awal (sebelum dioven)

$W_2 = \text{Berat cawan} + \text{residu (setelah kering)}$

Lampiran 8. Analisis (%) Kadar Pati (Ifmaily, 2018)

Analisis kadar pati mengacu pada (Ifmaily, 2018). Sampel ditimbang 100 mg pada neraca analitik, ditambahkan akuades 50 mL, HCl 25% sebanyak 5 mL, dan sampel direfluks selama 3 jam, kemudian didinginkan. Suspensi dinetralkan sampai pH 7 menggunakan NaOH 25%. Suspensi dipindahkan ke dalam labu takar 100 mL, diencerkan hingga mencapai tanda tera menggunakan akuades, kemudian disaring menggunakan kertas saring. Sebanyak 25 mL filtrat dari persiapan sampel dicampur dengan 25 mL larutan Luff Schoorl. Blanko dibuat dengan mencampurkan 25 mL akuades dan 25 mL larutan Luff Schoorl. Campuran larutan ini direfluks dan dipanaskan hingga mendidih (dipertahankan selama 10 menit). Larutan didinginkan dan ditambahkan 15 mL KI 20% serta 25 mL H₂SO₄ 25%. Larutan tersebut kemudian ditutup dan dibiarkan dalam keadaan gelap selama 30 menit. Iodium yang dilepaskan selama proses ini kemudian dititrasi menggunakan larutan Na₂S₂O₃ 0,1 N dengan menambahkan 2 mL indikator pati untuk membantu mendeteksi perubahan warna yang terjadi selama proses titrasi hingga selesai. Glukosa (mg) dihitung berdasarkan tabel Luff Schoorl.

$$\Delta V_{\text{tio}} = V_{\text{blanko}} - V_{\text{sampel}} \times \frac{\text{Normalitas Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}{0,1}$$

Keterangan:

V_{blanko} = Volume Tio yang digunakan untuk menitrasi larutan tanpa sampel

V_{sampel} = Volume Tio yang digunakan untuk menitrasi larutan dengan sampel

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

Keterangan:

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)

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

Keterangan:

FP = Faktor pengencer

0,9 = Faktor Konversi

Lampiran 9. Perhitungan Kebutuhan Sampel

Tabel 24. Perhitungan Kebutuhan sampel

Analisis	Berat Sampel (gram)	Banyaknya	Jumlah (gram)
Uji Densitas Kamba	2	30	60
Uji % Rendemen	2	30	60
Uji % Germinasi	2	30	60
Uji Derajat Putih	2	30	60
Uji Pasting (RVA)	3	10	30
Uji % Kadar Air	1	30	30
Uji % Kadar Pati	2	30	60
Total			360

Lampiran 10. Kebutuhan Bahan Penelitian

Tabel 25. Kebutuhan Bahan Penelitian

No.	Nama Bahan	Harga	Keterangan	Jumlah	Total
1.	Beras Inpari 32	Rp13.000	Kg	1	Rp13.000
2.	Akuades	Rp8.000	L	3	Rp24.000
Total					Rp37.000

Lampiran 11. Kebutuhan Analisis Penelitian

Tabel 26. Kebutuhan Analisis Penelitian

No.	Analisis	Keterangan	Harga	Jumlah
1.	Uji Densitas Kamba	30 Sampel	Rp5.000	Rp150.000
2.	Uji % Rendemen	30 Sampel	Rp5.000	Rp150.000
3.	Uji % Germinasi	30 Sampel	Rp5.000	Rp150.000
4.	Uji Derajat Putih	30 Sampel	Rp25.000	Rp750.000
5.	Uji Pasting (RVA)	10 Sampel	Rp500.000	Rp10.000.000
5.	Uji Kadar Air	30 Sampel	Rp5.000	Rp150.000
6.	Uji Kadar Pati	30 Sampel	Rp.50.000	Rp1.500.000
7.	Sewa Laboratorium	1 Semester	Rp.250.000	Rp250.000
Total				Rp15.600.000

Lampiran 12. Data Hasil Analisis Densitas Kamba

Tabel 27. Data Hasil Perhitungan Densitas Kamba

Konsentrasi Ozon (o)	Kondisi Beras (b)	Ulang an	Berat Gelas Ukur (g)	Ukuran Gelas Ukur (mL)	Berat Sampel (g)	Densitas Kamba (g/mL)	Rata-Rata
o1 (0ppm)	b1 (Gabah)	1	94	50	26	1,36	1,37
		2	94	50	25	1,38	
		3	94	50	25	1,38	
o2 (2ppm)		1	94	50	25	1,38	1,38
		2	94	50	24	1,40	
		3	94	50	26	1,36	
o3 (4ppm)		1	94	50	27	1,34	1,34
		2	94	50	26	1,36	
		3	94	50	27	1,34	
o4 (6ppm)		1	94	50	25	1,38	1,37
		2	94	50	26	1,36	
		3	94	50	25	1,38	
o5 (8ppm)		1	94	50	24	1,40	1,39
		2	94	50	23	1,42	
		3	94	50	26	1,36	

Tabel 28. Data Hasil Perhitungan Densitas Kamba Beras Pecah Kulit

Konsentrasi Ozon (o)	Kondisi Beras (b)	Ulang an	Berat Gelas Ukur (g)	Ukuran Gelas Ukur (mL)	Berat Sampel (g)	Densitas Kamba (g/mL)	Rata-Rata
o1 (0ppm)	b1 (Beras Pecah Kulit)	1	94	50	36	1,16	1,16
		2	94	50	35	1,18	
		3	94	50	37	1,14	
o2 (2ppm)		1	94	50	37	1,14	1,16
		2	94	50	36	1,16	
		3	94	50	35	1,18	
o3 (4ppm)		1	94	50	31	1,26	1,23
		2	94	50	33	1,22	
		3	94	50	33	1,22	
o4 (6ppm)		1	94	50	33	1,22	1,2
		2	94	50	34	1,20	
		3	94	50	35	1,18	
o5 (8ppm)		1	94	50	37	1,14	1,16
		2	94	50	36	1,16	
		3	94	50	34	1,20	

Lampiran 13. Contoh Perhitungan Densitas Kamba

A. (0 ppm) Gabah	
Densitas Kamba	$= \frac{W_1 - W_2}{V}$ $= \frac{94 - 26}{50} = 1,37 \text{ g/mL}$
B. (0 ppm) Beras Pecah Kulit	
Densitas Kamba	$= \frac{W_1 - W_2}{V}$ $= \frac{94 - 36}{50} = 1,16 \text{ g/mL}$

Tabel 29. Nilai Rata-Rata Densitas Kamba

Konsentrasi Ozon	Kondisi Beras	Ulangan			Total	Rata-rata
		1	2	3		
0ppm	Gabah	1,36	1,38	1,38	4,12	1,37
2ppm		1,38	1,40	1,36	4,14	1,38
4ppm		1,34	1,36	1,34	4,04	1,35
6ppm		1,38	1,36	1,38	4,12	1,37
8ppm		1,40	1,42	1,36	4,18	1,39
Total		6,86	6,92	6,82	20,6	6,87
Rata-rata		1,372	1,384	1,364	4,12	1,37
Konsentrasi ozon	Kondisi Beras	1	2	3	total	rata-rata
0ppm	Beras pecah kulit	1,16	1,18	1,14	3,48	1,16
2ppm		1,14	1,16	1,18	3,48	1,16
4ppm		1,26	1,22	1,22	3,70	1,23
6ppm		1,22	1,20	1,18	3,60	1,20
8ppm		1,14	1,16	1,20	3,50	1,17
Total		5,92	5,92	5,92	17,76	5,92
Rata-rata		1,184	1,184	1,184	35,52	1,18
Jumlah		12,78	12,84	12,74	38,36	12,79

Derajat bebas kelompok $= r - 1 = 3 - 1 = 2$

Derajat bebas (o) $= t - 1 = 5 - 1 = 4$

Derajat bebas (b) $= t - 1 = 2 - 1 = 1$

Derajat bebas (ob) $= (a - 1) (b - 1) = (5 - 1) (2 - 1) = 4$

Derajat bebas galat $= (r - 1) (ob - 1) = (3 - 1) (10 - 1) = 18$

Total $= rob - 1 = (5 \times 2 \times 3) - 1 = 29$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{FK} &= \frac{(\mathbf{Total Jenderal})^2}{\mathbf{r} \times \mathbf{O} \times \mathbf{B}} \\
 &= \frac{(38,36)^2}{3 \times 5 \times 2} = \mathbf{49,050}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{JK Total (JKT)} &= \Sigma (\mathbf{Total pengamatan})^2 - \mathbf{FK} \\
 &= ((1,36)^2 + \dots + \dots + \dots + (1,20)^2) - 49,050 \\
 &= \mathbf{0,2935}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{JK Kelompok (JKK)} &= \frac{(\mathbf{Total Kelompok})^2}{\mathbf{O} \times \mathbf{B}} - \mathbf{FK} \\
 &= \frac{(12,78)^2 + (12,84)^2 + (12,74)^2}{5 \times 2} - 49,050 \\
 &= \mathbf{0,0005}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{JK (o)} &= \frac{(\Sigma \mathbf{O1})^2 + (\Sigma \mathbf{O2})^2 + (\Sigma \mathbf{O3})^2 + (\Sigma \mathbf{O4})^2 + (\Sigma \mathbf{O5})^2}{\mathbf{r} \times \mathbf{B}} - \mathbf{FK} \\
 &= \frac{(4,12+3,48)^2 + (4,14+3,48)^2 + (4,04+3,70)^2 + (4,12+3,60)^2 + (4,18+3,50)^2}{3 \times 2} - 49,050 \\
 &= \mathbf{0,0025}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{JK (b)} &= \frac{(\Sigma \mathbf{B1})^2 + (\Sigma \mathbf{B2})^2}{\mathbf{r} \times \mathbf{B}} - \mathbf{FK} \\
 &= \frac{(20,6)^2 + (17,76)^2}{3 \times 5} - 49,050 \\
 &= \mathbf{0,2689}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{JK (ob)} &= \frac{\Sigma (\mathbf{Total Interaksi Faktor O dan B})^2}{\mathbf{r}} - \mathbf{FK} - \mathbf{JK (o)} - \mathbf{JK (b)} \\
 &= \frac{\Sigma (4,12)^2 + \dots + \dots + (3,50)^2}{3} - 49,050 - 0,0025 - 0,2689 \\
 &= \mathbf{0,0134}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{JKG} &= \mathbf{JKT} - \mathbf{JKK} - \mathbf{JK(o)} - \mathbf{JK (b)} - \mathbf{JK (ob)} \\
 &= 0,2935 - 0,0005 - 0,0025 - 0,2689 - 0,0134 \\
 &= \mathbf{0,0083}
 \end{aligned}$$

Tabel 30. Analisis Variansi Densitas Kamba

Sumber Keragaman (SK)	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	kuadrat total (KT)	Fhitung	Ftabel 5%	Notasi
kelompok	2	0,0005	0,00025	0,55	3,55	
faktor (o)	4	0,0025	0,00062	1,35	2,93	tn
faktor (b)	1	0,2689	0,26885	583,52	4,41	*
interaksi (ob)	4	0,0134	0,00335	7,28	2,93	*
galat	18	0,0083	0,00046			
total	29	0,2935				

Berdasarkan tabel ANAVA diketahui bahwa $F_{hitung} > F_{tabel} 5\%$, maka dapat disimpulkan bahwa faktor (b) kondisi beras berpengaruh nyata terhadap Densitas kamba. Oleh karena itu, uji lanjut Duncan dilakukan pada interaksi (ob) untuk melihat kombinasi perlakuan terbaik. Sementara itu, faktor (o) konsentrasi ozon tidak berpengaruh nyata terhadap Densitas Kamba sehingga tidak dilakukan uji lanjut.

$$S_y = \sqrt{\frac{KTG}{r}} = \sqrt{\frac{0,00046}{3}} = 0,01$$

Tabel 31. Uji Lanjut Duncan Interaksi (OB) Densitas Kamba

Uji Lanjut Duncan														
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan										Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
-	-	1,16	o1b2 (1)	-										a
2,97	0,037	1,16	o2b2 (2)	0,00	-									a
3,12	0,039	1,17	o5b2 (3)	0,01	0,01	-								a
3,21	0,040	1,20	o4b2 (4)	0,04	0,04	0,03	-							a
3,27	0,041	1,23	o3b2 (5)	0,07	0,07	0,07	0,03	-						a
3,32	0,041	1,35	o3b1 (6)	0,19	0,19	0,18	0,15	0,11	-					b
3,35	0,042	1,37	o1b1 (7)	0,21	0,21	0,21	0,17	0,14	0,03	-				b
3,37	0,042	1,37	o4b1 (8)	0,21	0,21	0,21	0,17	0,14	0,03	0,00	-			b
3,39	0,042	1,38	o2b1 (9)	0,22	0,22	0,21	0,18	0,15	0,03	0,01	0,01	-		b
3,41	0,042	1,39	o5b1 (10)	0,23	0,23	0,23	0,19	0,16	0,05	0,02	0,02	0,01		b

Keterangan:

Tidak Berpengaruh Nyata =

Berpengaruh Nyata =

Lampiran 14. Perhitungan Dwi Arah Densitas Kamba

Tabel 32. Uji Lanjut Duncan Densitas Kamba Taraf o1 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	1,16	o1b2	-		a
2,97	0,037	1,37	o1b1	0,21	-	b

Tabel 33. Uji Lanjut Duncan Densitas Kamba Taraf o2 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	1,16	o2b2	-		a
2,97	0,037	1,38	o2b1	0,22	-	b

Tabel 34. Uji Lanjut Duncan Densitas Kamba Taraf o3 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	1,23	o3b2	-		a
2,97	0,037	1,35	o3b1	0,11	-	b

Tabel 35. Uji Lanjut Duncan Densitas Kamba Taraf o4 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	1,20	o4b2	-		a
2,97	0,037	1,37	o4b1	0,17	-	b

Tabel 36. Uji Lanjut Duncan Densitas Kamba Taraf o5 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	1,17	o5b2	-		a
2,97	0,037	1,39	o5b1	0,23	-	b

Tabel 37. Uji Lanjut Duncan Densitas Kamba Taraf b1 Terhadap Faktor o

Uji Lanjut Duncan									
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan					Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	3	4	5	
-	-	1,35	o3b1	-					a
2,97	0,037	1,37	o1b1	0,03	-				a
3,12	0,039	1,37	o4b1	0,03	0,00	-			a
3,21	0,040	1,38	o2b1	0,03	0,01	0,01	-		a
3,27	0,041	1,39	o5b1	0,05	0,02	0,02	0,01	-	a

Tabel 38. Uji Lanjut Duncan Densitas Kamba Taraf b2 Terhadap Faktor o

Uji Lanjut Duncan									
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan					Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	3	4	5	
-	-	1,16	o1b2	-					a
2,97	0,037	1,16	o2b2	0,00	-				a
3,12	0,039	1,17	o5b2	0,01	0,01	-			a
3,21	0,040	1,20	o4b2	0,04	0,04	0,03	-		b
3,27	0,041	1,23	o3b2	0,07	0,07	0,07	0,03	-	b

Lampiran 15. Data Hasil Analisis % Rendemen

Tabel 39. Data Hasil Perhitungan % Rendemen Gabah

Konsentrasi Ozon (o)	Kondisi Beras (b)	Ulangan	Berat Akhir Kecambah (g)	Berat Awal (g)	% Rendemen	Rata-Rata
o1 (0ppm)	b1 (Gabah)	1	98	100	98	98,33
		2	99	100	99	
		3	98	100	98	
o2 (2ppm)		1	165	168	98,21	98,21
		2	166	168	98,81	
		3	164	168	97,62	
o3 (4ppm)		1	148	152	97,37	97,14
		2	147	152	96,71	
		3	148	152	97,37	
o4 (6ppm)		1	197	200	98,50	98,33
		2	196	200	98,00	
		3	197	200	98,50	
o5 (8ppm)		1	198	201	98,51	98,5
		2	199	201	99,00	
		3	197	201	98	

Tabel 40. Data Hasil Perhitungan % Rendemen Beras Pecah Kulit

Konsentrasi Ozon (o)	Kondisi Beras (b)	Ulangan	Berat Akhir Kecambah (g)	Berat Awal (g)	% Rendemen	Rata-Rata
o1 (0ppm)	b1 (Beras Pecah Kulit)	1	169	200	84,50	84,5
		2	169	200	84,50	
		3	169	200	84,50	
o2 (2ppm)		1	186	199	93,47	93,29
		2	185	199	92,96	
		3	186	199	93,47	
o3 (4ppm)		1	172	200	86,00	86,16
		2	173	200	86,50	
		3	172	200	86,00	
o4 (6ppm)		1	171	198	86,36	86,19
		2	171	198	86,36	
		3	170	198	85,86	
o5 (8ppm)		1	176	204	86,27	86,11
		2	175	204	85,78	
		3	176	204	86,27	

Lampiran 16. Contoh Perhitungan % Rendemen

C. (0 ppm) Gabah	
% Rendemen Beras Kecambah	$= \frac{W_1}{W_0} \times 100$ $= \frac{98}{100} \times 100 = 98\%$
D. (0 ppm) Beras Pecah Kulit	
% Rendemen Beras Kecambah	$= \frac{W_1}{W_0} \times 100$ $= \frac{169}{200} \times 100 = 84,50\%$

Tabel 41. Nilai Rata-Rata Analisis % Rendemen

Konsentrasi Ozon	Kondisi Beras	Ulangan			Total	Rata-rata
		1	2	3		
0ppm	Gabah	98	99	98	295	98,33
2ppm		98,21	98,8	97,61	294,62	98,21
4ppm		97,36	96,71	97,36	291,43	97,14
6ppm		98,5	98	98,5	295	98,33
8ppm		98,5	99	98	295,5	98,50
Total		490,57	491,51	489,47	1471,55	490,52
Rata-rata		98,114	98,302	97,894	294,31	98,10
Konsentrasi ozon	Kondisi Beras	1	2	3	total	rata-rata
0ppm	Beras pecah kulit	84,5	84,5	84,5	253,50	84,50
2ppm		93,4	92,96	93,4	279,76	93,25
4ppm		86	86,5	86	258,50	86,17
6ppm		86,3	86,3	85,85	258,45	86,15
8ppm		86,2	85,78	86,2	258,18	86,06
Total		436,4	436,04	435,95	1308,39	436,13
Rata-rata		87,28	87,208	87,19	2616,78	87,23
Jumlah		926,97	927,55	925,42	2779,94	926,65

Derajat bebas kelompok $= r - 1 = 3 - 1 = 2$

Derajat bebas (o) $= t - 1 = 5 - 1 = 4$

Derajat bebas (b) $= t - 1 = 2 - 1 = 1$

Derajat bebas (ob) $= (a - 1) (b - 1) = (5 - 1) (2 - 1) = 4$

Derajat bebas galat $= (r - 1) (ob - 1) = (3 - 1) (10 - 1) = 18$

Total $= rob - 1 = (5 \times 2 \times 3) - 1 = 29$

$$\begin{aligned}
 \text{FK} &= \frac{(\text{Total Jendral})^2}{r \times O \times B} \\
 &= \frac{(2779,94)^2}{3 \times 5 \times 2} = 257602,21
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{JK Total (JKT)} &= \Sigma (\text{Total pengamatan})^2 - \text{FK} \\
 &= ((98)^2 + \dots + \dots + \dots + (86,2)^2) - 257602,21 \\
 &= 1036,029
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{JK Kelompok (JKK)} &= \frac{(\text{Total Kelompok})^2}{O \times B} - \text{FK} \\
 &= \frac{(926,97)^2 + (927,55)^2 + (925,42)^2}{5 \times 2} - 257602,21 \\
 &= 0,243
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{JK (o)} &= \frac{(\Sigma O1)^2 + (\Sigma O2)^2 + (\Sigma O3)^2 + (\Sigma O4)^2 + (\Sigma O5)^2}{r \times O} - \text{FK} \\
 &= \frac{(295+253,50)^2 + (294,62+279,76)^2 + (291,43+258,50)^2 + (295+258,45)^2 + (295,5+258,18)^2}{3 \times 2} - 257602,21 \\
 &= 73,801
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{JK (b)} &= \frac{(\Sigma B1)^2 + (\Sigma B2)^2}{r \times B} - \text{FK} \\
 &= \frac{(1471,55)^2 + (1308,39)^2}{3 \times 5} - 257602,21 \\
 &= 887,373
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{JK (ob)} &= \frac{\Sigma (\text{Total Interaksi Faktor O dan B})^2}{r} - \text{FK} - \text{JK (o)} - \text{JK (b)} \\
 &= \frac{\Sigma (295)^2 + \dots + \dots + \dots + (258,18)^2}{3} - 257602,21 - 73,801 - 887,373 \\
 &= 71,984
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{JKG} &= \text{JKT} - \text{JKK} - \text{JK(o)} - \text{JK (b)} - \text{JK (ob)} \\
 &= 1036,029 - 0,243 - 73,801 - 887,373 - 71,984 \\
 &= 2,629
 \end{aligned}$$

Tabel 42. Analisis Variansi % Rendemen

Sumber Keragaman (SK)	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	kuadrat total (KT)	Fhitung	Ftabel 5%	Notasi
kelompok	2	0,243	0,121	0,83	3,55	
faktor (o)	4	73,801	18,450	126,33	2,93	*
faktor (b)	1	887,373	887,373	6075,88	4,41	*
interaksi (ob)	4	71,984	17,996	123,22	2,93	*
galat	18	2,629	0,146			
total	29	1036,029				

Berdasarkan tabel ANAVA diketahui bahwa $F_{hitung} > F_{tabel\ 5\%}$, maka dapat disimpulkan bahwa faktor (o) konsentrasi ozon, faktor (b) kondisi beras, dan interaksi (ob) berpengaruh nyata terhadap % Rendemen. Oleh karena itu, uji lanjut Duncan dilakukan pada interaksi (ob) untuk melihat kombinasi perlakuan terbaik secara menyeluruh. Uji lanjut Duncan tidak dilakukan pada faktor (o) konsentrasi ozon dan faktor (b) kondisi beras karena pengaruh kedua faktor tunggal tersebut sudah terwakili secara detail di dalam hasil uji interaksi (ob).

$$S_y = \sqrt{\frac{KTG}{r}} = \sqrt{\frac{0,146}{3}} = 0,22$$

Tabel 43. Uji Lanjut Duncan Interaksi (OB) % Rendemen

Uji Lanjut Duncan														
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan										Tarf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
-	-	84,50	o1b2 (1)	-										a
2,97	0,66	86,06	o5b2 (2)	1,56	-									b
3,12	0,69	86,15	o4b2 (3)	1,65	0,09	-								b
3,21	0,71	86,17	o3b2 (4)	1,67	0,11	0,02	-							b
3,27	0,72	93,25	o2b2 (5)	8,75	7,19	7,10	7,09	-						c
3,32	0,73	97,14	o3b1 (6)	12,64	11,08	10,99	10,98	3,89	-					d
3,35	0,74	98,21	o2b1 (7)	13,71	12,15	12,06	12,04	4,95	1,06	-				e
3,37	0,74	98,33	o1b1 (8)	13,83	12,27	12,18	12,17	5,08	1,19	0,13	-			e
3,39	0,75	98,33	o4b1 (9)	13,83	12,27	12,18	12,17	5,08	1,19	0,13	0,00	-		e
3,41	0,75	98,50	o5b1 (10)	14,00	12,44	12,35	12,33	5,25	1,36	0,29	0,17	0,17	-	e

Keterangan:

Tidak Berpengaruh Nyata =

Berpengaruh Nyata =

Perhitungan Dwi Arah % Rendemen

Tabel 44. Uji Lanjut Duncan % Rendemen Taraf o1 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	84,50	o1b2	-		a
2,97	0,655	98,33	o1b1	13,83	-	b

Tabel 45. Uji Lanjut Duncan % Rendemen Taraf o2 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	93,25	o2b2	-		a
2,97	0,655	98,21	o2b1	4,96	-	b

Tabel 46. Uji Lanjut Duncan % Rendemen Taraf o3 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	86,17	o3b2	-		a
2,97	0,655	97,14	o3b1	10,97	-	b

Tabel 47. Uji Lanjut Duncan % Rendemen Taraf o4 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	86,15	o4b2	-		a
2,97	0,655	98,33	o4b1	12,18	-	b

Tabel 48. Uji Lanjut Duncan % Rendemen Taraf o5 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	86,06	o5b2	-		a
2,97	0,655	98,50	o5b1	12,44	-	b

Tabel 49. Uji Lanjut Duncan % Rendemen Taraf b1 Terhadap Faktor o

Uji Lanjut Duncan									
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan					Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	3	4	5	
-	-	97,14	o3b1	-					a
2,97	0,655	98,21	o2b1	1,06	-				b
3,12	0,688	98,33	o4b1	1,19	0,13	-			b
3,21	0,708	98,33	o1b1	1,19	0,13	0,00	-		b
3,27	0,721	98,50	o5b1	1,36	0,29	0,17	0,17	-	b

Tabel 50. Uji Lanjut Duncan % Rendemen Taraf b2 Terhadap Faktor o

Uji Lanjut Duncan									
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan					Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	3	4	5	
-	-	84,50	o1b2	-					a
2,97	0,655	86,06	o5b2	1,56	-				b
3,12	0,688	86,15	o4b2	1,65	0,09	-			b
3,21	0,708	86,17	o3b2	1,67	0,11	0,02	-		b
3,27	0,721	93,25	o2b2	8,75	7,19	7,10	7,09	-	c

Lampiran 17. Data Hasil Analisis Derajat Putih

Tabel 51. Data Hasil Perhitungan Derajat Putih Gabah

Konsentrasi Ozon (o)	Kondisi Beras (b)	Ulangan	Duplo	L* (D65)	a* (D65)	b* (D65)	Whiteness Index	Rata-Rata
o1 (0ppm)	b1 (Gabah)	1	1	85,11	1,48	13,38	79,93	79,92
			2	85,11	1,49	13,38	79,93	
		2	1	85,10	1,48	13,36	79,93	79,93
			2	85,10	1,50	13,35	79,94	
		3	1	85,11	1,49	13,36	79,94	79,94
			2	85,12	1,49	13,35	79,95	
o2 (2ppm)		1	1	83,99	1,67	14,03	78,65	78,65
			2	83,98	1,65	14,01	78,65	
		2	1	83,97	1,68	14,06	78,61	78,61
			2	83,98	1,67	14,05	78,63	
		3	1	83,98	1,66	14,06	78,62	78,62
			2	83,98	1,66	14,05	78,63	
o3 (4ppm)		1	1	85,00	1,43	12,07	80,69	80,69
			2	85,00	1,44	12,06	80,70	
		2	1	85,00	1,44	12,07	80,69	80,69
			2	85,00	1,43	12,08	80,69	
		3	1	84,99	1,44	12,09	80,67	80,67
			2	85,00	1,45	12,10	80,67	
o4 (6ppm)		1	1	83,74	1,67	13,97	78,50	78,49
			2	83,74	1,68	13,98	78,49	
		2	1	83,73	1,70	13,97	78,49	78,49
			2	83,74	1,69	13,97	78,50	
		3	1	83,73	1,69	13,98	78,48	78,48
			2	83,73	1,68	13,98	78,48	
o5 (8ppm)		1	1	85,14	1,68	13,06	80,15	80,14
			2	85,14	1,68	13,05	80,15	
		2	1	85,14	1,69	13,06	80,14	80,14
			2	85,13	1,69	13,06	80,14	
		3	1	85,14	1,69	13,70	79,72	79,93
			2	85,13	1,69	13,05	80,14	

Tabel 52. Data Hasil Perhitungan Derajat Putih Beras Pecah Kulit

Konsentrasi Ozon (o)	Kondisi Beras (b)	Ulangan	Duplo	L* (D65)	a* (D65)	b* (D65)	Whiteness Index	Rata-Rata
o1 (0ppm)	b1 (Gabah)	1	1	83,64	2,07	15,77	77,18	77,17
			2	83,63	2,09	15,77	77,17	
		2	1	83,66	2,08	15,75	77,21	77,20
			2	83,65	2,09	15,75	77,20	
		3	1	83,65	2,09	15,76	77,19	77,19
			2	83,65	2,09	15,75	77,20	
o2 (2ppm)		1	1	83,44	2,10	15,41	77,28	77,28
			2	83,44	2,10	15,41	77,28	
		2	1	83,46	2,10	15,41	77,30	77,29
			2	83,46	2,10	15,42	77,29	
		3	1	83,46	2,09	15,43	77,28	77,28
			2	83,45	2,10	15,42	77,28	
o3 (4ppm)		1	1	84,73	1,85	15,72	78,01	78,00
			2	84,72	1,86	15,71	78,01	
		2	1	84,73	1,85	15,73	78,00	77,99
			2	84,73	1,86	15,74	77,99	
		3	1	84,73	1,86	15,73	78,00	78,00
			2	84,73	1,86	15,72	78,01	
o4 (6ppm)		1	1	82,55	2,25	16,29	76,02	76,02
			2	82,55	2,26	16,28	76,03	
		2	1	82,59	2,25	16,28	76,06	76,05
			2	82,59	2,26	16,28	76,06	
		3	1	82,57	2,26	16,29	76,04	76,03
			2	82,58	2,26	16,31	76,03	
o5 (8ppm)		1	1	83,47	2,10	16,09	76,84	76,84
			2	83,47	2,11	16,07	76,85	
		2	1	83,48	2,08	16,08	76,85	76,85
			2	83,48	2,11	16,08	76,85	
		3	1	83,47	2,10	16,07	76,85	76,85
			2	83,47	2,09	16,07	76,85	

Lampiran 18. Contoh Perhitungan Derajat Putih

A. (0 ppm) Gabah

$$\text{Whiteness Index} = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}}$$

$$\text{Duplo Ulangan 1} = 100 - \sqrt{(100 - 85,11)^2 + 1,48^2 + 13,38^2} = 79,93$$

$$\text{Duplo Ulangan 2} = 100 - \sqrt{(100 - 85,11)^2 + 1,49^2 + 13,38^2} = 79,93$$

$$\text{Rata- Rata} = \frac{79,93 + 79,93}{2} = 79,92$$

B. (0 ppm) Beras pecah Kulit

$$\text{Duplo Ulangan 1} = 100 - \sqrt{(100 - 83,64)^2 + 2,07^2 + 15,77^2} = 77,18$$

$$\text{Duplo Ulangan 2} = 100 - \sqrt{(100 - 83,63)^2 + 2,09^2 + 15,77^2} = 77,17$$

$$\text{Rata- Rata} = \frac{79,93 + 79,93}{2} = 77,17$$

Tabel 53. Nilai Rata-Rata Analisis Derajat Putih

Konsentras i Ozon	Kondisi Beras	Ulangan			Total	Rata-rata
		1	2	3		
0ppm	Gabah	79,92	79,93	79,94	239,79	79,93
2ppm		78,65	78,61	78,62	235,88	78,63
4ppm		80,69	80,69	80,67	242,05	80,68
6ppm		78,49	78,49	78,48	235,46	78,49
8ppm		80,14	80,14	79,93	240,21	80,07
Total		397,89	397,86	397,64	1193,39	397,80
Rata-rata		79,578	79,572	79,528	238,678	79,56
Konsentras i ozon	Kondisi Beras	1	2	3	total	rata-rata
0ppm	Beras pecah kulit	77,17	77,20	77,19	231,56	77,19
2ppm		77,28	77,29	77,28	231,85	77,28
4ppm		78,00	77,99	78,00	233,99	78,00
6ppm		76,02	76,05	76,03	228,10	76,03
8ppm		76,84	76,85	76,85	230,54	76,85
Total		385,31	385,38	385,35	1156,04	385,35
Rata-rata		77,062	77,076	77,07	2312,08	77,07
Jumlah		783,2	783,24	782,99	2349,43	783,14

$$\text{Derajat bebas kelompok} = r - 1 = 3 - 1 = 2$$

$$\text{Derajat bebas (o)} = t - 1 = 5 - 1 = 4$$

$$\text{Derajat bebas (b)} = t - 1 = 2 - 1 = 1$$

$$\text{Derajat bebas (ob)} = (a - 1)(b - 1) = (5 - 1)(2 - 1) = 4$$

$$\text{Derajat bebas galat} = (r - 1)(ob - 1) = (3 - 1)(10 - 1) = 18$$

$$\text{Total} = rob - 1 = (5 \times 2 \times 3) - 1 = 29$$

$$\mathbf{FK} = \frac{(\mathbf{Total Jenderal})^2}{r \times \mathbf{O} \times \mathbf{B}}$$

$$= \frac{(2349,43)^2}{3 \times 5 \times 2} = \mathbf{183994,04}$$

$$\mathbf{JK Total (JKT)} = \Sigma (\mathbf{Total pengamatan})^2 - \mathbf{FK}$$

$$= ((79,92)^2 + \dots + \dots + \dots + (76,85)^2) - 183994,04$$

$$= \mathbf{63,706}$$

$$\mathbf{JK Kelompok (JKK)} = \frac{(\mathbf{Total Kelompok})^2}{\mathbf{O} \times \mathbf{B}} - \mathbf{FK}$$

$$= \frac{(783,2)^2 + (783,24)^2 + (782,99)^2}{5 \times 2} - 183994,04$$

$$= \mathbf{0,004}$$

$$\mathbf{JK (o)} = \frac{(\Sigma \mathbf{O1})^2 + (\Sigma \mathbf{O2})^2 + (\Sigma \mathbf{O3})^2 + (\Sigma \mathbf{O4})^2 + (\Sigma \mathbf{O5})^2}{r \times \mathbf{O}} - \mathbf{FK}$$

$$= \frac{(239,79+231,56)^2 + (235,88+231,85)^2 + (242,05+233,99)^2 + (235,46+228,10)^2 + (240,21+230,54)^2}{3 \times 2} - 183994,04$$

$$= \mathbf{14,238}$$

$$\mathbf{JK (b)} = \frac{(\Sigma \mathbf{B1})^2 + (\Sigma \mathbf{B2})^2}{r \times \mathbf{B}} - \mathbf{FK}$$

$$= \frac{(1193,39)^2 + (1156,04)^2}{3 \times 5} - 183994,04$$

$$= \mathbf{46,501}$$

$$\mathbf{JK (ob)} = \frac{\Sigma (\mathbf{Total Interaksi Faktor O dan B})^2}{r} - \mathbf{FK} - \mathbf{JK (o)} - \mathbf{JK (b)}$$

$$= \frac{\Sigma (239,79)^2 + \dots + \dots + \dots + (230,54)^2}{3} - 183994,04 - 14,238 - 46,501$$

$$= \mathbf{2,935}$$

$$\mathbf{JKG} = \mathbf{JKT} - \mathbf{JKK} - \mathbf{JK(o)} - \mathbf{JK (b)} - \mathbf{JK (ob)}$$

$$= 63,706 - 0,004 - 14,238 - 46,501 - 2,935$$

$$= \mathbf{0,028}$$

Tabel 54. Analisis Variansi Derajat Putih

Sumber Keragaman (SK)	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Total (KT)	Fhitung	Ftabel 5%	Notasi
kelompok	2	0,004	0,0018	1,15	3,55	
faktor (o)	4	14,238	3,5595	2261,86	2,93	*
faktor (b)	1	46,501	46,5007	29548,61	4,41	*
interaksi (ob)	4	2,935	0,7338	466,29	2,93	*
galat	18	0,028	0,0016			
total	29	63,706				

Berdasarkan tabel ANAVA diketahui bahwa $F_{hitung} > F_{tabel} 5\%$, maka dapat disimpulkan bahwa faktor (o) konsentrasi ozon, faktor (b) kondisi beras, dan interaksi (ob) berpengaruh nyata terhadap Derajat Putih. Oleh karena itu, uji lanjut Duncan dilakukan pada interaksi (ob) untuk melihat kombinasi perlakuan terbaik secara menyeluruh.

$$S_y = \sqrt{\frac{KTG}{r}} = \sqrt{\frac{0,0016}{3}} = 0,023$$

Tabel 55. Uji Lanjut Duncan Interaksi (OB) Derajat putih

Uji Lanjut Duncan														
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan										Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
-	-	76,03	o4b2 (1)	-										a
2,97	0,07	76,85	o5b2 (2)	0,813	-									b
3,12	0,07	77,19	o1b2 (3)	1,153	0,34	-								c
3,21	0,07	77,28	o2b2 (4)	1,250	0,44	0,10	-							d
3,27	0,07	78,00	o3b2 (5)	1,963	1,15	0,81	0,71	-						e
3,32	0,08	78,49	o4b1 (6)	2,453	1,64	1,30	1,20	0,49	-					f
3,35	0,08	78,63	o2b1 (7)	2,593	1,78	1,44	1,34	0,63	0,14	-				g
3,37	0,08	79,93	o1b1 (8)	3,897	3,08	2,74	2,65	1,93	1,44	1,30	-			h
3,39	0,08	80,07	o5b1 (9)	4,037	3,22	2,88	2,79	2,07	1,58	1,44	0,14	-		i
3,41	0,08	80,68	o3b1 (10)	4,650	3,84	3,50	3,40	2,69	2,20	2,06	0,75	0,61	-	j

Keterangan:

Tidak Berpengaruh Nyata = 

Berpengaruh Nyata = 

Lampiran 19. Perhitungan Dwi Arah Derajat Putih

Tabel 56. Uji Lanjut Duncan Derajat Putih Taraf o1 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	77,19	o1b2	-		a
2,97	0,068	79,93	o1b1	2,74	-	b

Tabel 57. Uji Lanjut Duncan Derajat Putih Taraf o2 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	77,28	o2b2	-		a
2,97	0,068	78,63	o2b1	1,34	-	b

Tabel 58. Uji Lanjut Duncan Derajat Putih Taraf o3 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	78,00	o3b2	-		a
2,97	0,068	80,68	o3b1	2,69	-	b

Tabel 59. Uji Lanjut Duncan Derajat Putih Taraf o4 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	76,03	o4b2	-		a
2,97	0,068	78,49	o4b1	2,45	-	b

Tabel 60. Uji Lanjut Duncan Derajat Putih Taraf o5 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	76,85	o5b2	-		a
2,97	0,068	80,07	o5b1	3,22	-	b

Tabel 61. Uji Lanjut Duncan Derajat Putih Taraf b1 Terhadap Faktor o

Uji Lanjut Duncan									
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan					Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	3	4	5	
-	-	78,49	o4b1	-					a
2,97	0,068	78,63	o2b1	0,14	-				b
3,12	0,071	79,93	o1b1	1,44	1,30	-			c
3,21	0,074	80,07	o5b1	1,58	1,44	0,14	-		d
3,27	0,075	80,68	o3b1	2,20	2,06	0,75	0,61	-	e

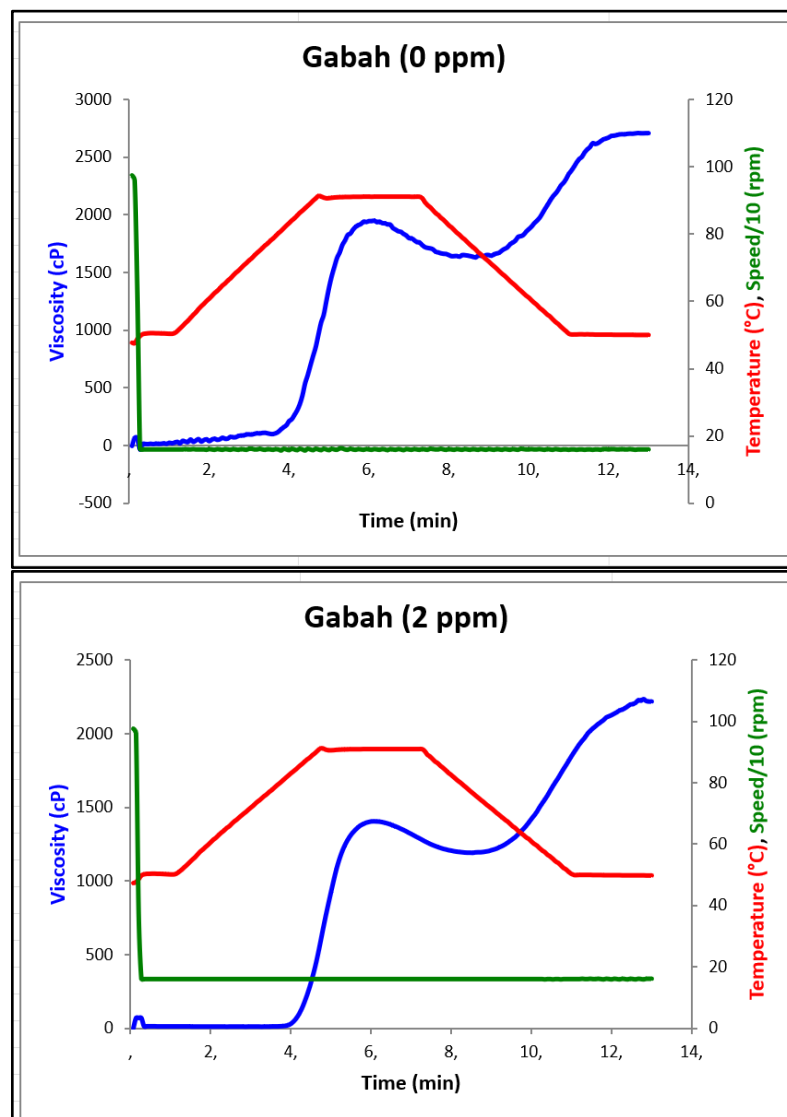
Tabel 62. Uji Lanjut Duncan Derajat Putih Taraf b2 Terhadap Faktor o

Uji Lanjut Duncan									
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan					Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	3	4	5	
-	-	76,03	o4b2	-					a
2,97	0,068	76,85	o5b2	0,81	-				b
3,12	0,071	77,19	o1b2	1,15	0,34	-			c
3,21	0,074	77,28	o2b2	1,25	0,44	0,10	-		d
3,27	0,075	78,00	o3b2	1,96	1,15	0,81	0,71	-	e

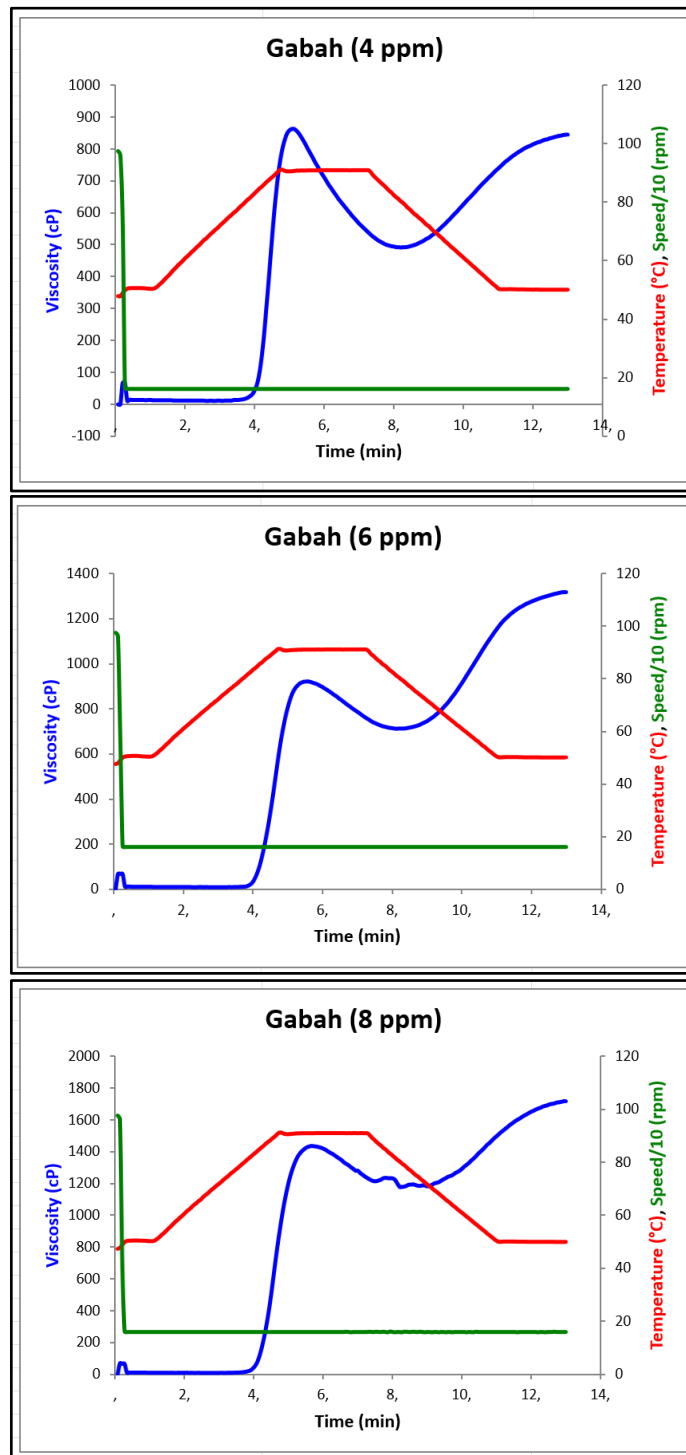
Lampiran 20. Rekapitulasi Data Asli RVA Kelompok Gabah

Test	Peak	Trough	Breakdown	Final Visc	Setback	Peak Time	Pasting Temp
MG 8	1435	1177	258	1716	539	5,67	83,2
MG 6	922	712	210	1319	607	5,53	83,25
MG 4	862	491	371	844	353	5,07	83,15
MG 2	1404	1190	214	2217	1027	6,07	83,2
MG 0	1950	1631	319	2707	1076	6,13	51,8
Mean	1.314,6	1.040,2	274,4	1.760,6	720,4	5,7	76,9
Stdev	443,06	447,08	69,62	731,63	316,70	0,43	14,04

Pada gambar 10 & 11 merupakan kurva amilografi instrumen *Rapid Visco Analyzer* (RVA) untuk masing-masing tingkat konsentrasi ozon pada kelompok gabah.



Gambar 10. Kurva RVA Gabah 0 & 2 ppm

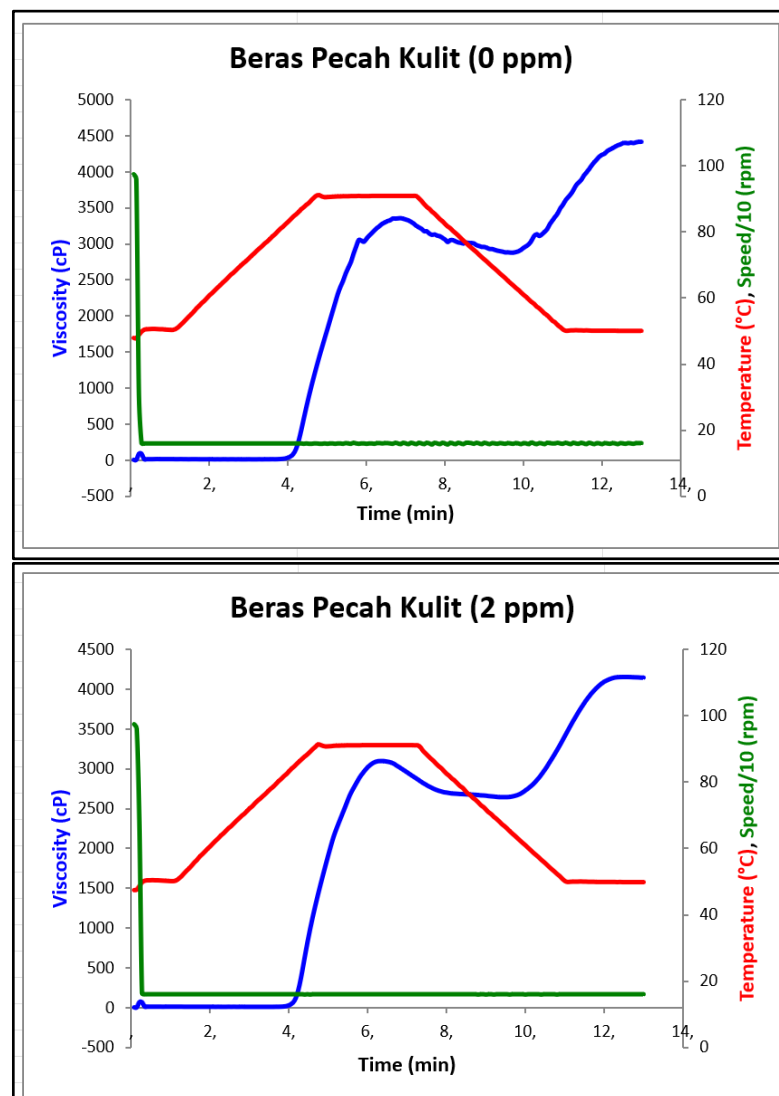


Gambar 11. Kurva RVA Gabah 4, 6, dan 8 ppm

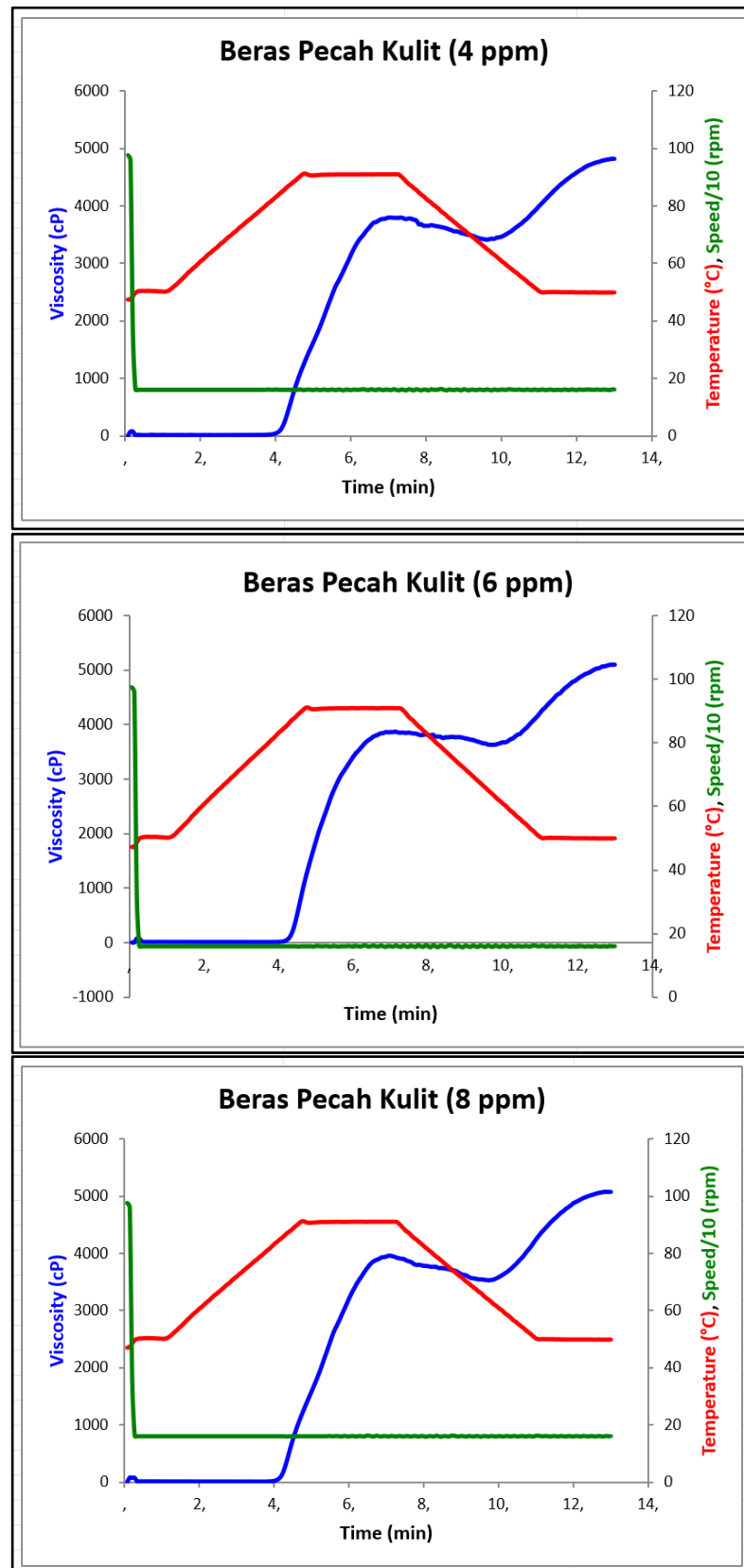
Lampiran 21. Rekapitulasi Data Asli RVA Kelompok Beras Pecah Kulit

Test	Peak	Trough	Breakdown	Final Visc	Setback	Peak Time	Pasting Temp
MBPK 8	3945	3303	642	5074	1771	7	83,3
MBPK 6	3868	3478	390	5106	1628	6,87	84,65
MBPK 4	3793	3243	550	4813	1570	7	83,15
MBPK 2	3101	2647	454	4151	1504	6,33	83,2
MBPK 0	3360	2880	480	4422	1542	6,87	83,15
Mean	3.613,4	3.110,2	503,2	4.713,2	1.603,0	6,8	83,5
Stdev	365,31	338,24	96,47	416,92	104,24	0,28	0,65

Pada gambar 12 & 13 merupakan kurva amilografi instrumen *Rapid Visco Analyzer* (RVA) untuk masing-masing tingkat konsentrasi ozon pada kelompok beras pecah kulit.



Gambar 12. Kurva RVA Beras Pecah Kulit 0 & 2 ppm



Gambar 13. Kurva RVA Beras Pecah Kulit 4, 6, dan 8 ppm

Lampiran 22. Data Hasil Analisis % Germinasi

Tabel 63. Data Hasil Perhitungan % Germinasi

Konsentras i Ozon (o)	Kondis i Beras (b)	Ulangan	Kecamba h Tumbuh (Butir)	Total Benih Uji (Butir)	% Germinas i	Rata- Rata
o1 (0ppm)	b1 Gabah	1	37	50	74	74,66
		2	38	50	76	
		3	37	50	74	
o2 (2ppm)		1	43	50	86	86,66
		2	43	50	86	
		3	44	50	88	
o3 (4ppm)		1	44	50	88	87,33
		2	43	50	86	
		3	44	50	88	
o4 (6ppm)		1	48	50	96	95,33
		2	47	50	94	
		3	48	50	96	
o5 (8ppm)		1	49	50	98	97,33
		2	48	50	96	
		3	49	50	98	
Konsentras i Ozon (o)	Kondis i Beras (b)	Ulangan	Kecamba h Tumbuh (Butir)	Total Benih Uji (Butir)	% Germinas i	Rata- Rata
o1 (0ppm)	b2 Beras Pecah Kulit	1	26	50	52	52,66
		2	25	50	50	
		3	28	50	56	
o2 (2ppm)		1	38	50	76	75,33
		2	39	50	78	
		3	36	50	72	
o3 (4ppm)		1	27	50	54	54,66
		2	28	50	56	
		3	27	50	54	
o4 (6ppm)		1	24	50	48	47,33
		2	23	50	46	
		3	24	50	48	
o5 (8ppm)		1	23	50	46	46,00
		2	24	50	48	
		3	22	50	44	

Lampiran 23. Contoh Perhitungan % Germinasi

A. (0 ppm) Gabah	
% Germinasi	$= \frac{\text{Jumlah kecambah normal}}{\text{Jumlah benih yang diuji}} \times 100$ $= \frac{37}{50} \times 100$ $= 74\%$
B. ppm Beras Pecah Kulit	
% Germinasi	$= \frac{\text{Jumlah kecambah normal}}{\text{Jumlah benih yang diuji}} \times 100$ $= \frac{26}{50} \times 100$ $= 52\%$

Tabel 64. Nilai Rata-Rata Analisis % Germinasi

Konsentrasi Ozon	Kondisi Beras	Ulangan			Total	Rata-rata
		1	2	3		
0ppm	Gabah	74	76	74	224	74,67
2ppm		86	86	88	260	86,67
4ppm		88	86	88	262	87,33
6ppm		96	94	96	286	95,33
8ppm		98	96	98	292	97,33
Total		442	438	444	1324	441,33
Rata-rata		88,4	87,6	88,8	264,8	88,27
Konsentrasi ozon	Kondisi Beras	1	2	3	total	rata-rata
0ppm	Beras pecah kulit	52	50	56	158	52,67
2ppm		76	78	72	226	75,33
4ppm		54	56	54	164	54,67
6ppm		48	46	48	142	47,33
8ppm		46	48	44	138	46,00
Total		276	278	274	828	276,00
Rata-rata		55,2	55,6	54,8	1656	55,20
Jumlah		718	716	718	2152	717,33

$$\begin{aligned}
\text{Derajat bebas kelompok} &= r - 1 = 3 - 1 = 2 \\
\text{Derajat bebas (o)} &= t - 1 = 5 - 1 = 4 \\
\text{Derajat bebas (b)} &= t - 1 = 2 - 1 = 1 \\
\text{Derajat bebas (ob)} &= (a - 1) (b - 1) = (5 - 1) (2 - 1) = 4 \\
\text{Derajat bebas galat} &= (r - 1) (ob - 1) = (3 - 1) (10 - 1) = 18 \\
\text{Total} &= rob - 1 = (5 \times 2 \times 3) - 1 = 29
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{FK} &= \frac{(\mathbf{Total Jenderal})^2}{\mathbf{r \times O \times B}} \\
&= \frac{(2152)^2}{3 \times 5 \times 2} = \mathbf{154370,13}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{JK Total (JKT)} &= \Sigma (\mathbf{Total pengamatan})^2 - \mathbf{FK} \\
&= ((74)^2 + \dots + \dots + \dots + (44)^2) - 154370,13 \\
&= \mathbf{10901,867}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{JK Kelompok (JKK)} &= \frac{(\mathbf{Total Kelompok})^2}{\mathbf{O \times B}} - \mathbf{FK} \\
&= \frac{(718)^2 (716)^2 (718)^2}{5 \times 2} - 154370,13 \\
&= \mathbf{0,267}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{JK (o)} &= \frac{(\Sigma \mathbf{O1})^2 + (\Sigma \mathbf{O2})^2 + (\Sigma \mathbf{O3})^2 + (\Sigma \mathbf{O4})^2 + (\Sigma \mathbf{O5})^2}{\mathbf{r \times O}} - \mathbf{FK} \\
&= \frac{(224+158)^2 + (260+226)^2 + (262+164)^2 + (286+142)^2 + (292+138)^2}{3 \times 2} - 154370,13 \\
&= \mathbf{909,867}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{JK (b)} &= \frac{(\Sigma \mathbf{B1})^2 + (\Sigma \mathbf{B2})^2}{\mathbf{r \times B}} - \mathbf{FK} \\
&= \frac{(1324)^2 + (828)^2}{3 \times 5} - 154370,13 \\
&= \mathbf{8200,533}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{JK (ob)} &= \frac{\Sigma (\mathbf{Total Interaksi Faktor O dan B})^2}{\mathbf{r}} - \mathbf{FK} - \mathbf{JK (o)} - \mathbf{JK (b)} \\
&= \frac{\Sigma (224)^2 + \dots + \dots + \dots + (138)^2}{3} - 154370,13 - 909,867 - 8200,533 \\
&= \mathbf{1727,467}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{JKG} &= \mathbf{JKT} - \mathbf{JKK} - \mathbf{JK(o)} - \mathbf{JK (b)} - \mathbf{JK (ob)} \\
&= 10901,867 - 0,267 - 909,867 - 8200,533 - 1727,467 \\
&= \mathbf{63,733}
\end{aligned}$$

Tabel 65. Analisis Variansi % Germinasi

Sumber Keragaman (SK)	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	kuadrat total (KT)	Fhitung	Ftabel 5%	Notasi
kelompok	2	0,267	0,133	0,04	3,55	
faktor (o)	4	909,867	227,467	64,24	2,93	*
faktor (b)	1	8200,533	8200,533	2316,05	4,41	*
interaksi (ob)	4	1727,467	431,867	121,97	2,93	*
galat	18	63,733	3,541			
total	29	10901,867				

Berdasarkan tabel ANAVA diketahui bahwa $F_{hitung} > F_{tabel} 5\%$, maka dapat disimpulkan bahwa faktor (o) konsentrasi ozon, faktor (b) kondisi beras, dan interaksi (ob) berpengaruh nyata terhadap % Germinasi. Oleh karena itu, uji lanjut Duncan dilakukan pada interaksi (ob) untuk melihat kombinasi perlakuan terbaik secara menyeluruh. Uji lanjut Duncan tidak dilakukan pada faktor (o) konsentrasi ozon dan faktor (b) kondisi beras karena pengaruh kedua faktor tunggal tersebut sudah terwakili secara detail di dalam hasil uji interaksi (ob).

$$S_y = \sqrt{\frac{KTG}{r}} = \sqrt{\frac{3,541}{3}} = 1,08$$

Tabel 66. Uji Lanjut Duncan Interaksi (OB) % Germinasi

Uji Lanjut Duncan														
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan										Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
-	-	46,00	o5b2 (1)	-										a
2,97	3,23	47,33	o4b2 (2)	1,33	-									a
3,12	3,39	52,67	o1b2 (3)	6,67	5,34	-								b
3,21	3,49	54,67	o3b2 (4)	8,67	7,34	2,00	-							b
3,27	3,55	74,67	o1b1 (5)	28,67	27,34	22,00	20,00	-						c
3,32	3,61	75,33	o2b2 (6)	29,33	28,00	22,66	20,66	0,66	-					c
3,35	3,64	86,67	o2b1 (7)	40,67	39,34	34,00	32,00	12,00	11,34	-				d
3,37	3,66	87,33	o3b1 (8)	41,33	40,00	34,66	32,66	12,66	12,00	0,66	-			d
3,39	3,68	95,33	o4b1 (9)	49,33	48,00	42,66	40,66	20,66	20,00	8,66	8,00	-		e
3,41	3,70	97,33	o5b1 (10)	51,33	50,00	44,66	42,66	22,66	22,00	10,66	10,00	2,00	-	e

Keterangan:

Tidak Berpengaruh Nyata =

Berpengaruh Nyata =

Lampiran 24. Perhitungan Dwi Arah % Germinasi

Tabel 67. Uji Lanjut Duncan % Germinasi Taraf o1 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	52,67	o1b2	-		a
2,97	3,227	74,67	o1b1	22,00	-	b

Tabel 68. Uji Lanjut Duncan % Germinasi Taraf o2 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	75,33	o2b2	-		a
2,97	3,227	86,67	o2b1	11,34	-	b

Tabel 69. Uji Lanjut Duncan % Germinasi Taraf o3 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	54,67	o3b2	-		a
2,97	3,227	87,33	o3b1	32,66	-	b

Tabel 70. Uji Lanjut Duncan % Germinasi Taraf o4 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	54,67	o3b2	-		a
2,97	3,227	87,33	o3b1	32,66	-	b

Tabel 71. Uji Lanjut Duncan % Germinasi Taraf o5 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	46,00	o5b2	-		a
2,97	3,227	97,33	o5b1	51,33	-	b

Tabel 72. Uji Lanjut Duncan % Germinasi Taraf b1 Terhadap Faktor o

Uji Lanjut Duncan									
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan					Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	3	4	5	
-	-	74,67	o1b1	-					a
2,97	3,227	86,67	o2b1	12,00	-				b
3,12	3,390	87,33	o3b1	12,67	0,67	-			b
3,21	3,487	95,33	o4b1	20,67	8,67	8,00	-		c
3,27	3,553	97,33	o5b1	22,67	10,67	10,00	2,00	-	c

Tabel 73. Uji Lanjut Duncan % Germinasi Taraf b2 Terhadap Faktor o

Uji Lanjut Duncan									
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan					Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	3	4	5	
-	-	46,00	o5b2	-					a
2,97	3,227	47,33	o4b2	1,33	-				a
3,12	3,390	52,67	o1b2	6,67	5,33	-			b
3,21	3,487	54,67	o3b2	8,67	7,33	2,00	-		b
3,27	3,553	75,33	o2b2	29,33	28,00	22,67	20,67	-	c

Lampiran 25. Data Hasil Analisis % Kadar Air

Tabel 74. Hasil Perhitungan % Kadar Air Gabah

Konsentrasi Ozon (o)	Kondisi Beras (b)	Ulangan	Duplo	W Sampel (g)	Cawan Konstan	Cawan Konstan + Sampel	Cawan + Residu	% Kadar Air	Rata-Rata
o1 (0ppm)	b1 (Gabah)	1	1	1,003	23,437	24,440	24,311	12,86	13,15
			2	1,003	23,437	24,440	24,305	13,45	
		2	1	1,003	22,728	23,731	23,603	12,76	12,86
			2	1,003	22,728	23,731	23,601	12,96	
		3	1	1,002	23,364	24,366	24,235	13,07	13,22
			2	1,002	23,364	24,366	24,232	13,37	
o2 (2ppm)		1	1	1,001	23,873	24,874	24,746	12,78	13,03
			2	1,001	23,873	24,874	24,741	13,28	
		2	1	1,001	23,492	24,493	24,362	13,08	13,23
			2	1,001	23,492	24,493	24,359	13,38	
		3	1	1,002	22,862	23,864	23,732	13,17	13,32
			2	1,002	22,862	23,864	23,729	13,47	
o3 (4ppm)		1	1	1,002	22,576	23,578	23,447	13,07	13,32
			2	1,002	22,576	23,578	23,442	13,57	
		2	1	1,004	23,361	24,365	24,233	13,14	13,24
			2	1,004	23,361	24,365	24,231	13,34	
		3	1	1,001	23,572	24,573	24,441	13,18	13,33
			2	1,001	23,572	24,573	24,438	13,48	
o4 (6ppm)		1	1	1,001	23,542	24,543	24,415	12,78	13,18
			2	1,001	23,542	24,543	24,407	13,58	
		2	1	1,001	23,576	24,577	24,445	13,18	13,33
			2	1,001	23,576	24,577	24,442	13,48	
		3	1	1,003	23,993	24,996	24,862	13,35	13,60
			2	1,003	23,993	24,996	24,857	13,85	
o5 (8ppm)		1	1	1,003	23,671	24,674	24,543	13,06	13,35
			2	1,003	23,671	24,674	24,537	13,65	
		2	1	1,003	23,638	24,641	24,509	13,16	13,25
			2	1,003	23,638	24,641	24,507	13,35	
		3	1	1,002	22,937	23,939	23,807	13,17	13,32
			2	1,002	22,937	23,939	23,804	13,47	

Tabel 75. Hasil Perhitungan % Kadar Air Beras Pecah Kulit

Konsentrasi Ozon (o)	Kondisi Beras (b)	Ulangan	Duplo	W Sampel (g)	Cawan Konstan	Cawan Konstan + Sampel	Cawan + Residu	% Kadar Air	Rata-Rata
o1 (0ppm)	b2 (Beras Pecah Kulit)	1	1	1,001	23,910	24,911	24,773	13,78	13,88
			2	1,001	23,910	24,911	24,771	13,98	
		2	1	1,001	23,192	24,193	24,069	12,38	12,68
			2	1,001	23,192	24,193	24,063	12,98	
		3	1	1,002	23,254	24,256	24,119	13,67	13,77
			2	1,002	23,254	24,256	24,117	13,87	
o2 (2ppm)		1	1	1,003	23,189	24,192	24,056	13,55	13,60
			2	1,003	23,189	24,192	24,055	13,65	
		2	1	1,002	22,914	23,916	23,781	13,47	13,62
			2	1,002	22,914	23,916	23,778	13,77	
		3	1	1,004	23,247	24,251	24,117	13,34	13,54
			2	1,004	23,247	24,251	24,113	13,74	
o3 (4ppm)		1	1	1,000	23,901	24,901	24,774	12,69	13,24
			2	1,000	23,901	24,901	24,763	13,79	
		2	1	1,000	23,596	24,596	24,463	13,29	13,49
			2	1,000	23,596	24,596	24,459	13,70	
		3	1	1,002	23,537	24,539	24,409	12,97	13,32
			2	1,002	23,537	24,539	24,402	13,67	
o4 (6ppm)		1	1	1,001	22,352	23,353	23,215	13,78	13,88
			2	1,001	22,352	23,353	23,213	13,98	
		2	1	1,002	22,532	23,534	23,401	13,27	13,42
			2	1,002	22,532	23,534	23,398	13,57	
		3	1	1,001	23,624	24,625	24,495	12,98	13,18
			2	1,001	23,624	24,625	24,491	13,38	
o5 (8ppm)		1	1	1,001	23,139	24,140	24,006	13,38	13,58
			2	1,001	23,139	24,140	24,002	13,78	
		2	1	1,001	22,973	23,974	23,839	13,48	13,58
			2	1,001	22,973	23,974	23,837	13,68	
		3	1	1,002	23,573	24,575	24,441	13,37	13,52
			2	1,002	23,573	24,575	24,438	13,67	

Lampiran 26. Contoh Perhitungan % Kadar Air

(0) ppm Gabah	
Ulangan 1	
$W_0 = 1,003$ gram	
$W_1 = 24,440$ gram	
$W_2 = 24,311$ gram	
Ulangan 2	
$W_0 = 1,003$ gram	
$W_1 = 24,440$ gram	
$W_2 = 24,305$ gram	
$\% \text{ Kadar Air} = \frac{W_1 - W_2}{W_0} \times 100$	
$\% \text{ Kadar Air} = \frac{24,440 - 24,311}{1,003} \times 100 = 12,86\%$	
$\% \text{ Kadar Air} = \frac{24,440 - 24,305}{1,003} \times 100 = 13,45\%$	
$\text{Rata-Rata} = \frac{12,86 + 13,45}{2} = 13,15\%$	

Tabel 76. Nilai Rata-Rata Analisis % Kadar Air

Konsentrasi Ozon	Kondisi Beras	Ulangan			Total	Rata-rata
		1	2	3		
0ppm	Gabah	13,15	12,86	13,22	39,23	13,08
2ppm		13,03	13,23	13,32	39,58	13,19
4ppm		13,32	13,24	13,33	39,89	13,30
6ppm		13,18	13,33	13,60	40,11	13,37
8ppm		13,35	13,25	13,32	39,92	13,31
Total		66,03	65,91	66,79	198,73	66,24
Rata-rata		13,206	13,182	13,358	39,746	13,25
Konsentrasi ozon	Kondisi Beras	1	2	3	total	rata-rata
0ppm	Beras pecah kulit	13,88	12,68	13,87	40,43	13,48
2ppm		13,60	13,62	13,54	40,76	13,59
4ppm		13,25	13,49	13,32	40,06	13,35
6ppm		13,88	13,42	13,18	40,48	13,49
8ppm		13,58	13,58	13,52	40,68	13,56
Total		68,19	66,79	67,43	202,41	67,47
Rata-rata		13,638	13,358	13,49	404,82	13,49
Jumlah		134,22	132,7	134,22	401,14	133,71

$$\begin{aligned}
\text{Derajat bebas kelompok} &= r - 1 = 3 - 1 = 2 \\
\text{Derajat bebas (o)} &= t - 1 = 5 - 1 = 4 \\
\text{Derajat bebas (b)} &= t - 1 = 2 - 1 = 1 \\
\text{Derajat bebas (ob)} &= (a - 1) (b - 1) = (5 - 1) (2 - 1) = 4 \\
\text{Derajat bebas galat} &= (r - 1) (ob - 1) = (3 - 1) (10 - 1) = 18 \\
\text{Total} &= rob - 1 = (5 \times 2 \times 3) - 1 = 29
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{FK} &= \frac{(\mathbf{Total Jendral})^2}{\mathbf{r \times O \times B}} \\
&= \frac{(401,14)^2}{3 \times 5 \times 2} = \mathbf{5363,78}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{JK Total (JKT)} &= \Sigma (\mathbf{Total pengamatan})^2 - \mathbf{FK} \\
&= ((13,15)^2 + \dots + \dots + \dots + (13,52)^2) - 5363,78 \\
&= \mathbf{2,169}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{JK Kelompok (JKK)} &= \frac{(\mathbf{Total Kelompok})^2}{\mathbf{O \times B}} - \mathbf{FK} \\
&= \frac{(134,22)^2 + (132,70)^2 + (134,22)^2}{5 \times 2} - 5363,78 \\
&= \mathbf{0,154}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{JK (o)} &= \frac{(\Sigma \mathbf{O1})^2 + (\Sigma \mathbf{O2})^2 + (\Sigma \mathbf{O3})^2 + (\Sigma \mathbf{O4})^2 + (\Sigma \mathbf{O5})^2}{\mathbf{r \times O}} - \mathbf{FK} \\
&= \frac{(39,23+40,43)^2 + (39,58+40,76)^2 + (39,89+40,06)^2 + (40,11+40,48)^2 + (39,92+40,68)^2}{3 \times 2} - 5363,78 \\
&= \mathbf{0,114}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{JK (b)} &= \frac{(\Sigma \mathbf{B1})^2 + (\Sigma \mathbf{B2})^2}{\mathbf{r \times B}} - \mathbf{FK} \\
&= \frac{(198,73)^2 + (202,41)^2}{3 \times 5} - 5363,78 \\
&= \mathbf{0,451}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{JK (ob)} &= \frac{\Sigma (\mathbf{Total Interaksi Faktor O dan B})^2}{\mathbf{r}} - \mathbf{FK} - \mathbf{JK (o)} - \mathbf{JK (b)} \\
&= \frac{\Sigma (39,23)^2 + \dots + \dots + \dots + (40,68)^2}{3} - 5363,78 - 0,114 - 0,451 \\
&= \mathbf{0,145}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{JKG} &= \mathbf{JKT} - \mathbf{JKK} - \mathbf{JK(o)} - \mathbf{JK (b)} - \mathbf{JK (ob)} \\
&= 2,169 - 0,154 - 0,114 - 0,451 - 0,145 \\
&= \mathbf{1,305}
\end{aligned}$$

Tabel 77. Analisis Variansi % Kadar Air

sumber keragaman (SK)	derajat bebas (DB)	jumlah kuadrat (JK)	kuadrat total (KT)	Fhitung	Ftabel 5%	Notasi
kelompok	2	0,154	0,077	1,06	3,55	-
faktor (o)	4	0,114	0,028	0,39	2,93	tn
faktor (b)	1	0,451	0,451	6,23	4,41	*
interaksi (ob)	4	0,145	0,036	0,50	2,93	tn
galat	18	1,305	0,073			
total	29	2,169				

Berdasarkan tabel ANAVA diketahui bahwa $F_{hitung} > F_{tabel\ 5\%}$, hanya pada faktor (b) kondisi beras, yang menunjukkan bahwa faktor tunggal tersebut berpengaruh nyata terhadap % Kadar Air. Oleh karena itu, uji lanjut tidak dilakukan pada interaksi (ob) maupun faktor (o) karena kedua komponen tersebut tidak memberikan pengaruh yang nyata. Uji lanjut Duncan dilakukan hanya pada faktor (b) (Gabah dan Beras Pecah Kulit) yang berbeda nyata.

$$S_y = \sqrt{\frac{KTG}{r}} = \sqrt{\frac{0,073}{3}} = 0,15$$

Tabel 78. Uji Lanjut Duncan Faktor (b) % Kadar Air

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	13,25	b1 (1)	-		a
2,97	0,46	13,49	b2 (2)	0,25	-	a

Tabel 79. Uji Lanjut Duncan Faktor (o) % Kadar Air

Uji Lanjut Duncan									
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan					Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	3	4	5	
-	-	13,28	o1	-					a
2,97	0,46	13,33	o3	0,05	-				a
3,12	0,49	13,39	o2	0,11	0,06	-			a
3,21	0,50	13,43	o4	0,15	0,10	0,04	-		a
3,27	0,51	13,43	o5	0,15	0,10	0,04	0,00	-	a

Lampiran 27. Data Hasil Analisis % Kadar Pati

Tabel 80. Hasil Perhitungan % Kadar Pati

Konsentrasi Ozon (o)	Kondisi Beras (b)	Ulangan	W sampel (Mg)	V Blanko (mL)	V Titrasi (mL)	N Natrium Tiosulfat	N Tio Tabel	Vol Tio	Glukosa (Mg)	% Kadar Pati	Rata-rata
o1 (0ppm)	b1 (Gabah)	1	1001	12,30	6,20	0,0989	0,1	6,03	14,775	66,42	66,05
		2	1001	12,30	6,30	0,0989	0,1	5,93	14,525	65,30	
		3	1001	12,30	6,20	0,0989	0,1	6,03	14,775	66,42	
o2 (2ppm)		1	1001	12,30	6,40	0,0989	0,1	5,83	14,275	64,17	64,55
		2	1001	12,30	6,30	0,0989	0,1	5,93	14,525	65,30	
		3	1001	12,30	6,40	0,0989	0,1	5,83	14,275	64,17	
o3 (4ppm)		1	1005	12,30	6,30	0,0989	0,1	5,93	14,525	65,04	65,78
		2	1005	12,30	6,20	0,0989	0,1	6,03	14,775	66,16	
		3	1005	12,30	6,20	0,0989	0,1	6,03	14,775	66,16	
o4 (6ppm)		1	1001	12,30	6,50	0,0989	0,1	5,73	14,025	63,05	63,80
		2	1001	12,30	6,40	0,0989	0,1	5,83	14,275	64,17	
		3	1001	12,30	6,40	0,0989	0,1	5,83	14,275	64,17	
o5 (8ppm)		1	1004	12,30	6,40	0,0989	0,1	5,83	14,275	63,98	64,36
		2	1004	12,30	6,40	0,0989	0,1	5,83	14,275	63,98	
		3	1004	12,30	6,30	0,0989	0,1	5,93	14,525	65,10	
o1 (0ppm)	b1 (Beras Pecah Kulit)	1	1000	12,30	6,10	0,0989	0,1	6,13	15,025	67,61	67,24
		2	1000	12,30	6,20	0,0989	0,1	6,03	14,775	66,49	
		3	1000	12,30	6,10	0,0989	0,1	6,13	15,025	67,61	
o2 (2ppm)		1	1000	12,30	6,20	0,0989	0,1	6,03	14,775	66,49	66,11
		2	1000	12,30	6,30	0,0989	0,1	5,93	14,525	65,36	
		3	1000	12,30	6,20	0,0989	0,1	6,03	14,775	66,49	
o3 (4ppm)		1	1000	12,30	6,40	0,0989	0,1	5,83	14,275	64,24	64,61
		2	1000	12,30	6,40	0,0989	0,1	5,83	14,275	64,24	
		3	1000	12,30	6,30	0,0989	0,1	5,93	14,525	65,36	
o4 (6ppm)		1	1000	12,30	6,40	0,0989	0,1	5,83	14,275	64,24	64,61
		2	1000	12,30	6,50	0,0989	0,1	5,73	14,025	63,11	
		3	1000	12,30	6,20	0,0989	0,1	6,03	14,775	66,49	
o5 (8ppm)		1	1005	12,30	6,50	0,0989	0,1	5,73	14,025	62,80	63,17
		2	1005	12,30	6,50	0,0989	0,1	5,73	14,025	62,80	
		3	1005	12,30	6,40	0,0989	0,1	5,83	14,275	63,92	

Tabel 81. Volume Hasil Titrasi % Kadar Pati

Ulangan 1 (0 ppm) Gabah			Ulangan 1 (2 ppm) Gabah			Ulangan 1 (4 ppm) Gabah			Ulangan 1 (6 ppm) Gabah			Ulangan 1 (8 ppm) Gabah		
Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)
Vawal	0	7,40	Vawal	0	7,60	Vawal	0	7,10	Vawal	0	7,20	Vawal	0	7,30
Vakhir	6,20	13,60	Vakhir	6,40	14,00	Vakhir	6,30	13,40	Vakhir	6,50	13,70	Vakhir	6,40	13,70
VTAT	6,20	6,20	VTAT	6,40	6,40	VTAT	6,30	6,30	VTAT	6,50	6,50	VTAT	6,40	6,40
Rata-Rata		6,20	Rata-Rata		6,40	Rata-Rata		6,30	Rata-Rata		6,50	Rata-Rata		6,40
Ulangan 2 (0 ppm) Gabah			Ulangan 2 (2 ppm) Gabah			Ulangan 2 (4 ppm) Gabah			Ulangan 2 (6 ppm) Gabah			Ulangan 2 (8 ppm) Gabah		
Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)
Vawal	13,80	20,30	Vawal	14,00	20,50	Vawal	13,60	20,10	Vawal	13,70	20,30	Vawal	13,70	20,30
Vakhir	20,10	26,60	Vakhir	20,30	26,80	Vakhir	19,80	26,30	Vakhir	20,10	26,70	Vakhir	20,10	26,70
VTAT	6,30	6,30	VTAT	6,30	6,30	VTAT	6,20	6,20	VTAT	6,40	6,40	VTAT	6,40	6,40
Rata-Rata		6,30	Rata-Rata		6,30	Rata-Rata		6,20	Rata-Rata		6,40	Rata-Rata		6,40
Ulangan 3 (0 ppm) Gabah			Ulangan 3 (2 ppm) Gabah			Ulangan 3 (4 ppm) Gabah			Ulangan 3 (6 ppm) Gabah			Ulangan 3 (8 ppm) Gabah		
Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)
Vawal	26,70	33,10	Vawal	20,80	27,40	Vawal	20,30	26,70	Vawal	20,60	27,20	Vawal	20,60	27,20
Vakhir	32,90	39,30	Vakhir	27,20	33,80	Vakhir	26,50	32,90	Vakhir	27,00	33,60	Vakhir	26,90	33,50
VTAT	6,20	6,20	VTAT	6,40	6,40	VTAT	6,20	6,20	VTAT	6,40	6,40	VTAT	6,30	6,30
Rata-Rata		6,20	Rata-Rata		6,40	Rata-Rata		6,20	Rata-Rata		6,40	Rata-Rata		6,30
Ulangan 1 (0 ppm) Beras Pecah Kulit			Ulangan 1 (2 ppm) Beras Pecah Kulit			Ulangan 1 (4 ppm) Beras Pecah Kulit			Ulangan 1 (6 ppm) Beras Pecah Kulit			Ulangan 1 (8 ppm) Beras Pecah Kulit		
Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)
Vawal	0	7,40	Vawal	0	7,30	Vawal	0	7,10	Vawal	0	7,10	Vawal	0	7,10
Vakhir	6,10	13,50	Vakhir	6,20	13,50	Vakhir	6,40	13,50	Vakhir	6,40	13,50	Vakhir	6,50	13,60
VTAT	6,10	6,10	VTAT	6,20	6,20	VTAT	6,40	6,40	VTAT	6,40	6,40	VTAT	6,50	6,50
Rata-Rata		6,10	Rata-Rata		6,20	Rata-Rata		6,40	Rata-Rata		6,40	Rata-Rata		6,50
Ulangan 2 (0 ppm) Beras Pecah Kulit			Ulangan 2 (2 ppm) Beras Pecah Kulit			Ulangan 2 (4 ppm) Beras Pecah Kulit			Ulangan 2 (6 ppm) Beras Pecah Kulit			Ulangan 2 (8 ppm) Beras Pecah Kulit		
Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)
Vawal	13,90	20,30	Vawal	13,80	20,30	Vawal	13,80	20,40	Vawal	13,80	20,70	Vawal	13,90	20,60
Vakhir	20,10	26,50	Vakhir	20,10	26,60	Vakhir	20,20	26,80	Vakhir	20,30	27,20	Vakhir	20,40	27,10
VTAT	6,20	6,20	VTAT	6,30	6,30	VTAT	6,40	6,40	VTAT	6,50	6,50	VTAT	6,50	6,50
Rata-Rata		6,20	Rata-Rata		6,30	Rata-Rata		6,40	Rata-Rata		6,50	Rata-Rata		6,50
Ulangan 3 (0 ppm) Beras Pecah Kulit			Ulangan 3 (2 ppm) Beras Pecah Kulit			Ulangan 3 (4 ppm) Beras Pecah Kulit			Ulangan 3 (6 ppm) Beras Pecah Kulit			Ulangan 3 (8 ppm) Beras Pecah Kulit		
Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)	Volume Titrasi 1 (mL)		Volume Titrasi 2 (mL)
Vawal	26,70	33,10	Vawal	26,90	33,30	Vawal	27,10	33,60	Vawal	27,30	33,70	Vawal	27,30	33,90
Vakhir	32,80	39,20	Vakhir	33,10	39,50	Vakhir	33,40	39,90	Vakhir	33,50	39,90	Vakhir	33,70	40,30
VTAT	6,10	6,10	VTAT	6,20	6,20	VTAT	6,30	6,30	VTAT	6,20	6,20	VTAT	6,40	6,40
Rata-Rata		6,10	Rata-Rata		6,20	Rata-Rata		6,30	Rata-Rata		6,20	Rata-Rata		6,40

Lampiran 28. Perhitungan Pembakuan KIO₃

Berat KIO ₃	= 0,043 gram
BE KIO ₃	= 35,667
Vol Na tio sulfat	= 12,30 ml
Normalitas Na tio sulfat	$= \frac{mg}{BE \times V} = \frac{0,043 \times 1000}{35,667 \times 12,30} = \frac{43}{35,667 \times 12,30}$ = 0,0989N

Tabel 82. Luff Schoorl mg Glukosa

mL Tio (0,1 N)	Mg Gula	mL Tio (0,1 N)	Mg Gula	mL Tio (0,1 N)	Mg Gula	mL Tio (0,1 N)	Mg Gula
1	2,4	7	17,2	13	33,0	19	50,0
2	4,8	8	19,8	14	35,7	20	53,0
3	7,2	9	22,4	15	38,5	21	56,0
4	9,7	10	25,0	16	41,3	22	59,1
5	12,2	11	27,6	17	44,2	23	62,2
6	14,7	12	30,3	18	47,1	24	-

Lampiran 29. Contoh perhitungan % Kadar Pati

0 ppm Gabah

$$\begin{aligned}
 V_{\text{tio}} &= \Delta V_{\text{tio}} = V_{\text{blanko}} - V_{\text{sampel}} \times \frac{\text{Normalitas Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}{0,1} \\
 &= (12,30 - 6,20) \times \left(\frac{0,0989}{0,1} \right) \\
 &= (6,1) \times (0,989) \\
 &= \mathbf{6,03 \text{ mL}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Mg glukosa} &= \left[\left(\frac{mg_2 - mg_1}{V_2 - V_1} \right) \times (\Delta V_{\text{tio}} - V_1) \right] + mg_1 \\
 &= \left[\left(\frac{17,2 - 14,7}{7 - 6} \right) \times (6,03 - 6) \right] + 14,7 \\
 &= (2,5 \times 0,03) + 14,7 \\
 &= \mathbf{14,775 \text{ mg}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \% \text{ Kadar Pati} &= \frac{\text{mg Glukosa} \times FP \times 0,9}{\text{mg Sampel}} \times 100 \\
 &= \frac{14,775 \times \frac{500}{10} \times 0,9}{1,001} \times 100 = \mathbf{66,42\%}
 \end{aligned}$$

Tabel 83. Nilai Rata-Rata % Kadar Pati

Konsentrasi Ozon	Kondisi Beras	Ulangan			Total	Rata-rata
		1	2	3		
0ppm	Gabah	66,42	65,30	66,42	198,14	66,05
2ppm		64,17	65,30	64,17	193,64	64,55
4ppm		65,04	66,16	66,16	197,36	65,79
6ppm		63,05	64,17	64,17	191,39	63,80
8ppm		63,98	63,98	65,10	193,06	64,35
Total		322,66	324,91	326,02	973,59	324,53
Rata-rata		64,532	64,982	65,204	194,718	64,91
Konsentrasi ozon	Kondisi Beras	1	2	3	total	rata-rata
0ppm	Beras pecah kulit	67,61	66,49	67,61	201,71	67,24
2ppm		66,49	65,36	66,49	198,34	66,11
4ppm		64,24	64,24	65,36	193,84	64,61
6ppm		64,24	63,11	66,49	193,84	64,61
8ppm		62,80	62,80	63,92	189,52	63,17
Total		325,38	322	329,87	977,25	325,75
Rata-rata		65,076	64,4	65,974	1954,50	65,15
Jumlah		648,04	646,91	655,89	1950,84	650,28

$$\text{Derajat bebas kelompok} = r - 1 = 3 - 1 = 2$$

$$\text{Derajat bebas (o)} = t - 1 = 5 - 1 = 4$$

$$\text{Derajat bebas (b)} = t - 1 = 2 - 1 = 1$$

$$\text{Derajat bebas (ob)} = (a - 1)(b - 1) = (5 - 1)(2 - 1) = 4$$

$$\text{Derajat bebas galat} = (r - 1)(ob - 1) = (3 - 1)(10 - 1) = 18$$

$$\text{Total} = rob - 1 = (5 \times 2 \times 3) - 1 = 29$$

$$\mathbf{FK} = \frac{(\mathbf{Total Jenderal})^2}{\mathbf{r \times O \times B}}$$

$$= \frac{(1950,84)^2}{3 \times 5 \times 2} = \mathbf{126859,22}$$

$$\mathbf{JK Total (JKT)} = \Sigma (\mathbf{Total pengamatan})^2 - \mathbf{FK}$$

$$= ((66,42)^2 + \dots + \dots + \dots + (63,92)^2) - 126859,22$$

$$= \mathbf{54,446}$$

$$\mathbf{JK Kelompok (JKK)} = \frac{(\mathbf{Total Kelompok})^2}{\mathbf{O \times B}} - \mathbf{FK}$$

$$= \frac{(648,04)^2 + (646,91)^2 + (655,89)^2}{5 \times 2} - 126859,22$$

$$= \mathbf{4,785}$$

$$\mathbf{JK (o)} = \frac{(\Sigma \mathbf{O1})^2 + (\Sigma \mathbf{O2})^2 + (\Sigma \mathbf{O3})^2 + (\Sigma \mathbf{O4})^2 + (\Sigma \mathbf{O5})^2}{\mathbf{r \times O}} - \mathbf{FK}$$

$$= \frac{(198,14+201,71)^2 + (193,64+198,34)^2 + (197,36+193,84)^2 + (191,39+193,84)^2 + (193,06+189,52)^2}{3 \times 2} - 126859,22$$

$$= \mathbf{30,009}$$

$$\mathbf{JK (b)} = \frac{(\Sigma \mathbf{B1})^2 + (\Sigma \mathbf{B2})^2}{\mathbf{r \times B}} - \mathbf{FK}$$

$$= \frac{(973,59)^2 + (977,25)^2}{3 \times 5} - 126859,22$$

$$= \mathbf{0,447}$$

$$\mathbf{JK (ob)} = \frac{\Sigma (\mathbf{Total Interaksi Faktor O dan B})^2}{\mathbf{r}} - \mathbf{FK} - \mathbf{JK (o)} - \mathbf{JK (b)}$$

$$= \frac{\Sigma (198,14)^2 + \dots + \dots + \dots + (189,52)^2}{3} - 126859,22 - 30,009 - 0,447$$

$$= \mathbf{10,513}$$

$$\mathbf{JKG} = \mathbf{JKT} - \mathbf{JKK} - \mathbf{JK(o)} - \mathbf{JK (b)} - \mathbf{JK (ob)}$$

$$= 54,446 - 4,785 - 30,009 - 0,447 - 10,513$$

$$= \mathbf{8,693}$$

Tabel 84. Analisis Variansi % Kadar Pati

Sumber Keragaman (SK)	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Total (KT)	Fhitung	Ftabel 5%	Notasi
kelompok	2	4,785	2,3923	4,95	3,55	
faktor (o)	4	30,009	7,5021	15,53	2,93	*
faktor (b)	1	0,447	0,4465	0,92	4,41	tn
interaksi (ob)	4	10,513	2,6283	5,44	2,93	*
galat	18	8,693	0,4829			
total	29	54,446				

Berdasarkan tabel ANAVA diketahui bahwa $F_{hitung} > F_{tabel 5\%}$, maka dapat disimpulkan bahwa faktor (o) konsentrasi ozon, interaksi (ob) berpengaruh nyata terhadap % Kadar Pati. Oleh karena itu, uji lanjut Duncan dilakukan pada interaksi (ob) untuk melihat kombinasi perlakuan terbaik secara menyeluruh. Uji lanjut Duncan tidak dilakukan pada faktor (o) konsentrasi ozon karena pengaruh faktor tunggal tersebut sudah terwakili secara detail di dalam hasil uji interaksi (ob). Sedangkan, faktor (b) kondisi beras tidak berpengaruh nyata terhadap % Kadar Pati sehingga tidak dilakukan uji lanjut.

$$S_y = \sqrt{\frac{KTG}{r}} = \sqrt{\frac{0,4829}{3}} = 0,4$$

Tabel 85. Uji Lanjut Duncan Interaksi (OB) % Kadar Pati

Uji Lanjut Duncan														
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan										Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
-	-	63,17	o5b2 (1)	-										a
2,97	1,19	63,80	o4b1 (2)	0,623	-									a
3,12	1,25	64,35	o5b1 (3)	1,180	0,56	-								a
3,21	1,29	64,55	o2b1 (4)	1,373	0,75	0,19	-							a
3,27	1,31	64,61	o3b2 (5)	1,440	0,82	0,26	0,07	-						a
3,32	1,33	64,61	o4b2 (6)	1,440	0,82	0,26	0,07	0,00	-					a
3,35	1,34	65,79	o3b1 (7)	2,613	1,99	1,43	1,24	1,17	1,17	-				ab
3,37	1,35	66,05	o1b1 (8)	2,873	2,25	1,69	1,50	1,43	1,43	0,26	-			b
3,39	1,36	66,11	o2b2 (9)	2,940	2,32	1,76	1,57	1,50	1,50	0,33	0,07	-		b
3,41	1,37	67,24	o1b2 (10)	4,063	3,44	2,88	2,69	2,62	2,62	1,45	1,19	1,12	-	b

Keterangan:

Tidak Berpengaruh Nyata =

Berpengaruh Nyata =

Lampiran 30. Perhitungan Dwi Arah % Kadar Pati

Tabel 86. Uji Lanjut Duncan % Kadar Pati Taraf o1 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	66,05	o1b1	-		a
2,97	1,192	67,24	o1b2	1,19	-	a

Tabel 87. Uji Lanjut Duncan % Kadar Pati Taraf o2 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	64,55	o2b1	-		a
2,97	1,192	66,11	o2b2	1,57	-	b

Tabel 88. Uji Lanjut Duncan % Kadar Pati Taraf o3 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	64,61	o3b2	-		a
2,97	1,192	65,79	o3b1	1,17	-	a

Tabel 89. Uji Lanjut Duncan % Kadar Pati Taraf o4 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	63,80	o4b1	-		a
2,97	1,192	64,61	o4b2	0,82	-	a

Tabel 90. Uji Lanjut Duncan % Kadar Pati Taraf o5 Terhadap Faktor b

Uji Lanjut Duncan						
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan		Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	
-	-	63,17	o5b2	-		a
2,97	1,192	64,35	o5b1	1,18	-	a

Tabel 91. Uji Lanjut Duncan % Kadar Pati Taraf b1 Terhadap Faktor o

Uji Lanjut Duncan									
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan					Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	3	4	5	
-	-	63,80	o4b1	-					a
2,97	1,192	64,35	o5b1	0,56	-				a
3,12	1,252	64,55	o2b1	0,75	0,19	-			a
3,21	1,288	65,79	o3b1	1,99	1,43	1,24	-		b
3,27	1,312	66,05	o1b1	2,25	1,69	1,50	0,26	-	b

Tabel 92. Uji Lanjut Duncan % Kadar Pati Taraf b2 Terhadap Faktor o

Uji Lanjut Duncan									
SSR 5%	LSR 5%	Rata-rata Perlakuan		Perlakuan					Taraf Nyata 5%
		Nilai	Kode	1	2	3	4	5	
-	-	63,17	o5b2	-					a
2,97	1,192	64,61	o4b2	1,44	-				b
3,12	1,252	64,61	o3b2	1,44	0,00	-			b
3,21	1,288	66,11	o2b2	2,94	1,50	1,5	-		c
3,27	1,312	67,24	o1b2	4,06	2,62	2,62	1,12	-	c

Lampiran 31. Dokumentasi Proses Penelitian



Gambar 14. Proses Ozonisasi Beras Varietas Inpari 32



Gambar 15. Proses Perendaman Sebelum Perkecambahan Gabah dan Beras Pecah

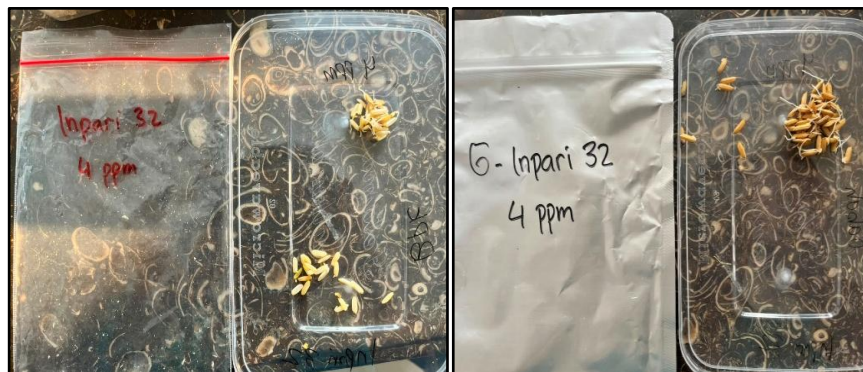
Kulit Varietas Inpari 32



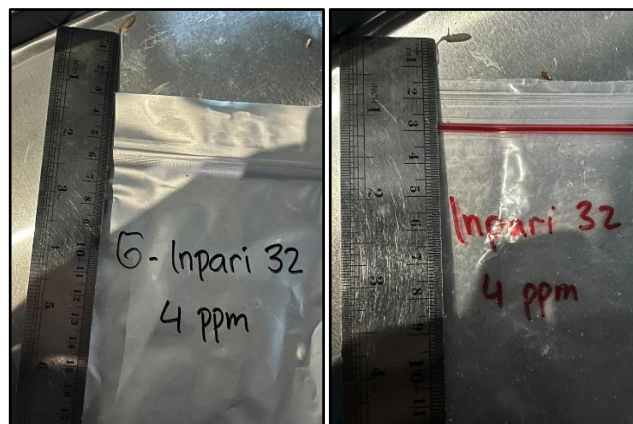
Gambar 16. Proses Perkecambahan



Gambar 17. Hasil Perkecambahan Selama 36 Jam



Gambar 18. Analisis (%) Germinasi



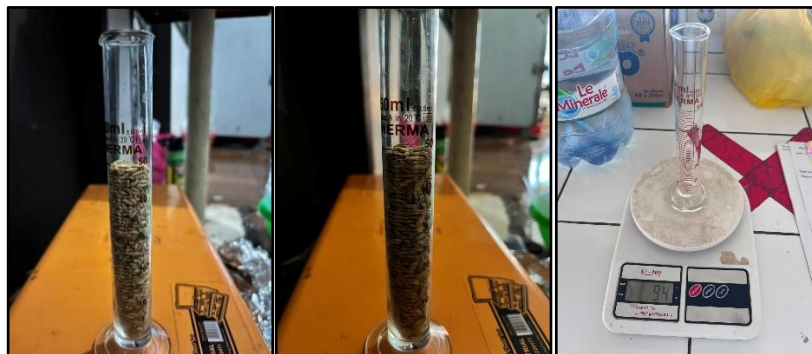
Gambar 19. Panjang Kecambah Beras Varietas Inpari 32



Gambar 20. Proses Pengeringan Menggunakan *Cabinet Dryer*



Gambar 21. Analisis (%) Rendemen



Gambar 22. Analisis Densitas Kamba



Gambar 23. Proses Pengayakan Menggunakan Mesh 60



Gambar 24. Analisis (%) Kadar Air



Gambar 25. Analisis (%) Kadar Pati Metode *Luff Schoorl*