

PENGARUH KONDISI BERAS PUTIH DAN KONSENTRASI OZON TERHADAP KARAKTERISTIK FISIKOKIMIA BERAS GERMINASI

TUGAS AKHIR

Karya tulis sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar

Sarjana Teknik dari Universitas Pasundan

Oleh :

Hani Uswatun Hasanah
223020137



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

ABSTRAK

PENGARUH KONDISI BERAS PUTIH DAN KONSENTRASI OZON TERHADAP KARAKTERISTIK FISIKOKIMIA BERAS GERMINASI

Oleh :

Hani Uswatun Hasanah
NPM : 223020137
(Program Studi Teknologi Pangan)

Tekstur sedang beras Inpari 32 yang kurang disukai konsumen mendorong inovasi germinasi untuk melunakkan tekstur dan meningkatkan GABA, dengan ozonisasi sebagai elisitor abiotik permeabilitas biji. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh kondisi beras (gabah dan beras pecah kulit) serta konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisikokimia beras germinasi Inpari 32.

Rancangan penelitian menggunakan Rancangan Petak Terbagi (*Split Plot Design*) berdasar Rancangan Acak Kelompok (RAK) dengan 3 kali ulangan, dengan kondisi beras sebagai petak utama dan konsentrasi ozon (0, 2, 4, dan 6 ppm) sebagai anak petak. Parameter yang diamati meliputi densitas kamba, % rendemen, % germinasi, derajat putih, profil gelatinisasi pati (*Rapid Visco Analyzer*/RVA), analisis morfologi (SEM), kadar air, kadar pati, aktivitas antioksidan, dan kadar gula pereduksi.

Kondisi beras berpengaruh nyata terhadap seluruh parameter kecuali kadar air, sedangkan konsentrasi ozon dan interaksinya berpengaruh nyata pada % germinasi, derajat putih, kadar pati, aktivitas antioksidan, kadar gula pereduksi, dan profil RVA. Pada gabah, hasil optimal dicapai pada ozon 2 ppm untuk daya kecambah (89,33%), 6 ppm untuk derajat putih (80,93%), dan 4 ppm untuk penurunan kadar pati (61,84%) serta setback viscosity terendah (354,33 cP), disertai kenaikan suhu gelatinisasi dari 51,80°C ke $\pm 83^\circ\text{C}$ akibat pemutusan gugus hidroksil dan ikatan glikosidik pati oleh ozon. Pada beras pecah kulit, aktivitas antioksidan terkuat (IC50 1.315,75 ppm) dan setback viscosity terendah (1.105,00 cP) sama-sama diperoleh pada 6 ppm, sedangkan kadar gula pereduksi tertinggi (71,81%) pada 4 ppm, dengan pola perubahan viskositas non-linear. SEM mengonfirmasi kerusakan granula berupa retakan hingga porositas ekstrem pada gabah 4 ppm dan fragmentasi granula pada beras pecah kulit 6 ppm, sejalan dengan profil RVA masing-masing

Kata Kunci: beras germinasi, ozonisasi, gabah, beras pecah kulit, *split plot*, karakteristik fisikokimia, Inpari 32

ABSTRACT

THE EFFECT OF WHITE RICE CONDITION AND OZONE CONCENTRATION ON THE PHYSICOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF GERMINATED RICE

by :

Hani Uswatun Hasanah

NPM : 223020137

(Departement of Food Technology)

The medium texture of Inpari 32 rice, which is less preferred by consumers, drives the innovation of germination to soften its texture and increase GABA content, utilizing ozonation as an abiotic elicitor for seed permeability. This study aims to evaluate the effects of rice conditions (paddy and dehulled brown rice) and ozone concentrations on the physicochemical characteristics of germinated Inpari 32 rice.

The research employed a Split Plot Design based on a Randomized Complete Block Design (RCBD) with three replications, where the rice condition served as the main plot and the ozone concentrations (0, 2, 4, and 6 ppm) served as the subplots. The parameters observed included bulk density, milling yield percentage, germination percentage, whiteness index, starch gelatinization profile (Rapid Visco Analyzer/RVA), morphological analysis (SEM), moisture content, starch content, antioxidant activity, and reducing sugar content.

Rice condition significantly affected all parameters except moisture content, while ozone concentration and their interaction significantly affected germination percentage, whiteness degree, starch content, antioxidant activity, reducing sugar content, and the RVA profile. In paddy, optimal results were achieved at 2 ppm ozone for germination rate (89.33%), 6 ppm for whiteness degree (80.93%), and 4 ppm for starch content reduction (61.84%) along with the lowest setback viscosity (354.33 cP), accompanied by an increase in gelatinization temperature from 51.80°C to $\pm 83^{\circ}\text{C}$ due to cleavage of hydroxyl groups and glycosidic bonds by ozone. In dehulled rice, the strongest antioxidant activity (IC₅₀ 1,315.75 ppm) and the lowest setback viscosity (1,105.00 cP) were both obtained at 6 ppm, while the highest reducing sugar content (71.81%) was obtained at 4 ppm, with a non-linear pattern of viscosity change. SEM confirmed starch granule damage in the form of cracking and extreme porosity in paddy at 4 ppm and granule fragmentation in dehulled rice at 6 ppm, consistent with the respective RVA profiles.

Keywords: *germinated rice, ozonation, paddy, dehulled brown rice, split plot, physicochemical characteristics, Inpari 32.*

**PENGARUH KONDISI BERAS PUTIH DAN KONSENTRASI
OZON TERHADAP KARAKTERISTIK FISIKOKIMIA BERAS
GERMINASI**

Oleh :

Hani Uswatun Hasanah

223020137

(Program Studi Teknologi Pangan)

**Fakultas Teknik
Universitas Pasundan**

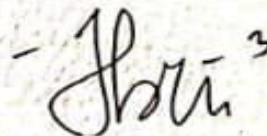
Menyetujui :

Pembimbing I

Pembimbing II



(Prof. Dr. Ir. Xusman Taufik, M.P.)



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

PENGARUH KONDISI BERAS PUTIH DAN KONSENTRASI OZON TERHADAP KARAKTERISTIK FISIKOKIMIA BERAS GERMINASI

Oleh :

Hani Uswatun Hasanah
223020137
(Program Studi Teknologi Pangan)

Fakultas Teknik
Universitas Pasundan

Menyetujui :

Koordinator Pembelajaran, Kemahasiswaan, Agama, dan Budaya
Program Studi Teknologi Pangan
Fakultas Teknik
Universitas Pasundan



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

PEDOMAN PENGGUNAAN TUGAS AKHIR

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

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

Taufik, Y., Hariadi, H., Hasanah, H. U. (2026). Pengaruh Kondisi Bahan dan Konsentrasi Ozon terhadap Karakteristik Fisikokimia Beras Germinasi. Tugas Akhir Program Sarjana, Universitas Pasundan.

dan dalam bahasa Inggris sebagai berikut:

Taufik, Y., Hariadi, H., Hasanah, H. U. (2026). *Effect of material conditions and ozone concentration on the physicochemical characteristics of germinated rice. Bachelor's Thesis*, Universitas Pasundan.

Karya tulis ini dipersembahkan untuk keluargaku tercinta yang senantiasa mendukung lahir dan batin dalam perjalanan studiku, yaitu kedua orang tuaku Dendi dan Giantika, adikku Laits Nur Azizah, nenekku Yetty serta Almh. Dedeh Mulyani, dan khususnya kakekku tercinta Alm. Komar.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah S.W.T karena berkat Rahmat serta karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul “PENGARUH KONDISI BERAS PUTIH DAN KONSENTRASI OZON TERHADAP KARAKTERISTIK FISIKOKIMIA BERAS GERMINASI” dengan sebaik-baiknya.

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

1. Prof. Dr. Ir. Yusman Taufik, M.P. selaku dosen pembimbing utama yang telah membimbing dan memberikan ilmu yang bermanfaat bagi penulis selama penulisan laporan 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 penulisan laporan tugas akhir.
3. Jaka Rukmana, S.T., M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran, masukan, dan ilmu yang bermanfaat bagi penulis untuk laporan tugas akhir ini.
4. Keluarga yang sangat penulis sayangi, kedua orang tua penulis yaitu Dendi dan Giantika, adik penulis yaitu Laits Nur Azizah, nenek penulis yaitu Yeti dan Almh. Dedeh Mulyani, serta kakek penulis yaitu Alm. Komar yang selalu memberikan dukungan kepada penulis, baik berupa doa, materi, dan motivasi selama penulisan laporan tugas akhir.
5. Sahabat penulis yaitu Alena Puri, Aura Falicha, Endah Permatasari, Fitri Khoirinnisa, Jeevanca Nayla, Marselina Sekar, Nazmi Ghita, Nazwa Ismi, Nina Juliyanti, Rania Najmah, serta Salwa Afiyah yang selalu kebersamaan sejak masa kuliah baik dalam hal akademik maupun non akademik serta selalu mendukung penulis selama penulisan laporan tugas akhir penelitian.

6. Teman satu topik penelitian beras yaitu Ismail Ahmad, Nazwa Amelia, Riafany Agustin, serta Zahra Putri yang telah memotivasi dan membantu selama proses penulisan laporan tugas akhir.
7. Sahabat asisten kimia analitik yang selalu mendukung penulis dalam penulisan laporan tugas akhir ini, baik teman seperjuangan yaitu Fakhriza Saukan dan Indah Wulandari serta adik-adik kimia analitik yaitu Vito Febrian Irawan, Rezkha Fauzia, dan M. Hafizh Ramdan yang penulis sayangi serta kakak-kakak kimia analitik yang telah memberi ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis.
8. HMTP FT UNPAS Kabinet Penerjang terutama Bidang 2 dan Departemen Pengabdian Pada Masyarakat (PPM) yang telah menjadi tempat berproses serta pengembangan diri penulis selama masa kuliah sehingga hingga saat ini penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
9. Seluruh teman-teman kepanitiaan CATALYST TP'24 terutama Divisi Acara yang telah memberikan pengalaman yang berharga bagi penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan perkuliahan dan laporan tugas akhir ini.
10. Rekan satu angkatan Prodi Teknologi Pangan UNPAS angkatan 2022 yang telah menjadi bagian dari perjalanan penulis semasa perkuliahan hingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir.
11. Kepada Bu Devry, Teh Elvia Rachmawati, Teh Widia, dan Kang Ilman yang telah membantu, memberikan masukan, saran dan kritik kepada penulis selama penyusunan laporan tugas akhir ini.
12. Seluruh laboran Laboratorium Teknologi Pangan UNPAS yaitu Pak Adang, Pak Sulaeman, serta *staff* tata usaha prodi teknologi pangan yang telah memberikan bantuan selama penulis melakukan penelitian tugas akhir.
13. Kepada seluruh pihak terlibat yang tidak bisa disebutkan oleh penulis satu persatu, yang telah memberikan bantuan, masukan, serta motivasi bagi penulis dalam menyelesaikan penelitian dan laporan tugas akhir ini.

Akhir kata, penulis menyadari masih terdapat kekurangan dalam proposal ini. Oleh karena itu, penulis berharap kritik dan saran yang membangun dari para pembaca

guna perbaikan di masa yang akan datang. Semoga proposal usulan penelitian ini bermanfaat khususnya bagi penulis dan umumnya bagi semua pihak yang membacanya.

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
PEDOMAN PENGGUNAAN TUGAS AKHIR	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xxiii
DAFTAR LAMPIRAN	xxv
Bab I Pendahuluan.....	1
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Identifikasi Masalah	4
I.3 Maksud dan Tujuan Penelitian	4
I.4 Manfaat Penelitian.....	4
I.5 Kerangka Pemikiran	5
I.6 Hipotesis Penelitian	11
I.7 Tempat dan Waktu Penelitian	11
Bab II Tinjauan Pustaka.....	12
II.1 Padi Varietas Inpari 32.....	12
II.2 Gabah.....	16
II.3 Beras Pecah Kulit	19
II.4 Germinasi	23
II.5 Ozonisasi	25
Bab III Metodologi Penelitian.....	32
III.1 Bahan dan Alat	32
III.1.1 Bahan.....	32
III.1.2 Alat	32
III.2 Metode Penelitian	33
III.2.1 Penelitian Utama	33
III.2.2 Rancangan Perlakuan	34
III.2.3 Rancangan Percobaan.....	34
III.2.4 Rancangan Analisis	37
III.2.5 Rancangan Respon	38
III.3 Prosedur Penelitian.....	39
III.4 Jadwal Pelaksanaan Penelitian	43
Bab IV Hasil dan Pembahasan	44
IV.1 Hasil Penelitian.....	44
IV.1.1 Respon Fisik	47

	IV.1.2 Respon Kimia	87
Bab V	Kesimpulan dan Saran.....	110
	V.1 Kesimpulan.....	110
	V.2 Saran	110
	DAFTAR PUSTAKA.....	112
	LAMPIRAN.....	118

DAFTAR TABEL

Tabel II.1.	Analisis Proksimat Butiran Padi (per 100g) (Estimasi nilai rata-rata pada kadar air 14%)	13
Tabel II.2.	Sifat-Sifat Ozon	26
Tabel III.1	Model Eksperimental Interaksi Pola Faktorial (2x4) dalam Rancangan Petak Terbagi (RPT) dengan 3 kali Ulangan	34
Tabel III.2.	Layout Percobaan dalam Rancangan Petak Terbagi (RPT).....	36
Tabel III.3.	Daftar Analisis Sidik Ragam Rancangan Petak Terbagi	37
Tabel III.4.	Jadwal Pelaksanaan Penelitian	43
Tabel IV.1	Pengaruh Kondisi Bahan (faktor A) terhadap Nilai Densitas Kamba Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32	49
Tabel IV.2.	Pengaruh Kondisi Bahan (Faktor A) terhadap Nilai Rata-Rata (%) Rendemen Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32	52
Tabel IV.3.	Dua Arah untuk Analisis (%) Germinasi Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32	57
Tabel IV.4.	Dua Arah untuk Analisis Derajat Putih Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32.....	62
Tabel IV.5.	Dua Arah untuk Analisis <i>Rapid Visco Analyser</i> (RVA) <i>Peak</i> 1	69
Tabel IV.6.	Dua Arah untuk Analisis <i>Rapid Visco Analyser</i> (RVA) <i>Through</i> 1	71
Tabel IV.7.	Dua Arah untuk Analisis <i>Rapid Visco Analyser</i> (RVA) <i>Breakdown Viscosity</i>	73
Tabel IV.8.	Dua Arah untuk Analisis <i>Rapid Visco Analyser</i> (RVA) <i>Final Viscosity</i>	74
Tabel IV.9.	Dua Arah untuk Analisis <i>Rapid Visco Analyser</i> (RVA) <i>Setback</i>	76
Tabel IV.10.	Dua Arah untuk Analisis <i>Rapid Visco Analyser</i> (RVA) <i>Peak Time</i>	78

Tabel IV.11.	Dua Arah untuk Analisis <i>Rapid Visco Analyser (RVA) Pasting Temp</i>	80
Tabel IV.12.	Pengaruh Kondisi Bahan dan Konsentrasi Ozon terhadap Nilai Rata-rata Kadar Air Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32	88
Tabel IV.13.	Dua Arah untuk Analisis Kadar Pati Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32.....	93
Tabel IV.14.	Dua Arah untuk Aktivitas Antioksidan Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32.....	98
Tabel IV.15.	Klasifikasi Aktivitas Antioksidan Berdasarkan Nilai IC ₅₀	100
Tabel IV.16.	Dua Arah untuk Analisis Kadar Gula Pereduksi Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32	104
Tabel 1.	Perhitungan Kebutuhan Sampel	125
Tabel 2.	Kebutuhan Bahan Penelitian	125
Tabel 3.	Kebutuhan Analisis Penelitian.....	126
Tabel 4.	Data Perhitungan Nilai Densitas Kamba Beras Putih Germinasi	127
Tabel 5.	Data Hasil Analisis Respon Fisik Densitas Kamba.....	128
Tabel 6.	Analisis Variasi (ANOVA) Analisis Respon Fisik Densitas Kamba Beras Putih Germinasi	130
Tabel 7.	Uji Lanjut LSD Faktor Kondisi Beras (A) terhadap Nilai Densitas Kamba Beras Putih Germinasi.....	131
Tabel 8.	Pengaruh Kondisi Bahan (faktor A) terhadap Nilai Densitas Kamba Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32	131
Tabel 9.	Data Perhitungan % Rendemen Beras Putih Germinasi.....	133
Tabel 10.	Data Hasil Analisis Respon Fisik % Rendemen Beras Putih Germinasi	134
Tabel 11.	Analisis Variasi (ANOVA) Analisis Respon Fisik % Rendemen Beras Putih Germinasi.....	136
Tabel 12.	Uji Lanjut LSD Faktor Kondisi Beras (A) terhadap Nilai Densitas Kamba Beras Putih Germinasi.....	137

Tabel 13.	Pengaruh Kondisi Bahan (faktor A) terhadap % Rendemen Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32.....	137
Tabel 14.	Data Perhitungan % Germinasi Beras Putih Germinasi	139
Tabel 15.	Data Hasil Analisis Respon Fisik % Germinasi Beras Putih Germinasi	140
Tabel 16.	Analisis Variasi (ANOVA) Analisis Respon Fisik % Germinasi Beras Putih Germinasi.....	142
Tabel 17.	Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Uji % Germinasi Beras Putih Germinasi	143
Tabel 18.	Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Uji % Germinasi Beras Putih Germinasi	144
Tabel 19.	Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Uji % Germinasi Beras Putih Germinasi	145
Tabel 20.	Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Uji % Germinasi Beras Putih Germinasi	145
Tabel 21.	Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Uji % Germinasi Beras Putih Germinasi	145
Tabel 22.	Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Uji % Germinasi Beras Putih Germinasi	145
Tabel 23.	Dua Arah untuk Analisis (%) Germinasi Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32	146
Tabel 24.	Data Perhitungan Nilai Derajat Putih Beras Putih Germinasi..	151
Tabel 25.	Data Hasil Analisis Respon Fisik Nilai Derajat Putih Beras Putih Germinasi	152
Tabel 26.	Analisis Variasi (ANOVA) Analisis Respon Fisik Nilai Derajat Putih Germinasi	154
Tabel 27.	Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Nilai Derajat Putih Beras Putih Germinasi	155
Tabel 28.	Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Nilai Derajat Putih Beras Putih Germinasi	156

Tabel 29.	Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Nilai Derajat Putih Beras Putih Germinasi	157
Tabel 30.	Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Nilai Derajat Putih Beras Putih Germinasi	157
Tabel 31.	Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Nilai Derajat Putih Beras Putih Germinasi	157
Tabel 32.	Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Nilai Derajat Putih Beras Putih Germinasi	157
Tabel 33.	Dua Arah untuk Analisis Derajat Putih Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32.....	158
Tabel 34.	Data Hasil Analisis Profil Gelatinisasi <i>Rapid Visco Analyzer</i> ..	159
Tabel 35.	Data Hasil Analisis Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Peak Viscosity</i>	161
Tabel 36.	Analisis Variasi (ANOVA) Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Peak Viscosity</i>	164
Tabel 37.	Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Peak Viscosity</i>	165
Tabel 38.	Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Peak Viscosity</i>	165
Tabel 39.	Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Peak Viscosity</i> Beras Putih Germinasi.....	166
Tabel 40.	Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Peak Viscosity</i> Beras Putih Germinasi.....	166
Tabel 41.	Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Peak Viscosity</i> Beras Putih Germinasi.....	167
Tabel 42.	Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Peak Viscosity</i> Beras Putih Germinasi.....	167
Tabel 43.	Dua Arah untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Peak Viscosity</i> Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32	167
Tabel 44.	Data Hasil Analisis Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Through Viscosity</i>	169

Tabel 45.	Analisis Variasi (ANAVA) Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Through Viscosity</i>	170
Tabel 46.	Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Through Viscosity</i>	171
Tabel 47.	Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Through Viscosity</i>	171
Tabel 48.	Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Through Viscosity</i> Beras Putih Germinasi.	172
Tabel 49.	Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Trough Viscosity</i> Beras Putih Germinasi ...	172
Tabel 50.	Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Through Viscosity</i> Beras Putih Germinasi.	172
Tabel 51.	Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Trough Viscosity</i> Beras Putih Germinasi ...	172
Tabel 52.	Dua Arah untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Peak Viscosity</i> Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32	173
Tabel 53.	Data Hasil Analisis Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Breakdown</i>	174
Tabel 54.	Analisis Variasi (ANAVA) Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Breakdown</i>	175
Tabel 55.	Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Breakdown</i>	176
Tabel 56.	Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Breakdown</i>	176
Tabel 57.	Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Breakdown</i> Beras Putih Germinasi.....	177
Tabel 58.	Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Breakdown</i> Beras Putih Germinasi.....	177
Tabel 59.	Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Breakdown</i> Beras Putih Germinasi.....	177

Tabel 60.	Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Breakdown</i> Beras Putih Germinasi.....	177
Tabel 61.	Dua Arah untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Breakdown</i> Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32.....	178
Tabel 62.	Data Hasil Analisis Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Final Visc</i>	179
Tabel 63.	Analisis Variasi (ANOVA) Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Final Visc</i>	180
Tabel 64.	Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Final Visc</i>	181
Tabel 65.	Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Final Visc</i>	181
Tabel 66.	Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Final Visc</i> Beras Putih Germinasi	182
Tabel 67.	Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Final Visc</i> Beras Putih Germinasi	182
Tabel 68.	Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Final Visc</i> Beras Putih Germinasi	182
Tabel 69.	Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Final Visc</i> Beras Putih Germinasi	182
Tabel 70.	Dua Arah untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Final Visc</i> Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32.....	183
Tabel 71.	Data Hasil Analisis Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Setback</i>	184
Tabel 72.	Analisis Variasi (ANOVA) Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Setback</i>	185
Tabel 73.	Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Setback</i>	186
Tabel 74.	Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Setback</i>	186

Tabel 75.	Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Setback</i> Beras Putih Germinasi	187
Tabel 76.	Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Setback</i> Beras Putih Germinasi	187
Tabel 77.	Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Setback</i> Beras Putih Germinasi	187
Tabel 78.	Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Setback</i> Beras Putih Germinasi	187
Tabel 79.	Dua Arah untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Setback</i> Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32.....	188
Tabel 80.	Data Hasil Analisis Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Peak Time</i>	189
Tabel 81.	Analisis Variasi (ANOVA) Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Peak Time</i>	190
Tabel 82.	Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Peak Time</i>	191
Tabel 83.	Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Peak Time</i>	191
Tabel 84.	Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Peak Time</i> Beras Putih Germinasi.....	192
Tabel 85.	Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Peak Time</i> Beras Putih Germinasi.....	192
Tabel 86.	Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Peak Time</i> Beras Putih Germinasi.....	192
Tabel 87.	Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Peak Time</i> Beras Putih Germinasi.....	192
Tabel 88.	Dua Arah untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Peak Time</i> Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32.....	194
Tabel 89.	Data Hasil Analisis Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Pasting Temp</i>	195

Tabel 90.	Analisis Variasi (ANAVA) Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Pasting Temp</i>	196
Tabel 91.	Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Pasting Temp</i>	197
Tabel 92.	Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Paasting Temp</i>	197
Tabel 93.	Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Pasting Temp</i> Beras Putih Germinasi	197
Tabel 94.	Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Pasting Temp</i> Beras Putih Germinasi	198
Tabel 95.	Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Pasting Temp</i> Beras Putih Germinasi	198
Tabel 96.	Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Pasting Temp</i> Beras Putih Germinasi	198
Tabel 97.	Dua Arah untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) <i>Pasting Temp</i> Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32	199
Tabel 98.	Data Perhitungan Kadar Air Beras Putih Germinasi	200
Tabel 99.	Data Hasil Analisis Respon Kimia Kadar Air Beras Putih Germinasi	201
Tabel 100.	Analisis Variasi (ANAVA) Analisis Respon Kimia Kadar Air Beras Putih Germinasi	203
Tabel 101.	Data Perhitungan Kadar Pati Beras Putih Germinasi	205
Tabel 102.	Data Hasil Analisis Respon Kimia Kadar Pati Beras Putih Germinasi	207
Tabel 103.	Analisis Variasi (ANAVA) Analisis Respon Kimia Kadar Pati Beras Putih Germinasi	209
Tabel 104.	Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Kadar Pati Beras Putih Germinasi	210
Tabel 105.	Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Kadar Pati Beras Putih Germinasi	210

Tabel 106.	Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Kadar Pati Beras Putih Germinasi.....	211
Tabel 107.	Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Kadar Pati Beras Putih Germinasi.....	211
Tabel 108.	Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Kadar Pati Beras Putih Germinasi.....	212
Tabel 109.	Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Kadar Pati Beras Putih Germinasi.....	212
Tabel 110.	Dua Arah untuk Analisis Kadar Pati Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32.....	212
Tabel 111.	Data Perhitungan Aktivitas Antioksidan (% Inhibisi) Beras Putih Germinasi (a1b1).....	214
Tabel 112.	Data Perhitungan Aktivitas Antioksidan (% Inhibisi) Beras Putih Germinasi (a1b2).....	216
Tabel 113.	Data Perhitungan Aktivitas Antioksidan (% Inhibisi) Beras Putih Germinasi (a1b3).....	218
Tabel 114.	Data Perhitungan Aktivitas Antioksidan (% Inhibisi) Beras Putih Germinasi (a1b4).....	220
Tabel 115.	Data Perhitungan Aktivitas Antioksidan (% Inhibisi) Beras Putih Germinasi (a2b1).....	222
Tabel 116.	Data Perhitungan Aktivitas Antioksidan (% Inhibisi) Beras Putih Germinasi (a2b2).....	224
Tabel 117.	Data Perhitungan Aktivitas Antioksidan (% Inhibisi) Beras Putih Germinasi (a2b3).....	226
Tabel 118.	Data Perhitungan Aktivitas Antioksidan (% Inhibisi) Beras Putih Germinasi (a2b4).....	228
Tabel 119.	Data Hasil Analisis Respon Kimia Aktivitas Antioksidan Beras Putih Germinasi	231
Tabel 120.	Analisis Variasi (ANOVA) Analisis Respon Kimia Aktivitas Antioksidan Beras Putih Germinasi	234

Tabel 121.	Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Aktivitas Antioksidan Beras Putih Germinasi	235
Tabel 122.	Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Aktivitas Antioksidan Beras Putih Germinasi	236
Tabel 123.	Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Aktivitas Antioksidan Beras Putih Germinasi	237
Tabel 124.	Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Aktivitas Antioksidan Beras Putih Germinasi	237
Tabel 125.	Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Aktivitas Antioksidan Beras Putih Germinasi	237
Tabel 126.	Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Aktivitas Antioksidan Beras Putih Germinasi	238
Tabel 127.	Dua Arah untuk Analisis Aktivitas Antioksidan Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32	238
Tabel 128.	Data Perhitungan Kadar Gula Pereduksi Beras Putih Germinasi	240
Tabel 129.	Data Hasil Analisis Respon Kimia Kadar Gula Pereduksi Beras Putih Germinasi.....	243
Tabel 130.	Analisis Variasi (ANAVA) Analisis Respon Kimia Kadar Gula Pereduksi Beras Putih Germinasi	245
Tabel 131.	Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Kadar Gula Pereduksi Beras Putih Germinasi	246
Tabel 132.	Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Kadar Gula Pereduksi Beras Putih Germinasi	246
Tabel 133.	Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Kadar Gula Pereduksi Beras Putih Germinasi	247
Tabel 134.	Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Kadar Gula Pereduksi Beras Putih Germinasi	247
Tabel 135.	Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Kadar Gula Pereduksi Beras Putih Germinasi	248

Tabel 136.	Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Kadar Gula Pereduksi Beras Putih Germinasi	248
Tabel 137.	Dua Arah untuk Analisis Kadar Gula Pereduksi Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32	248

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1. <i>Oryza sativa</i> .L.....	12
Gambar II.2. Anatomi Struktur Gabah.....	16
Gambar II.3. Lapisan Aleuron Pada Beras.....	20
Gambar II.4. Bagian Endosperma Beras.....	22
Gambar II.5. Pembentukan gas ozon melalui proses tumbukan	28
Gambar III.1 Diagram Alir Prosedur Penelitian 1	41
Gambar III.2 Diagram Alir Prosedur Penelitian 2.....	42
Gambar IV.1 Gabah (a1) dan Beras Pecah Kulit (a2) Hasil Ozonisasi	46
Gambar IV.2. Gabah (a1) dan Beras Pecah Kulit (a2) Hasil Germinasi	47
Gambar IV.3. Grafik Interaksi Kondisi Beras dan Konsentrasi Ozon terhadap Nilai Densitas Kamba Beras Putih Germinasi.....	50
Gambar IV.4. Grafik Interaksi Kondisi Beras dan Konsentrasi Ozon terhadap Nilai (%) Rendemen Beras Putih Germinasi	53
Gambar IV.5. Grafik Interaksi Kondisi Beras dan Konsentrasi Ozon terhadap (%) Germinasi Beras Putih Germinasi	59
Gambar IV.6. Grafik Interaksi Kondisi Beras dan Konsentrasi Ozon terhadap Nilai Derajat Putih Beras Putih Germinasi	64
Gambar IV.7. Grafik Profil Viskositas RVA Gabah (a1)	67
Gambar IV.8. Grafik Profil Viskositas RVA Beras Pecah Kulit (a2)	68
Gambar IV.9. Morfologi SEM Gabah (a1) pada Konsentrasi Ozon 0, 2, 4, dan 6 ppm (perbesaran 1000x)	83
Gambar IV.10. Morfologi SEM Beras Pecah Kulit (a2) pada Konsentrasi Ozon 0, 2, 4, dan 6 ppm (perbesaran 1000x).....	85
Gambar IV.11. Grafik Interaksi Kondisi Beras dan Konsentrasi Ozon terhadap Nilai Kadar Air Beras Putih Germinasi	90
Gambar IV.12. Grafik Interaksi Kondisi Beras dan Konsentrasi Ozon terhadap Nilai Kadar Pati Beras Putih Germinasi	96

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A	Perhitungan Rancangan Percobaan Penelitian	118
Lampiran B.	Analisis Densitas Kamba (Banuera et al., 2020).....	118
Lampiran C.	Analisis (%) Rendemen (Yuriyah et al., 2024).....	119
Lampiran D.	Analisis (%) Germinasi (Hasanuzzaman, n.d.)	119
Lampiran E.	Analisis Derajat Putih Metode Kolorimetri (Yasmin et al., 2023).....	120
Lampiran F.	Analisis Pasting Profile RVA (Rapid Visco Analyzer) (Hebishy et al., 2024)	120
Lampiran G.	Analisis Morfologi Permukaan Metode <i>Scanning Electron.....</i> <i>Microscope</i> (SEM) (Rohmah et al., 2022)	121
Lampiran H.	Analisis Kadar Air Metode Thermogravimetry (AOAC, 2006)	121
Lampiran I.	Analisis Kadar Pati dan Kadar Gula Pereduksi Metode <i>Luff</i> <i>Schoorl</i> (Ifmaily, 2018)	122
Lampiran J.	Uji Aktivitas Antioksidan Dengan Metode DPPH (Pratiwi et al., 2010).....	124
Lampiran K.	Perhitungan Kebutuhan Sampel	125
Lampiran L.	Kebutuhan Bahan Penelitian	125
Lampiran M.	Kebutuhan Analisis Penelitian.....	126
Lampiran N.	Data Hasil Analisis Respon Fisik Densitas Kamba.....	127
Lampiran O.	Data Hasil Analisis Respon Fisik % Rendemen.....	133
Lampiran P.	Data Hasil Analisis Respon Fisik % Germinasi	139
Lampiran Q.	Data Hasil Analisis Respon Fisik Derajat Putih	147
Lampiran R.	Data Hasil Analisis Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA).....	159
Lampiran S.	Data Hasil Analisis Respon Kimia Kadar Air	200
Lampiran T.	Data Hasil Analisis Respon Kimia Kadar Pati	205
Lampiran U.	Data Hasil Analisis Respon Kimia Aktivitas Antioksidan	214

Lampiran V. Data Hasil Analisis Respon Kimia Kadar Gula Pereduksi	240
Lampiran W. Dokumentasi Pembuatan Produk	250
Lampiran X. Dokumentasi Analisis Produk	252

Bab I Pendahuluan

Bab ini akan menguraikan mengenai: (I.1) Latar Belakang, (I.2) Identifikasi Masalah, (I.3) Maksud dan Tujuan Penelitian, (I.4) Manfaat Penelitian, (I.5) Kerangka Penelitian, (I.6) Hipotesis Penelitian, (I.7) Tempat dan Waktu Penelitian.

I.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara agraris dengan tingkat konsumsi beras yang cukup tinggi. Sebagai makanan pokok lebih dari 28,4 juta penduduk serta produksi per tahunnya dapat mencapai 53 juta ton, beras memegang peran strategis dalam ketahanan pangan nasional. (Pertanian, 2025 ; BPS, 2025). Salah satu varietas unggul yang banyak ditanam yaitu Inpari 32. varietas ini dikenal memiliki potensi hasil yang tinggi, namun memiliki tekstur nasi yang tergolong ke dalam kategori sedang yang berbeda dengan beras Inpari 31 yang memiliki tekstur pulen (Norvyani, 2023).

Karakteristik nasi tersebut seringkali menjadi kendala bagi konsumen yang lebih menyukai nasi yang lebih pulen, sehingga diperlukan inovasi pengolahan untuk meningkatkan palatabilitas dan nilai jualnya. Proses germinasi menjadi salah satu solusi strategis untuk melunakkan tekstur sekaligus meningkatkan kandungan asam γ -aminobutirat (GABA) serta dapat mengaktifkan enzim hidrolitik seperti α -amilase, β -amilase, dan protease yang dapat menghidrolisis pati menjadi gula sederhana, serta protease yang mendegradasi protein cadangan menjadi asam amino, sehingga terjadi peningkatan oligosakarida, gula dan asam amino sebagai nilai tambah pangan fungsional (Munarko et al., 2022).

Keunggulan beras germinasi dibandingkan dengan beras tanpa perlakuan germinasi telah dibuktikan secara ilmiah melalui berbagai penelitian. Kayahara et al, dalam Moongngarm & Saetung (2010), menunjukkan bahwa kandungan GABA pada beras germinasi dapat mencapai sekitar 10 kali lebih tinggi dibandingkan beras giling tanpa germinasi, sementara kandungan serat pangan, vitamin E, niasin, dan

lisin meningkat hampir 4 kali lipat, serta tiamin, piridoksin, dan magnesium meningkat sekitar 3 kali lipat. Peningkatan serupa juga dikonfirmasi oleh Jabeen et al., (2022) yang menunjukkan bahwa beras pecah kulit yang digerminasi memiliki kandungan senyawa fenolik total, GABA, γ -oryzanol, dan kapasitas antioksidan yang secara konsisten lebih tinggi dibandingkan beras pecah kulit tanpa germinasi, disertai penurunan kandungan asam fitat yang bersifat antinutrisi. Dengan demikian, germinasi tidak hanya memperbaiki tekstur nasi, tetapi juga secara nyata meningkatkan nilai gizi dan fungsional beras dibandingkan dengan beras yang tidak digerminasi.

Dalam penelitian ini, kondisi bahan baku awal menjadi variabel krusial dengan membandingkan gabah dan beras pecah kulit (BPK). Struktur gabah yang memiliki sekam kaya akan silika dan lignin yang berfungsi sebagai penghambat alami yang sangat kuat terhadap penetrasi zat dari luar. Sebaliknya pada kondisi beras pecah kulit, lapisan sekam telah dihilangkan sehingga lapisan aleuron langsung terpapar. Perbedaan integritas struktural ini diprediksi akan sangat mempengaruhi efektivitas penyerapan air dan oksigen yang dibutuhkan untuk memulai proses germinasi. Beras pecah kulit menawarkan kemudahan akses imbibisi, namun lebih rentan terhadap kerusakan lemak, sedangkan gabah memberikan perlindungan mekanis bagi embrio namun memiliki hambatan penetrasi yang lebih besar (Bao, 2019).

Untuk mengatasi hambatan tersebut, diperlukan teknologi yang mampu memodifikasi permeabilitas lapisan pelindung biji tanpa merusak embrionya. Teknologi ozonisasi dipilih sebagai solusi strategis karena kemampuannya dalam mengoksidasi komponen penyusun dinding sel yang keras. Ozon (O_3) merupakan salah satu agen oksidator kuat yang banyak dimanfaatkan dalam bidang pascapanen dan teknologi pangan. Ozon memiliki potensial oksidasi sebesar 2,07 V, lebih tinggi dibandingkan beberapa oksidator konvensional, serta tidak meninggalkan residu karena secara alami terurai menjadi oksigen (James et al., 200 ;Kaur et al., 2023). Pada kondisi sampel lembab, paparan ozon dapat berinteraksi dengan komponen

permukaan biji dan memodifikasi karakteristik fisik lapisan luar secara ringan, sehingga berpotensi meningkatkan permeabilitas terhadap air dan oksigen.

Selain efek fisik pada permukaan biji, paparan ozon dalam konsentrasi terkendali juga dilaporkan mampu memicu respons fisiologis sebagai bentuk stres oksidatif ringan. Respons ini dapat berperan sebagai pemicu aktivasi metabolisme awal perkecambahan, termasuk regulasi hormon seperti penurunan kadar asam absisat (ABA), yaitu hormon yang bertanggungjawab menjaga dormansi, sekaligus merangsang peningkatan hormon pertumbuhan seperti etilen (Kaur et al., 2023). Mekanisme ganda ini yaitu pembukaan hambatan fisik dan stimulasi hormon akan mempercepat aktivasi enzim-enzim hidrolitik, sehingga proses germinasi dan akumulasi GABA pada varietas Inpari 32 dapat berlangsung lebih optimal.

Meskipun berbagai penelitian telah melaporkan bahwa germinasi mampu meningkatkan kandungan senyawa bioaktif dan memperbaiki sifat fungsional beras, sebagian besar studi masih berfokus pada optimasi waktu dan suhu germinasi secara konvensional. Kajian mengenai integritas perlakuan ozon sebagai teknologi pendukung germinasi masih relatif terbatas, khususnya dalam mengevaluasi interaksinya dengan kondisi fisik awal bahan seperti gabah dan beras pecah kulit. Perbedaan struktur pelindung biji pada kedua kondisi tersebut berpotensi menghasilkan respons fisiologis dan perubahan fisikokimia yang berbeda ketika dipaparkan ozon.

Hingga saat ini, informasi ilmiah mengenai pengaruh kombinasi kondisi awal beras dan variasi konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisikokimia beras germinasi, terutama pada varietas Inpari 32 masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh kondisi beras dan konsentrasi ozon terhadap karakteristik kimia dan fisik beras germinasi sebagai dasar pengembangan teknologi produksi yang lebih efektif dan aplikatif.

I.2 Identifikasi Masalah

1. Bagaimana pengaruh kondisi beras putih (gabah dan beras pecah kulit) terhadap karakteristik fisikokimia pada beras germinasi?
2. Bagaimana pengaruh konsentrasi ozon (0, 2, 4, dan 6 ppm) terhadap karakteristik fisikokimia pada beras germinasi?
3. Bagaimana interaksi antara kondisi beras putih dan konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisikokimia pada beras germinasi?

I.3 Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dari penelitian ini adalah untuk mempelajari pengaruh kondisi beras putih dan konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisikokimia beras germinasi varietas Inpari 32.

Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui pengaruh kondisi beras putih dan konsentrasi ozon terhadap karakteristik fisikokimia beras germinasi varietas Inpari 32.

I.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menambah wawasan dalam penerapan teknologi ozonisasi serta pengolahan pangan fungsional berbasis beras.
2. Memberikan data ilmiah mengenai kombinasi kondisi beras dan konsentrasi ozon yang berpotensi menghasilkan karakteristik fisikokimia beras germinasi terbaik pada masing-masing parameter mutu.
3. Menyediakan alternatif pangan olahan berbasis beras (beras germinasi) dengan tekstur lebih lunak dibandingkan beras non-germinasi.
4. Berpotensi meningkatkan nilai tambah gabah/beras lokal bagi petani dan UMKM.

I.5 Kerangka Pemikiran

Padi (*Oryza sativa L.*) varietas Inpari 32 merupakan salah satu komoditas yang banyak dibudidayakan di Indonesia. Secara morfologi, biji padi tersusun atas beberapa bagian utama, antara lain sekam, perikarp, lapisan aleuron, endosperma dan embrio. Perbedaan utama antara gabah serta beras pecah kulit terletak pada keberadaan sekam. Gabah masih memiliki sekam yang tersusun atas jaringan ligninselulosa dan memiliki kandungan silika yang relatif tinggi, sedangkan beras pecah kulit telah mengalami proses penghilangan sekam sehingga lapisan terluarnya adalah perikarp dan aleuron (Bao, 2019).

Keberadaan sekam pada gabah berfungsi sebagai *barrier* fisik yang memberikan resistensi terhadap proses penyerapan air. Penelitian Thakur & Gupta (2006) menunjukkan bahwa koefisien difusi air pada beras pecah kulit lebih tinggi dibandingkan dengan gabah, serta sekam secara signifikan dapat menghambat proses imbibisi pada biji utuh. Perbedaan karakteristik fisik ini berdampak langsung terhadap dinamika imbibisi sebagai tahap awal dari perkecambahan.

Selain itu, karakteristik fisik tersebut juga menentukan efektivitas interaksi ozon dengan target molekul di dalam biji, yang dipengaruhi oleh laju penetrasi dan difusivitas ozon sangat bergantung pada ketebalan tumpukan, dimana penetrasi yang optimal diperlukan untuk menjamin oksidasi komponen fisikokimia yang seragam (Kaur et al., 2023). Modifikasi struktur pada lapisan pelindung biji akibat paparan ozon ini akan memengaruhi dinamika masuknya air ke dalam benih.

Proses perkecambahan tersebut diawali oleh proses imbibisi, yaitu masuknya air ke dalam jaringan benih karena perbedaan potensial air. Peningkatan kadar air mengaktifkan kembali metabolisme sel dan memicu aktivitas embrio yang kemudian menghasilkan hormon giberelin (GA). Hormon ini menginduksi lapisan aleuron untuk mensintesis enzim hidrolitik seperti α -amilase dan protease. α -amilase menghidrolisis pati di endosperma menjadi gula sederhana sebagai sumber energi bagi pertumbuhan embrio, sedangkan protease mendegradasi protein

cadangan menjadi asam amino. Dengan demikian, kecepatan imbibisi akan menentukan kecepatan aktivasi embrio serta intensitas mobilisasi cadangan makanan selama perkecambahan (Bewley, 1997).

Dalam beberapa tahun terakhir, teknologi non-termal dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi tahap pra-perkecambahan tanpa menimbulkan kerusakan termal pada bahan. (Yodpitak et al., 2019) melaporkan bahwa plasma dingin mampu mempercepat perkecambahan dan meningkatkan kandungan senyawa bioaktif beras pecah kulit. (Xia Q, et al, 2020) menunjukkan bahwa *High Intensity Ultrasound* (HIU) sebelum perendaman meningkatkan bioavailabilitas asam amino dan mineral pada beras. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa stimulasi fisik terkontrol dapat memodulasi struktur jaringan dan metabolisme awal benih sehingga meningkatkan efisiensi germinasi.

Salah satu pendekatan non-termal yang potensial adalah ozon. Menurut Sachadyn-Król & Agriopoulou, (2020), ozon merupakan oksidator kuat yang dapat bereaksi langsung dengan komponen organik atau terurai membentuk *reactive oxygen species* (ROS). Dalam konsentrasi terkendali, ROS berperan sebagai molekul sinyal (*elicitor*) yang mengaktivasi sistem pertahanan tanaman, termasuk enzim antioksidan dan enzim biosintesis fenolik. Aktivasi ini berkontribusi terhadap peningkatan senyawa fenolik dan kapasitas antioksidan.

Kandungan fenolik akibat perlakuan ozon sangat bergantung pada konsentrasi dan durasi paparan, sehingga hasilnya bisa bervariasi antara peningkatan, penurunan atau bahkan tidak memberikan pengaruh sama sekali. Dosis yang terlalu tinggi justru berisiko memicu oksidasi berlebihan. Pada komoditas seperti beras pecah kulit dan gabah, peningkatan fenolik sangat mungkin terjadi karena adanya interaksi ozon dengan permukaan biji yang masih lembab pasca-perendaman. Keberadaan sisa air ini memudahkan ozon untuk mendegradasi sebagian matriks dinding sel, yang kemudian melepaskan senyawa fenolik terikat. Disaat yang sama, ozon bekerja sebagai elisitor stres abiotik yang merangsang aktivitas enzim

Phenylalanine Ammonia-Lyase (PAL) untuk memproduksi fenolik sebagai bentuk pertahanan seluler (Sachadyn-Król & Agriopoulou, 2020).

Untuk mengontrol agar reaksi tersebut tetap memberikan stimulasi tanpa merusak jaringan, pengaturan dosis menjadi faktor penentu. Oleh karena itu, sebagaimana dijelaskan oleh Kaur et al., (2023) efektivitas ozon ditentukan oleh nilai CT (*Concentration x Time*). Optimasi konsentrasi dan waktu kontak menjadi kunci untuk memperoleh efek stimulasi tanpa menimbulkan kerusakan oksidatif. Selain variabel CT, stabilitas gas ozon di sela-sela biji juga dipengaruhi oleh kondisi aliran udara, dimana aplikasi pada udara diam (*still air*) terbukti lebih efektif dalam menjaga konsentrasi gas dibandingkan aliran turbulen, sehingga memungkinkan modifikasi struktur makromolekul yang lebih terkendali (Kaur et al., 2023).

Dalam sistem germinasi beras, proses perkecambahan secara fisiologis sudah merupakan bentuk stres terkontrol yang mengaktifasi metabolisme embrio setelah imbibisi. Aktivitas ini memicu sintesis enzim hidrolitik seperti α -amilase, β -amilase, dan protease untuk memobilisasi pati dan protein sebagai sumber energi (Yodpitak et al., 2019). Dengan demikian, pemberian ozon sebelum germinasi berpotensi memperkuat mekanisme stres fisiologis ini melalui peningkatan ROS dalam batas toleransi sel, sehingga mempercepat aktivasi metabolik dan meningkatkan akumulasi senyawa bioaktif.

Selain parameter perlakuan, respon terhadap ozon dipengaruhi oleh kondisi awal bahan. Perbedaan struktur antara gabah dan beras pecah kulit menentukan tingkat penetrasi ozon dan distribusi stres oksidatif. Sekam pada gabah yang tersusun atas lignoselulosa dan silika berfungsi sebagai *barrier* difusi, sehingga interaksi ozon dengan jaringan embrio lebih terbatas. Sedangkan pada beras pecah kulit memiliki lapisan perikarp dan aleuron yang lebih permeable, memungkinkan interaksi ozon yang lebih langsung dengan jaringan metabolik aktif. Oleh karena itu, struktur morfologi awal bahan menjadi variabel penting dalam menentukan efektivitas perlakuan.

Namun demikian, efek ozon terhadap germinasi sangat bergantung pada dosis, konsentrasi, laju alir, dan lama paparan. Kaur et al., (2023) melaporkan bahwa perlakuan ozon pada gandum dengan konsentrasi $14,7 \text{ g/m}^3$ mampu meningkatkan persentase germinasi sebesar 22%. Pada jagung dan kedelai, perlakuan 10-20 mg/L menghasilkan tingkat germinasi lebih dari 80-95%. Sebaliknya, pada beras dengan perlakuan 0,393 mg/L selama 180 menit dilaporkan terjadi penurunan germinasi serta pertumbuhan koleoptil dan akar seminal.

Penelitian lain menunjukkan bahwa paparan ozon selama dua jam tidak memengaruhi kapasitas germinasi gandum, namun paparan selama tiga jam menurunkan germinasi sebesar 12%, yang diduga berkaitan dengan gangguan aktivitas enzim dan kerusakan struktur seluler. Pada barley, germinasi tidak terpengaruh pada dosis di bawah 0,98 mg/g biji per menit, tetapi menurun hingga 28,5% setelah paparan 45 menit pada dosis yang lebih tinggi. Temuan tersebut menunjukkan bahwa ozon dapat memberikan efek stimulatif maupun inhibitif tergantung pada intensitas perlakuan serta nilai CT yang diterapkan (Kaur et al., 2023). Mempertimbangkan risiko inhibitif pada durasi panjang tersebut, penelitian ini mengoptimalkan waktu paparan menjadi 30 menit. Hal ini didasarkan pada prinsip bahwa efektivitas ozon bergantung pada nilai CT, sehingga durasi yang lebih singkat diharapkan dapat menjaga perlakuan tetap dalam rentang efek stimulatif untuk memicu aktivitas metabolik tanpa menurunkan viabilitas benih Inpari 32.

Selain memengaruhi viabilitas dan kapasitas germinasi, ozonasi pada serelia juga dilaporkan memengaruhi parameter mutu fisik dan kimia (Kaur et al., 2023) menyatakan bahwa perlakuan ozon pada gandum dapat meningkatkan nilai kecerahan (L^*) dari 96,9 menjadi 97,4 serta mampu mereduksi tingkat kekuningan. Efek pemucatan juga teramati pada beras, dimana nilai kecerahan beras meningkat dari 69,39 menjadi 78,02 dengan konsentrasi ozon sebesar 0,1 – 0,4 ppm selama 0 – 420 menit. Dari segi kualitas pemasakan, ozonisasi meningkatkan kapasitas

penyerapan air pada beras sebesar 17-24%. Pada beberapa kondisi, ozon juga menghasilkan tingkat germinasi lebih dari 95%, namun pada dosis tertentu dilaporkan terjadi penurunan viabilitas pada beras. Perubahan viskositas dan indikasi degradasi pati juga diamati pada produk berbasis tepung akibat paparan ozon, yang menunjukkan adanya modifikasi struktur makromolekul (Kaur et al., 2023).

Perubahan mutu fisik dan kimia tersebut berkaitan erat dengan mekanisme oksidasi komponen makromolekul penyusun biji. Pada pati, ozonasi dilaporkan menyebabkan depolimerisasi rantai amilosa dan amilopektin, pembentukan gugus karbonil dan karboksil, serta perubahan struktur lamela amorf dan kristalin. Modifikasi ini memengaruhi sifat reologi seperti viskositas, daya kembang, kapasitas penyerapan air, dan profil gelatinisasi. Penurunan berat molekul pati akibat oksidasi juga berkontribusi terhadap berkurangnya waktu pemasakan serta meningkatnya kemampuan hidrasi granula pati. Beberapa studi melaporkan bahwa peningkatan dosis ozon secara bertahap dapat meningkatkan *water uptake*, elongasi, dan ekspansi lebar butir selama proses pemasakan, yang menyerupai karakteristik beras yang telah mengalami proses *aging* (Kaur et al., 2023).

Selain pati, protein juga mengalami modifikasi melalui oksidasi gugus sulfhidril dan perubahan keseimbangan ikatan disulfida. Perubahan struktur sekunder seperti peningkatan α -helix serta modifikasi β -turn dilaporkan meningkatkan kapasitas pengikatan air dan fleksibilitas molekul protein, meskipun paparan berlebihan dapat menurunkan kelarutan akibat agregasi protein. Ozon juga dapat mengoksidasi asam lemak tidak jenuh pada lipid, menghasilkan senyawa turunan seperti peroksida dan aldehida, yang memengaruhi stabilitas oksidatif bahan (Kaur et al., 2023).

Pada tingkat tertentu, ozonasi juga memengaruhi komponen bioaktif. Paparan ozon dalam konsentrasi terkendali dapat menginduksi respons stres oksidatif ringan yang merangsang akumulasi senyawa fenolik dan peningkatan kapasitas antioksidan. Namun, pada paparan berlebihan, degradasi senyawa fenolik dapat terjadi akibat

pembentukan radikal bebas yang lebih reaktif. Dengan demikian, perubahan mutu fisikokimia dan nilai fungsional bahan sangat dipengaruhi oleh konsentrasi ozon, durasi paparan, serta kondisi hidrasi bahan selama perlakuan (Kaur et al., 2023).

Berdasarkan uraian tersebut, perbedaan kondisi awal beras dan variasi konsentrasi ozon diduga memberikan pengaruh yang berbeda terhadap karakteristik fisikokimia beras germinasi. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh kedua faktor tersebut terhadap parameter kimia serta parameter fisik.

Mengingat kedua faktor tersebut memiliki tingkat kepentingan dan karakteristik yang berbeda terhadap karakteristik fisikokimia beras germinasi, penempatan masing-masing faktor sebagai petak utama maupun anak petak dalam rancangan percobaan perlu disesuaikan dengan kaidah pemilihan faktor pada Rancangan Petak Terbagi. Gomez & Gomez, (1984) menyatakan bahwa faktor yang ditempatkan pada anak petak sebaiknya adalah faktor yang menjadi fokus utama penelitian serta membutuhkan tingkat ketelitian pendugaan yang lebih tinggi, sedangkan faktor yang secara teknis budidaya atau perlakuan membutuhkan satuan percobaan berukuran lebih besar dan tidak dapat diacak pada skala yang lebih kecil lebih tepat ditempatkan sebagai petak utama.

Berdasarkan kaidah tersebut, konsentrasi ozon ditetapkan sebagai anak petak karena merupakan variabel utama yang ingin diketahui pengaruh dosisnya secara lebih teliti terhadap karakteristik fisikokimia beras germinasi. Sebaliknya, kondisi beras ditetapkan sebagai petak utama karena secara fisik merupakan unit perlakuan yang bersifat tetap selama proses ozonisasi berlangsung serta diperkirakan menghasilkan perbedaan respons yang lebih besar akibat perbedaan struktur morfologis, yaitu keberadaan sekam pada gabah yang tidak dimiliki oleh beras pecah kulit (Gomez & Gomez, 1984).

Metode Rancangan Petak Terbagi (RPT) dilakukan dengan 2 faktor dengan faktor pertama memiliki 2 taraf dan faktor kedua memiliki 4 taraf sehingga didapat hasil

8 perlakuan dengan 3 kali ulangan dan 24 satuan percobaan. Data yang didapatkan kemudian diolah dan apabila analisis yang dilakukan terdapat pengaruh antara rata-rata dari masing-masing perlakuan ($F_{\text{hitung}} > F_{\text{tabel}}$), maka harus dilakukan uji menggunakan uji beda nyata terkecil atau *least significant difference* (LSD) yang bertujuan untuk menentukan perlakuan mana yang berbeda nyata setelah analisis ragam menunjukkan adanya pengaruh perlakuan (Gasperz, 2006).

I.6 Hipotesis Penelitian

Berdasarkan kerangka pemikiran diatas, maka diduga :

1. Kondisi beras putih (gabah dan beras pecah kulit) diduga berpengaruh terhadap karakteristik fisikokimia beras germinasi.
2. Konsentrasi ozon (0, 2, 4 dan 6 ppm) diduga berpengaruh terhadap karakteristik fisikokimia beras germinasi.
3. Interaksi antara kondisi beras putih dan konsentrasi ozon diduga berpengaruh terhadap karakteristik fisikokimia beras germinasi.

I.7 Tempat dan Waktu Penelitian

Waktu pelaksanaan penelitian dimulai pada bulan Maret 2026 hingga 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.

Bab II Tinjauan Pustaka

Bab ini akan menguraikan mengenai: (II.1) Padi Varietas Inpari 32, (II.2) Gabah, (II.3) Beras Pecah Kulit, (II.4) Germinasi, dan (II.5) Ozonisasi.

II.1 Padi Varietas Inpari 32

Padi (*Oryza sativa* L.) merupakan tanaman pangan paling krusial di dunia, khususnya di wilayah Asia, yang berfungsi sebagai sumber karbohidrat utama bagi miliaran manusia. Sebagai tanaman semusim, padi memiliki kemampuan adaptasi yang luas, mulai dari lahan sawah irigasi hingga lahan kering atau gogo. Secara botani, tanaman ini termasuk dalam famili *Poaceae* yang menghasilkan bulir-bulir gabah sebagai unit reproduksi sekaligus sumber pangan (Bao, 2019).



Gambar II.1. *Oryza sativa*.L
(Sumber : <https://pixabay.com/>)

Klasifikasi Padi adalah sebagai berikut :

<i>Divisi</i>	: <i>Spermatophyta</i>
<i>Kelas</i>	: <i>Monocotyledoneae</i>
<i>Ordo</i>	: <i>Poales</i>
<i>Famili</i>	: <i>Graminae</i>
<i>Genus</i>	: <i>Oryza</i> Linn
<i>Species</i>	: <i>Oryza sativa</i> L.

Tanaman padi tumbuh baik pada iklim tropis dan subtropis dengan rata-rata curah hujan mencapai 200 mm/bulan atau 1500-2000 mm/tahun dengan ketinggian optimal mencapai 0-1500 mdpl dan temperatur optimal mencapai 22-27 °C. Dalam pertumbuhannya tanaman padi memerlukan sinar matahari yang cukup untuk dipergunakan dalam proses penyerbukan dan pembuahan dan dengan tanpa adanya naungan. Media Tanam untuk jenis padi gogo menginginkan lahan tanam kaya akan humus, struktur tanah remah dengan jenis tanah berliat, berdebu halus dan berlempung (Hanum, et al., 2018).

Tabel II.1. Analisis Proksimat Butiran Padi (per 100g) (Estimasi nilai rata-rata pada kadar air 14%)

Komponen Gizi	Gabah Utuh	Beras Pecah Kulit	Beras Sosoh	Dedak/Bekatul
Air (g)	14.0	14.0	14.0	14.0
Energi (kJ)	1110 – 1300	1480 – 1610	1460 – 1560	1670 – 1990
Energi (kcal)	266 – 311	358 – 388	349 – 373	399 – 476
Protein Kasar (g)	2.0 – 2.8	7.1 – 8.3	6.3 – 7.1	11.3 – 14.9
Total Lemak (g)	0.3 – 0.8	1.6 – 3.1	0.3 – 0.7	15.0 – 19.7
Abu/Mineral (g)	13 – 21	1.0 – 1.5	0.3 – 0.8	6.6 – 9.9
Karbohidrat (<i>by difference</i>) (g)	22 – 34	73 – 87	77 – 89	34 – 62
Total Serat Pangan (g)	66 -74	2.9 – 4.4	0.7 – 2.7	19 – 29
Gula (g)	0.6	0.7 – 1.9	0.1 – 0.5	5.5 – 6.9

(Sumber : (Bao, 2019))

Beras putih, yang merupakan hasil gilingan padi setelah lapisan sekam dan dedaknya dibuang, adalah komoditas yang paling banyak dikonsumsi di Indonesia. Beras putih sangat digemari karena teksturnya yang lembut, warna yang bersih, serta aroma yang netral sehingga cocok dipadukan dengan berbagai jenis lauk-pauk. Dari sisi penerimaan konsumen, tingkat keputihan (*whiteness*) dan transparansi butiran sering kali menjadi indikator utama kualitas pasar.

Secara nutrisi, beras putih didominasi oleh pati (amilosa dan amilopektin) yang mengisi sekitar 80-90% dari bobot keringnya. Proses penyosokan yang menghilangkan lapisan aleuron memang membuat beras putih lebih mudah dimasak dan tahan simpan, namun di sisi lain menyebabkan hilangnya sebagian besar serat, vitamin B kompleks, dan mineral yang terkonsentrasi pada lapisan kulit ari (Kaur et al., 2023).

Pengembangan varietas padi di Indonesia terus diarahkan untuk menciptakan "beras putih ideal" yang memiliki produktivitas tinggi namun tetap menjaga kualitas rasa. Dalam konteks ini, pemerintah melalui badan riset pertanian secara konsisten merilis Varietas Unggul Baru (VUB) yang memiliki spesifikasi ketahanan terhadap hama dan penyakit tanpa mengorbankan karakteristik nasi yang diinginkan masyarakat (Norvyani, 2023).

Varietas Inpari 32 HDB adalah salah satu perwujudan dari upaya pemuliaan tersebut. Dilepas pada tahun 2013, Inpari 32 dirancang sebagai perbaikan dari varietas-varietas populer sebelumnya seperti Ciherang. Nama "HDB" pada varietas ini menegaskan keunggulan utamanya, yaitu ketahanan terhadap penyakit Hawar Daun Bakteri, yang merupakan salah satu ancaman terbesar bagi tanaman padi di ekosistem sawah irigasi. (Norvyani, 2023)

Secara morfologi, Inpari 32 memiliki postur tanaman yang sangat ideal dengan tinggi rata-rata 91–106 cm dan batang yang kokoh. Struktur tanaman yang tegak ini memberikan keuntungan agronomis berupa ketahanan terhadap rebah (*lodging*),

terutama saat musim hujan dengan intensitas angin kencang. Daun bendera yang tegak juga membantu proses pengisian gabah menjadi lebih maksimal karena efisiensi fotosintesis yang tinggi (Norvyani, 2023).

Gabah yang dihasilkan oleh Inpari 32 memiliki bentuk panjang ramping dengan warna kuning jerami yang bersih. Karakteristik gabah ini sangat menguntungkan saat proses penggilingan karena persentase beras kepala (beras utuh) yang dihasilkan cenderung tinggi. Hal ini membuat Inpari 32 menjadi favorit bagi pemilik penggilingan padi karena rendemennya yang memuaskan.

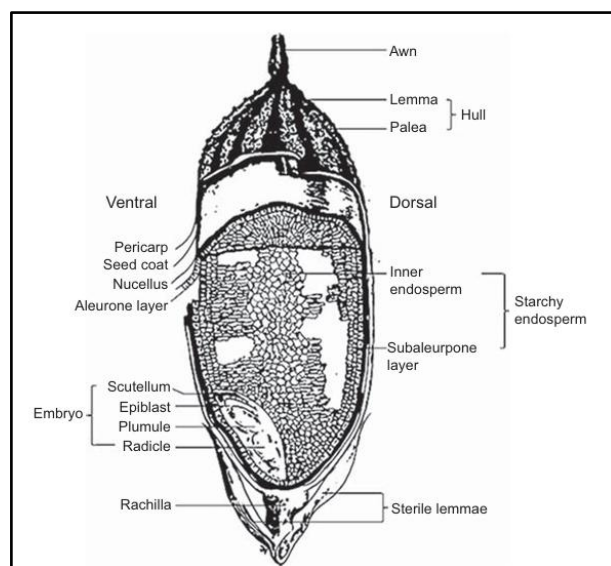
Dari segi kualitas nasi, Inpari 32 menghasilkan beras putih dengan kadar amilosa sekitar 18,74%. Angka ini menempatkan Inpari 32 dalam kategori beras beramilosa rendah hingga sedang, yang secara organoleptik menghasilkan nasi dengan tekstur pulen. Nasi pulen sangat diminati di sebagian besar wilayah Indonesia karena sifatnya yang tetap lembut meskipun sudah dalam kondisi dingin (Norvyani, 2023).

Potensi hasil varietas ini sangat impresif, dengan rata-rata hasil mencapai 6,30 ton/ha dan potensi maksimal hingga 8,42 ton/ha. Selain tahan HDB, varietas ini juga memiliki ketahanan terhadap blas ras 033 dan ras 073, serta agak tahan terhadap tungro. Ketahanan multirasi ini menjadikan Inpari 32 sebagai pilihan yang sangat aman bagi petani untuk meminimalkan risiko gagal panen akibat serangan patogen (Norvyani, 2023).

Secara keseluruhan, Inpari 32 bukan sekadar padi penghasil beras putih biasa, melainkan sebuah paket teknologi genetik yang menggabungkan kuantitas hasil dengan kualitas nutrisi dan rasa. Keberadaannya di tingkat petani telah terbukti mampu meningkatkan pendapatan sekaligus menjamin ketersediaan beras berkualitas bagi konsumen, yang menjadikan varietas ini tetap populer hingga saat ini (Norvyani, 2023).

II.2 Gabah

Gabah merupakan unit biologis fundamental dari tanaman padi yang secara struktural terdiri dari kariopsis atau beras pecah kulit yang terbungkus rapat oleh sekam (*hull*). Proses pembentukan gabah ini merepresentasikan fase kritis dalam siklus hidup tanaman padi, di mana terjadi akumulasi cadangan makanan secara intensif ke dalam butiran. Menurut Bao (2019), kematangan fisiologis gabah biasanya tercapai pada rentang waktu 28 hingga 30 hari setelah proses pembungaan. Fase ini secara visual ditandai dengan perubahan warna seluruh malai menjadi kuning keemasan yang diikuti dengan penurunan kadar air butiran secara alami hingga mencapai titik keseimbangan tertentu.



Gambar II.2. Anatomi Struktur Gabah

(Sumber : (Bao, 2019))

Secara anatomi, sekam yang menyelimuti kariopsis terdiri dari dua bagian daun yang termodifikasi atau *lemmae*, yaitu *palea* yang terletak pada sisi punggung (*dorsal*) dan *lemma* yang memiliki ukuran lebih besar pada sisi perut (*ventral*). Kedua struktur ini tidak sekadar menempel, melainkan disatukan oleh dua mekanisme pengait yang sangat kuat sehingga bentuk kariopsis yang matang akan menyesuaikan dengan gurat-gurat ruang di dalam *lemma* dan *palea* tersebut. Pada

beberapa varietas unggul, ujung *lemma* juga dilengkapi dengan *awn* (ekor atau bulu halus), sementara permukaan luarnya ditumbuhi oleh trikoma yang tersusun rapi di antara barisan sel endosperma (Bao, 2019).

Kekuatan proteksi sekam didukung oleh komposisi penyusunnya yang sangat kompleks dan kokoh. Berat rata-rata sekam mencakup sekitar 20% dari total berat gabah, dengan fluktuasi antara 16% hingga 28% tergantung pada varietasnya. Sel-sel penyusun sekam diketahui sangat berlignin dan bersifat rapuh, yang berfungsi sebagai benteng pertahanan fisik utama. Kerapatan antara *lemma* dan *palea* tanpa celah sedikit pun menjadi faktor penentu ketahanan gabah terhadap infestasi hama gudang dan serangan jamur patogen seperti *Aspergillus spp.*, mengingat butiran yang telah terkelupas (*dehulled*) jauh lebih rentan terhadap kontaminasi mikroba selama penyimpanan (Bao, 2019).

Lebih jauh lagi, baik *lemma* maupun *palea* memiliki empat lapisan struktural yang sangat terspesialisasi. Lapisan pertama adalah epidermis luar yang terdiri dari sel-sel yang tersilisifikasi tinggi dengan kutikula tebal dan permukaan bergelombang. Di bawahnya terdapat lapisan sklerenkim atau serat hipodermis setebal dua hingga tiga lapis sel yang dindingnya mengalami lignifikasi berat. Lapisan ketiga terdiri dari sel parenkim spons yang cenderung hancur atau memanjang, dan lapisan terakhir adalah epidermis dalam yang terdiri dari sel-sel isodiametrik. Secara vaskular, *lemma* memiliki lima ikatan pembuluh yang kurang berkembang, sedangkan *palea* memiliki tiga ikatan pembuluh (Bao, 2019).

Di balik lapisan sekam yang keras, terdapat kariopsis yang merupakan gudang nutrisi bagi pertumbuhan embrio. Endosperma di dalam gabah didominasi oleh pati dengan konsentrasi mencapai 75-80%, yang didampingi oleh kandungan protein sekitar 7-10% dalam bentuk fraksi glutelin dan globulin. Selain makronutrien tersebut, gabah juga mengandung mikronutrien penting seperti vitamin B kompleks serta mineral fosfor dan kalium. Namun, komponen mikronutrien ini tidak tersebar merata, melainkan terkonsentrasi pada lapisan aleuron dan lembaga, sehingga

keberadaan sekam menjadi sangat vital untuk menjaga integritas komponen-komponen sensitif tersebut dari kerusakan lingkungan (Kaur et al., 2023).

Selain aspek morfologi, kualitas fisik gabah sangat ditentukan oleh proses fisiologis selama masa pengisian bulir (*grain-filling*). Proses ini berlangsung secara dinamis di mana butiran mencapai panjang maksimum hanya dalam waktu 4 hari setelah pembungaan (DAF), diikuti dengan pencapaian lebar maksimum pada 14 DAF, dan ketebalan maksimum pada 21 DAF. Selama periode ini, nutrisi disalurkan melalui berkas pembuluh tunggal di sisi dorsal perikarp. Mengingat tidak adanya sel transfer khusus pada padi, organel mitokondria yang tersusun rapi di lapisan aleuron dan sub-aleuron memainkan peran krusial dalam sistem transpor zat terlarut. Keberhasilan proses pengisian ini pada akhirnya menentukan kerapatan kaitan antara *lemma* dan *palea*. Sekam yang mengait sempurna tanpa celah tidak hanya memberikan perlindungan mekanis yang lebih unggul terhadap infestasi hama gudang, tetapi juga menentukan kemudahan proses pengupasan (*dehulling*) pada tahap pascapanen (Bao, 2019).

Aspek krusial terakhir dalam tinjauan fisiologi gabah adalah penanganan pascapanen, khususnya pengaturan kadar air. Pengeringan gabah hingga mencapai kadar air standar 14% merupakan prosedur wajib untuk menjaga stabilitas gizi dan viabilitas embrio guna keperluan germinasi di masa depan. Kegagalan dalam mencapai atau mempertahankan kadar air yang tepat dapat memicu aktivitas enzimatis yang merugikan di dalam butiran. Aktivitas enzimatis yang tidak terkendali ini berpotensi menyebabkan degradasi kualitas pati dan protein, sehingga menurunkan nilai fungsional gabah baik sebagai bahan pangan maupun sebagai benih sumber (Bao, 2019).

Secara umum, berdasarkan kadar air hasil penanganan pascapanen, gabah dibedakan menjadi Gabah Kering Panen (GKP) dan Gabah Kering Giling (GKG). GKP memiliki kadar air relatif tinggi setelah panen, sedangkan GKG telah dikeringkan hingga kadar air maksimal 14% dengan kadar kotoran sekitar 3%

sehingga lebih stabil selama penyimpanan (Nasional, 2023). Dalam penelitian ini digunakan GKG karena kadar airnya lebih terkontrol memberikan kondisi awal yang lebih seragam, sehingga meminimalkan variabilitas akibat perbedaan kelembapan bahan sebelum perlakuan ozon dan proses germinasi.

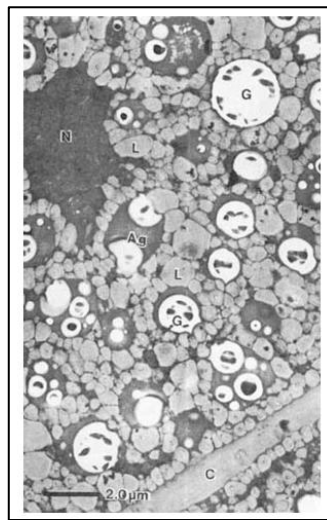
II.3 Beras Pecah Kulit

Beras pecah kulit (*brown rice*) merupakan produk hasil penggilingan padi yang hanya dihilangkan bagian sekamnya, sehingga mempertahankan seluruh integritas biologis dari lapisan kariopsis hingga endosperma. Kariopsis itu sendiri didefinisikan sebagai buah berbiji tunggal di mana perikarp menyatu dengan biji yang terdiri dari kulit biji, nuselus, endosperma, dan embrio. Berbeda dengan beras putih yang kehilangan hampir 80% mikronutrientnya akibat proses penyosohan, beras pecah kulit mempertahankan lapisan dedak (*bran*) yang kaya akan serat dan senyawa bioaktif, menjadikannya sebagai sumber pangan fungsional yang sangat kuat (Kaur et al., 2023).

Secara struktural, bagian terluar dari beras pecah kulit adalah lapisan kariopsis yang terdiri dari tiga lapisan sel hancur yang berbeda yaitu perikarp, kulit biji (*tegmen*), dan nuselus. Perikarp merupakan dinding ovarium yang matang dengan ketebalan sekitar 10 mm dan memiliki kutikula tipis serta tampilan permukaan yang bergelombang. Di bawah perikarp terdapat kulit biji atau *tegmen* yang memiliki kutikula tebal ($0,5\ \mu\text{m}$). Menariknya, pigmen warna pada varietas beras berwarna biasanya terakumulasi pada lapisan perikarp atau kulit biji ini. Berbatasan langsung dengan kulit biji adalah nuselus dengan ketebalan sekitar $2,5\ \mu\text{m}$ yang memiliki kutikula sangat tebal ($0,8\ \mu\text{m}$). Ikatan antara kulit biji dan nuselus ini relatif lemah sehingga sering kali mengalami pemisahan selama penanganan fisik (Bao, 2019).

Di bawah lapisan kariopsis terdapat lapisan aleuron yang merupakan bagian terluar dari endosperma namun memiliki fungsi fisiologis yang berbeda secara signifikan. Lapisan aleuron mengelilingi seluruh butiran dan embrio dengan ketebalan berkisar 1–7 sel, di mana sisi punggung (*dorsal*) biasanya lebih tebal dibandingkan sisi

lateral maupun ventral. Terdapat dua tipe sel aleuron: tipe pertama mengelilingi endosperma pati dengan sitoplasma padat yang berisi butiran aleuron (*protein bodies*) dan badan lipid (*spherosomes*); tipe kedua adalah aleuron yang dimodifikasi yang mengelilingi embrio dengan karakteristik sitoplasma yang kurang padat. Lapisan aleuron ini menyimpan fitat dalam bentuk globoid serta mengandung protein permukaan khusus yang disebut oleosin yang berfungsi menjaga integritas badan minyak melalui hambatan sterik dan tolakan muatan negatif (Bao, 2019).



Gambar II.3. Lapisan Aleuron Pada Beras

(Sumber : (Bao, 2019))

Embrio atau lembaga terletak di sisi ventral pangkal butiran dan dipisahkan dari endosperma oleh skutelum (kotiledon). Embrio merupakan bagian yang sangat kecil namun sangat padat nutrisi, terdiri dari poros embrionik berbentuk C yang mencakup plumula (daun embrionik) dan radikula (akar primer). Skutelum mengandung partikel kaya globoid yang menyerupai butiran aleuron, sementara sel-sel koleoptil kaya akan badan protein dan lipid. Secara distribusi berat, perikarp menyumbang 1%–2%, aleuron dan kulit biji 4%–6%, serta embrio sekitar 2%–3% dari total berat kariopsis, namun bagian-bagian kecil inilah yang menyimpan sebagian besar senyawa fungsional seperti vitamin B1 (tiamin), B3 (niasin), vitamin

E (tokoferol), serta mineral esensial seperti magnesium, seng, dan zat besi (Bao, 2019).

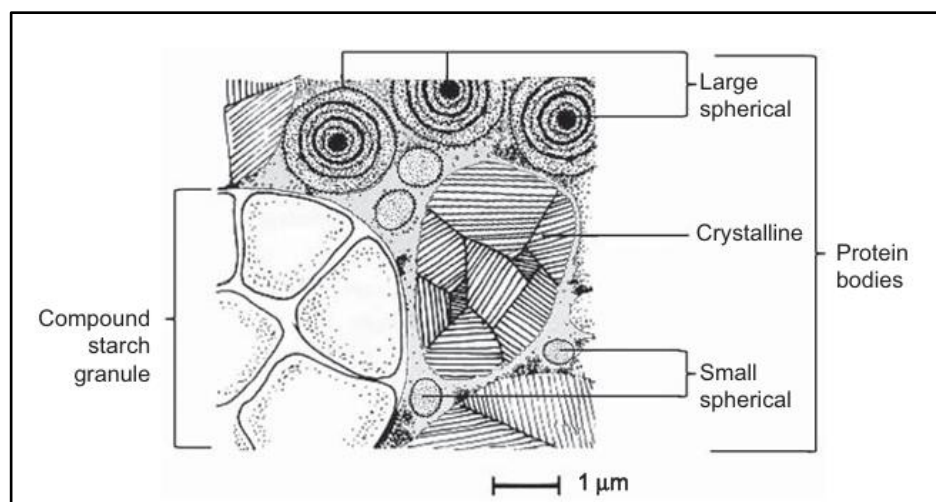
Bagian terbesar dari penyusun beras pecah kulit adalah endosperma pati yang mencakup sekitar 89%–94% dari total berat kariopsis. Secara anatomis, endosperma ini terbagi menjadi dua wilayah utama, yakni lapisan sub-aleuron yang terletak tepat di bawah lapisan aleuron, dan wilayah tengah yang merupakan inti dari butiran. Endosperma tersusun atas sel-sel parenkim berdinding tipis yang memanjang secara radial, di mana sel-sel tersebut terisi penuh oleh butiran pati majemuk poligonal dengan diameter berkisar antara 3–9 μm . Karakteristik butiran pati ini sangat menentukan kualitas fisik beras; pada varietas non-ketan sering ditemukan fenomena "kekapuran" (*chalkiness*) yang disebabkan oleh susunan butiran pati yang longgar, sehingga menciptakan rongga udara yang melemahkan struktur butiran dan meningkatkan risiko kepatahan saat proses penyosohan. Sebaliknya, pada beras ketan (*waxy*), butiran pati cenderung tersusun lebih rapat namun memiliki keunikan berupa mikropori pada permukaannya (Bao, 2019).

Integritas nutrisi dalam endosperma ini tidak hanya ditentukan oleh struktur patinya, tetapi juga oleh pengorganisasian protein yang tersimpan secara sistematis di dalam sel dalam bentuk badan protein (*protein bodies*/PB). Berdasarkan studi ultrastruktur, terdapat dua tipe utama badan protein yang memiliki karakteristik morfologi dan fungsional yang berbeda. Tipe pertama adalah PB I yang berbentuk bulat (sferis) dengan diameter sekitar 1–2 μm dan didominasi oleh fraksi protein prolamin. Tipe kedua adalah PB II yang memiliki struktur kristalin bersudut atau tersegmentasi, yang berfungsi sebagai tempat penyimpanan utama bagi protein glutelin (protein utama pada beras) (Bao, 2019).

Secara dimensi, PB II umumnya memiliki ukuran yang lebih besar, yakni berkisar antara 2–3,5 μm , dibandingkan dengan PB I. Distribusi kedua jenis badan protein ini tidak tersebar merata di seluruh endosperma, melainkan terkonsentrasi paling padat pada lapisan sub-aleuron yang merupakan lapisan terluar dari endosperma

pati. Oleh karena itu, derajat penyosohan yang terlalu tinggi pada proses pengolahan beras pecah kulit akan secara langsung mengeliminasi lapisan sub-aleuron ini, yang berarti menghilangkan cadangan protein fungsional paling berharga sebelum mencapai wilayah tengah endosperma (Bao, 2019).

Keberadaan struktur seluler yang kompleks ini, yang menggabungkan matriks protein PB I dan PB II dengan butiran pati yang terbungkus serat pangan tinggi, memberikan nilai kesehatan yang signifikan pada beras pecah kulit. Struktur tersebut berkontribusi pada rendahnya Indeks Glikemik (IG), yakni di bawah 55, karena densitas komponen protein dan serat pada lapisan luar endosperma mampu memperlambat aksi enzim pencernaan dalam menghidrolisis pati. Hal ini mengakibatkan pengosongan lambung dan penyerapan glukosa di usus halus berlangsung lebih lambat, sehingga membantu stabilitas kadar glukosa darah dibandingkan dengan beras putih yang telah kehilangan lapisan sub-aleuronnya (Bao, 2019).



Gambar II.4. Bagian Endosperma Beras

(Sumber : (Bao, 2019))

Meskipun memiliki keunggulan nutrisi yang luar biasa, termasuk keberadaan senyawa fitokimia seperti *gamma-oryzanol* yang berfungsi sebagai antioksidan dan penurun kolesterol, beras pecah kulit memiliki tantangan dalam stabilitas

penyimpanan. Kandungan lemak pada lembaga dan lapisan aleuron sangat rentan terhadap proses oksidasi oleh udara yang dipicu oleh aktivitas enzim lipase. Oksidasi lemak ini menghasilkan senyawa volatil yang menimbulkan bau tengik, sehingga dapat menurunkan akseptabilitas konsumen. Oleh karena itu, pemahaman mengenai struktur mikro kariopsis ini sangat penting dalam menentukan metode stabilisasi atau penyimpanan kedap udara yang tepat guna menjaga kualitas nutrisi dan aroma beras pecah kulit hingga siap dikonsumsi (Kaur et al., 2023).

II.4 Germinasi

Germinasi atau perkecambahan didefinisikan sebagai rangkaian peristiwa metabolik yang dimulai dengan penyerapan air (imbibisi) oleh biji kering yang dorman dan diakhiri dengan pemanjangan poros embrio atau radikula. Proses ini merupakan aktivasi kembali sistem biokimia biji yang sempat tertidur. Tanda berakhirnya fase germinasi secara visual adalah penembusan struktur pelindung biji oleh radikula, yang sering disebut sebagai perkecambahan visual. Peristiwa metabolisme yang terjadi setelah penembusan radikula, seperti mobilisasi cadangan makanan secara besar-besaran, diklasifikasikan sebagai fase pertumbuhan bibit (*seedling growth*) (Bewley, 1997).

Secara fisiologis, proses germinasi berlangsung dalam tiga fase utama, yaitu fase imbibisi cepat (fase I), fase lag metabolik (fase II), dan fase pertumbuhan radikula (fase III). Pada fase I terjadi peningkatan kadar air yang memicu hidrasi protein, perubahan struktur subseluler, serta aktivitas enzim mitokondria. Fase II ditandai dengan stabilisasi penyerapan air namun peningkatan aktivitas metabolisme, termasuk sintesis RNA dan protein. Pada fase III terjadi lonjakan respirasi kedua yang berkaitan dengan pertumbuhan sumbu embrio serta peningkatan aktivitas mitokondria baru (Bewley, 1997).

Dalam bidang pangan, proses germinasi tidak hanya dipahami sebagai fenomena fisiologis, tetapi juga sebagai perlakuan yang mampu memodifikasi nilai gizi, sifat fungsional, serta ketersediaan hayati zat gizi pada beras. Selama perkecambahan,

terjadi peningkatan aktivitas enzim hidrolitik seperti α -amilase dan protease yang berperan dalam menguraikan pati dan protein menjadi senyawa dengan bobot molekul lebih rendah. Proses hidrolisis ini berkontribusi terhadap meningkatnya pencernaan pati serta ketersediaan asam amino bebas (Hazra, 2024). Secara bersamaan, germinasi juga merangsang akumulasi berbagai senyawa bioaktif, termasuk γ -aminobutyric acid (GABA), senyawa fenolik, flavonoid, serta komponen antioksidan lainnya yang diketahui memiliki peran dalam pencegahan penyakit degeneratif (Munarko et al., 2022).

Selain meningkatkan kandungan senyawa bioaktif, germinasi dilaporkan mampu menurunkan kadar komponen *antinutrient* dalam beras. Beberapa penelitian terbaru menunjukkan bahwa proses perkecambahan efektif menurunkan kadar asam fitat, sehingga meningkatkan bioavailabilitas mineral esensial seperti Fe, Zn, dan Ca (Chinma, C. E., et al, 2024). Menariknya peningkatan kandungan senyawa bioaktif akibat germinasi tetap dapat diamati pada biji yang telah mengalami penyimpanan jangka Panjang, meskipun besarnya perubahan dipengaruhi oleh faktor varietas (Supapohn Yamuangmorn, et al, 2024).

Secara aplikatif, penerapan germinasi pada butir beras berpotensi menjadi strategi pengolahan yang efektif untuk meningkatkan kualitas gizi dan pencernaan, sehingga mendukung pemenuhan kebutuhan nutrisi masyarakat. Pendekatan proses yang lebih spesifik dilakukan oleh (Shen et al., 2015), yang mengkaji germinasi beras putih, merah dan hitam menggunakan metode anaerobik. Dalam penelitian tersebut, beras direndam dalam air deionisasi dengan pH netral pada suhu 30°C selama 5 jam dalam kondisi gelap, kemudian dilanjutkan hingga total 25 jam pada kondisi normal. Selanjutnya, sampel dikemas secara vakum dan disimpan pada suhu ruang dalam kondisi gelap selama 10 jam untuk menciptakan kondisi anaerobik, sedangkan sampel kontrol diperlakukan secara konvensional. Setelah proses germinasi, kemudian dikeringkan menggunakan *vacuum freeze dryer* hingga kadar air mencapai 12%, dihaluskan dan diayak menggunakan ukuran 100 mesh, lalu disimpan pada suhu 4°C hingga dilakukan analisis.

Hasil penelitian (Shen et al., 2015) menunjukkan bahwa perlakuan germinasi secara signifikan meningkatkan kandungan asam amino, polifenol serta aktivitas antioksidan, termasuk ferulat, asam kuramat, dan asam sinapat. Selain itu, kadar γ -aminobutyric acid (GABA) pada beras putih, merah, dan hitam meningkat masing-masing sebesar 4,2; 9,7; dan 4,8 kali lipat dibandingkan kontrol. Temuan ini menegaskan bahwa germinasi merupakan proses bioproses yang efektif dalam meningkatkan nilai fungsional beras.

Germinasi terbukti sebagai strategi bioproses yang efektif dalam meningkatkan gizi dan sifat fungsional beras. Peningkatan tersebut terutama berkaitan dengan bertambahnya kandungan senyawa bioaktif, seperti GABA dan senyawa fenolik, serta berkurangnya komponen *antinutrient* selama proses perkecambahan. Meskipun demikian, Sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada pengaturan parameter dasar germinasi, seperti waktu dan suhu, tanpa mengkombinasikannya dengan teknologi non-termal yang berpotensi meningkatkan efisiensi proses maupun mempertahankan stabilitas senyawa bioaktif yang terbentuk.

Di sisi lain, penelitian yang secara khusus mengkaji kombinasi antara germinasi dan teknologi non-termal terhadap karakteristik fisikokimia, bioavailabilitas zat gizi, dan dampaknya terhadap kualitas fungsional gabah dan beras pecah kulit masih relatif terbatas. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih terpadu untuk mengoptimalkan proses germinasi secara lebih efektif dan aplikatif, khususnya dalam upaya pengembangan gabah dan beras pecah kulit sebagai pangan fungsional dengan nilai tambah yang lebih tinggi.

II.5 Ozonisasi

Ozon (O_3) merupakan alotrop yang tersusun atas tiga atom oksigen dan dikenal sebagai salah satu agen pengoksidasi terkuat dengan potensial oksidasi sebesar 2,07 V, berada tepat di bawah flourin. Senyawa ini bersifat tidak stabil, tidak berwarna,

memiliki bau khas, serta mudah terdegradasi secara spontan menjadi oksigen sehingga tidak meninggalkan residu berbahaya pada produk pangan maupun lingkungan (Chawla, A. S., 2024 ; Pandiselvam et al., 2019). Karakteristik tersebut menjadikan ozon sebagai teknologi ramah lingkungan yang potensial untuk aplikasi pangan dan pertanian. Untuk lebih lengkapnya sifat-sifat ozon dapat dilihat sebagai berikut :

Tabel II.2. Sifat-Sifat Ozon

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

(Sumber : (Yusuf et al., 2008))

Teknologi ozon, baik dalam bentuk fase gas maupun larutan, telah banyak diaplikasikan dalam industri pangan untuk tujuan dekontaminasi, pengawetan dan peningkatan mutu bahan. Badan pengawas obat dan makanan Amerika Serikat (US-FDA) telah menetapkan ozon sebagai bahan yang berstatus *Generally Recognized as Safe* (GRAS) untuk penggunaan dalam pengolahan pangan, sehingga penggunaannya semakin luas dalam berbagai sistem produksi pangan (Pandiselvam et al., 2019).

Ozon dapat dihasilkan melalui beberapa metode, antara lain proses termal, fotokimia (UV), dan pelepasan muatan Listrik (*corona discharge* atau *dielectric*

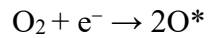
barrier discharge / DBD). Secara teknis, ozon dalam fase gas dapat dihasilkan melalui proses termal, fotokimia, dan elektrokimia, serta melalui aksi aliran partikel dan pelepasan listrik. Pada metode termal, pembentukan ozon bergantung pada keseimbangan antara oksigen molekuler (O_2) dan oksigen atomik (O). Suhu rendah mendukung pembentukan ozon, sedangkan suhu tinggi menurunkan stabilitasnya akibat peningkatan konsentrasi oksigen atomik (Kaur et al., 2023).

Pada metode fotokimia, molekul O_2 terdisosiasi oleh radiasi ultraviolet menjadi atom oksigen reaktif yang selanjutnya bereaksi dengan O_2 membentuk ozon. Proses fotokimia ini dimulai di stratosfer dengan pemecahan molekul O_2 oleh radiasi UV surya, dan di troposfer ozon terbentuk melalui dua tahap reaksi kimia selama terdapat sinar UV matahari. Selain itu, pada metode *corona discharge*, ozon dibuat dengan melewati udara kering atau oksigen murni melalui elektroda bertegangan tinggi 8-10 kV yang mendisosiasi oksigen menjadi atom (Kaur et al., 2023).

Dalam sistem *dielectric barrier discharge* (DBD), pembentukan ozon berlangsung melalui mekanisme tumbukan yang terjadi dalam fase plasma. Untuk menghasilkan plasma tersebut diperlukan pembangkit tegangan tinggi, karena pemecahan molekul oksigen (O_2) menjadi atom atau ion oksigen memerlukan medan listrik yang cukup kuat. Ketika gas O_2 dilewatkan melalui medan listrik bertegangan tinggi, molekul O_2 mengalami ionisasi dan disosiasi sehingga terbentuk partikel bermuatan berupa ion positif, ion negatif, elektron bebas, serta radikal oksigen reaktif. Campuran partikel bermuatan ini dikenal sebagai plasma, yang sering disebut sebagai fase keempat materi setelah padat, cair, dan gas (Yusuf et al., 2008).

Dalam reaktor DBD ini, gas yang mengandung oksigen dilepaskan di antara elektroda untuk menghasilkan O_3 melalui saluran mikro-*discharge* dalam skala waktu mikrodetik. Elektron bebas yang memiliki energi kinetik tinggi kemudian menumbuk molekul oksigen sehingga terjadi reaksi disosiasi yang dapat dituliskan

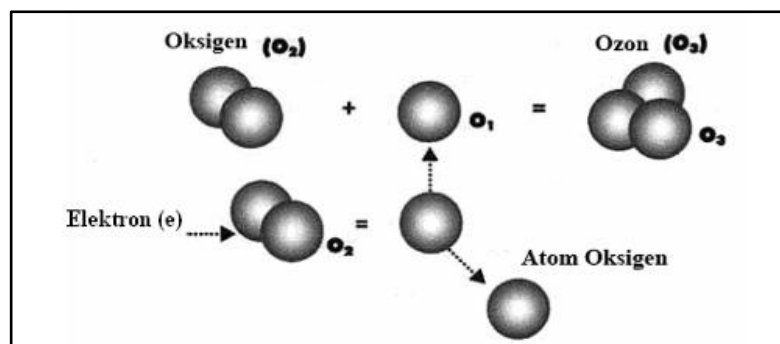
sebagai :



Atom oksigen reaktif (O^*) yang terbentuk berada dalam keadaan tereksitasi dan sangat tidak stabil. Atom ini kemudian bertumbukan dengan molekul O_2 lain membentuk ozon melalui reaksi :



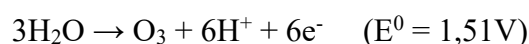
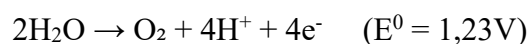
Di mana M merupakan molekul ketiga (biasanya O_2 atau N_2) yang berfungsi menyerap kelebihan energi reaksi agar molekul ozon yang terbentuk menjadi stabil. proses tumbukan ini terjadi sangat cepat dalam saluran mikro pada reaktor DBD dan dipengaruhi oleh tegangan listrik, frekuensi, jarak elektroda, serta komposisi gas (Kaur et al., 2023).



(Sumber : (Yusuf et al., 2008))

Gambar II.5. Pembentukan gas ozon melalui proses tumbukan

Selain dalam fase gas, ozon juga dapat dihasilkan dalam bentuk *aqueous* (fase cair) melalui metode elektrokimia (elektrolisis) atau dengan sistem injeksi untuk menyuspensikan gas ozon ke dalam medium cair. Pada metode elektrokimia, air diurai melalui proses elektrolisis pada bagian anoda untuk menghasilkan oksigen dan ozon secara bersamaan melalui reaksi berikut :



Karena energi yang dibutuhkan untuk membentuk oksigen lebih rendah dibandingkan ozon, maka secara alami oksigen akan lebih banyak terbentuk. Untuk

meningkatkan efisiensi, maka digunakan elektroda khusus atau zat aditif yang mampu menghambat terbentuknya oksigen. Beberapa material anoda yang umum digunakan untuk tujuan ini adalah platinum, timbal oksidan atau *doped tin dioxide*. (Kaur et al., 2023)

Ozon yang dihasilkan dalam fase gas diaplikasikan langsung ke permukaan bahan dan bekerja melalui mekanisme oksidasi langsung oleh molekul O_3 . Efek ozon pada berbagai senyawa berasal dari reaksi molekul ozon itu sendiri atau hasil penguraian yang membentuk radikal bebas. Sebagai molekul yang kaya energi, ozon akan pecah dan melepaskan radikal aktif seperti hidroksil ($HO\bullet$), hidroksiperoksi ($HO_2\bullet$), dan superoksida ($O_2\bullet$). Oksidasi ozon ini dapat terjadi melalui dua jalur, yaitu reaksi langsung dengan molekul ozon yang bersifat selektif namun lambat, serta reaksi tidak langsung melalui radikal hidroksil yang terbentuk ketika atom oksigen ketiga bereaksi dengan matriks pangan (Sachadyn-Król & Agriopoulou, 2020)

Reaksi ini biasanya mengincar ikatan kimia tertentu pada bahan. Dalam proses germinasi gabah dan beras pecah kulit, ozon berperan sebagai pemicu (elisitor) yang menembus lapisan luar biji dan bereaksi dengan air di dalam sel membentuk senyawa oksigen reaktif (ROS). Ozon kemudian berinteraksi dengan membran sel pada bagian embrio dan lapisan aleuron, yang menyebabkan munculnya ROS secara cepat serta mengaktifkan enzim pelindung seperti superoksida dismutase dan peroksidase. (Sachadyn-Król & Agriopoulou, 2020)

Proses ini memicu perubahan fisik yang membuat biji lebih tahan terhadap tekanan (stres) dengan cara merangsang sistem pembersihan sel dan meningkatkan pembuatan enzim antioksidan serta enzim pertahanan. Beberapa gen tertentu (seperti kitinase dan peroksidase) ikut aktif untuk merespons paparan ozon tersebut. Secara keseluruhan, pemberian ozon pada tahap awal bertujuan untuk mengaktifkan hormon dan metabolisme sel yang sangat penting untuk mempercepat pertumbuhan kecambah. Oksidasi yang terjadi dapat menyebabkan

depolimerisasi parsial pati serta pembentukan gugus karbonil dan karboksil akibat reaksi pada gugus hidroksil rantai glukosa, yang selanjutnya memengaruhi sifat fungsional seperti viskositas dan penyerapan air (Pandiselvam et al., 2019; Sachadyn-Król & Agriopoulou, 2020).

Efektivitas ozon dipengaruhi oleh konsentrasi dan durasi paparan yang umumnya dijelaskan melalui konsep CT (*concentration x time*), yaitu hasil perkalian antara konsentrasi ozon dan waktu kontak. Nilai CT menunjukkan bahwa efek perlakuan ditentukan oleh kombinasi kedua faktor tersebut. Meskipun secara teoritis konsentrasi rendah dengan waktu lama dapat setara dengan konsentrasi tinggi dalam waktu singkat, beberapa penelitian melaporkan bahwa paparan konsentrasi tinggi cenderung bersifat fototoksik meskipun memiliki nilai CT yang sama. Oleh karena itu, optimasi konsentrasi dan waktu perlakuan menjadi aspek penting dalam aplikasi ozon (Kaur et al., 2023).

Suhu dan kelembapan turut memengaruhi efektivitas ozon. Peningkatan suhu dapat mempercepat reaksi oksidasi, tetapi juga mempercepat dekomposisi ozon sehingga menurunkan stabilitasnya. Selain itu, distribusi ozon dalam massa biji dipengaruhi oleh sistem aerasi, ketebalan lapisan bahan, dan porositas. Secara kinetika, laju peluruhan ozon pada biji-bijian sering kali mengikuti model matematika orde tertentu (orde nol, satu, atau dua) yang menentukan waktu paruh (*half life*) gas tersebut selama proses perlakuan. Sebagai contoh, pada biji jagung dan padi, dekomposisi ozon dilaporkan mengikuti kinetika orde pertama dengan waktu paruh berkisar antara 5,5, hingga 6,3 menit (Kaur et al., 2023).

Ozon cenderung mengalami penurunan konsentrasi seiring meningkatnya jarak difusi dalam tumpukan biji, sehingga distribusi yang tidak merata dapat terjadi apabila sistem aerasi tidak optimal. Model difusi pada beras menunjukkan bahwa parameter difusivitas (D_e) dan kecepatan gas (V_z) sangat menentukan kedalaman penetrasi ozon, di mana efektivitas maksimum umumnya dicapai pada kondisi udara

diam (*still air*) dengan ketebalan tumpukan yang minimum untuk menjamin seluruh permukaan biji terpapar secara seragam (Kaur et al., 2023).

Karakteristik bahan, khususnya kadar air, memengaruhi respons terhadap ozon. Kondisi hidrasi dapat meningkatkan interaksi ozon dengan matriks pati dan protein serta memodifikasi perubahan fisikokimia yang terjadi. Dengan demikian, efektivitas ozon merupakan hasil interaksi antara konsentrasi, waktu paparan, kondisi lingkungan, fase ozon, dan sifat bahan, sehingga diperlukan pengaturan perlakuan yang tepat untuk memperoleh efek optimal tanpa menurunkan kualitas (Kaur et al., 2023).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa perlakuan ozon pada konsentrasi optimal mampu meningkatkan atribut morfologi benih dan persentase perkecambahan tanpa perubahan fisik dan biokimia yang merugikan (Labanowska M, Kurdziel M, 2016; Marique, T., O. Allard, 2012; Savi, G.D., K.C. Piacentini, K.O. Bittencourt, 2014). Pada gandum musim dingin, ozon meningkatkan persentase dan energi perkecambahan yang mencerminkan peningkatan vigor benih (Avdeeva, V., E. Zorina, J. Bezgina, 2018). Pada tanaman padi, perlakuan menggunakan air ozonasi (30–40 ppm selama 1 jam) dilaporkan meningkatkan panjang akar dan batang, bobot segar dan kering kecambah, serta aktivitas enzim antioksidan seperti *ascorbate peroksidase* (Sharaf-eldin et al., 2022)

Mekanisme anti mikroba ozon terjadi melalui oksidasi langsung terhadap membran sel mikroorganisme, khususnya pada ikatan rangkap asam lemak tidak jenuh, yang menyebabkan kebocoran isi sel dan lisis (Pandiselvam et al., 2019). Ozon juga mengoksidasi gugus sulfhidril dan amino pada enzim serta komponen nukleotida, sehingga menghambat metabolisme dan replikasi mikroba (Chawla, A. S., 2024). Ozon gas 2–5 ppm dilaporkan mampu menurunkan populasi *Escherichia coli* dan *Salmonella typhimurium* secara signifikan (Kottapalli, M., 2021). Selain itu, ozon efektif dalam detoksifikasi mikotoksin seperti aflatoksin B1 melalui oksidasi ikatan rangkap karbon–karbon hingga mencapai degradasi sekitar 90% (da Silva, V. M., 2023; Pandiselvam et al., 2019).

Meskipun berbagai penelitian telah melaporkan efektivitas ozon dalam meningkatkan viabilitas benih dan menekan kontaminasi mikroba, kajian yang secara spesifik mengevaluasi pengaruh ozonisasi terhadap proses germinasi gabah dan beras pecah kulit masih terbatas. Sebagian besar penelitian pada padi berfokus pada parameter pertumbuhan awal dan pengendalian patogen, sementara aspek perubahan kualitas nutrisi, komponen bioaktif, serta sifat fungsional hasil germinasi dieksplorasi secara sistematis. Selain itu, kombinasi optimal konsentrasi ozon, durasi perlakuan, dan kondisi hidrasi bahan dalam memaksimalkan germinasi sekaligus mempertahankan kandungan bioaktif masih belum jelas.

Keterbatasan tersebut menunjukkan perlunya penelitian komprehensif yang mengintegrasikan aspek fisiologis, biokimia, dan keamanan mikrobiologis untuk mengevaluasi potensi ozonisasi sebagai teknologi pra-germinasi gabah dan beras pecah kulit yang efektif, aman, dan berkelanjutan.

Bab III Metodologi Penelitian

Bab ini akan menguraikan mengenai: (III.1) Bahan dan Alat, (III.2) Metode Penelitian, (III.3) Prosedur Penelitian, (III.4) Jadwal Pelaksanaan Penelitian.

III.1 Bahan dan Alat

III.1.1 Bahan

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah beras pecah kulit varietas Inpari 32 HDB yang diperoleh dari BB Padi Sukamandi, serta gas ozon (O_3) yang dihasilkan melalui generator plasma. Untuk keperluan perkecambahan dan persiapan sampel, digunakan media kertas saring/merang, plastik alas, akuades, dan larutan garam jenuh untuk pengkondisian kelembapan pada uji higroskopisitas.

Analisis kimia dan komponen pangan melibatkan penggunaan berbagai reagen teknis dan pro-analisis, meliputi etanol 95%, NaOH (1 N dan 25%), HCl (25% dan 0,1 N), larutan iod, larutan asam asetat 1 N, serta amilosa murni sebagai standar kalibrasi. Untuk pengujian karbohidrat dan gula reduksi, digunakan larutan Luff Schoorl, KI 20%, H_2SO_4 25% (atau 26,5%), $Na_2S_2O_3$ 0,1 N, indikator pati 1%, serta larutan Pb Asetat dan Na_2CO_3 untuk tahap penjernihan, ditambah dengan penggunaan batu didih pada proses refluks. Analisis fungsional dan morfologi permukaan didukung oleh penggunaan bubuk DPPH 50 μM serta *double tape* karbon sebagai perekat sampel pada *holder* pengujian mikroskopis.

III.1.2 Alat

Alat utama yang digunakan untuk perlakuan objek penelitian ini yaitu Generator Ozon berbasis *Plasma Chamber* seperti *Indirect Dielectric Barrier Discharge* untuk menghasilkan gas ozon (O_3). Instrumen analisis tingkat lanjut yang digunakan meliputi *Chromameter Konica Minolta CR-400* untuk pengukuran derajat putih, *Rapid Visco Analyzer (RVA)* Perten Instruments 4500 untuk karakteristik *pasting*, Spektrofotometer UV-Visible Shimadzu UV-1800, serta *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk pengamatan morfologi permukaan. Peralatan

laboratorium standar yang digunakan terdiri dari neraca analitik OHAUS Pioneer PA214C (ketelitian 0,0001 g), oven pengering Memmert UN Series, inkubator suhu terkontrol, *water bath* Thermo Scientific, sentrifus Hettich Universal 320, serta perangkat desikator vakum dan eksikator. Untuk mendukung prosedur teknis dan analisis mikro, digunakan mikropipet dengan berbagai rentang volume beserta *tip*-nya, serta berbagai alat gelas meliputi gelas ukur, gelas kimia (200 mL dan 250 mL), labu takar 100 mL, buret 50 mL, cawan porselen, cawan petri, dan cawan timbang. Peralatan penunjang lainnya mencakup tabung sentrifus Falcon 50 mL, *canister* RVA, botol vial, kertas saring Whatman No. 1, klem, statif, corong kaca, serta perangkat pemanas yang terdiri dari Bunsen dan kawat kasa untuk mendukung proses refluks dan destruksi sampel. *Perten Instruments* RVA 4500, Spektrofotometer UV-Visible Shimadzu UV-1800 pada panjang gelombang 625 nm, *Centrifuge Hettich Universal* 320. dzu UV-1800 pada panjang gelombang 625 nm, *Centrifuge Hettich Universal* 320.

III.2 Metode Penelitian

III.2.1 Penelitian Utama

Penelitian utama dilakukan dengan memaparkan gas ozon pada gabah dan beras pecah kulit (BPK) Inpari 32 dari BB Padi Sukamandi dengan variasi konsentrasi 0, 2, 4, dan 6 ppm. Proses ozonisasi menggunakan generator plasma berkapasitas 3 *tray* dengan beban sampel maksimal 150 gram per *tray* untuk menjamin keseragaman paparan. Gas ozon dihasilkan dari udara luar yang diionisasi melalui reaktor plasma, kemudian dialirkan ke dalam *chamber* selama waktu kontak 30 menit dengan bantuan sensor ozon untuk menjaga stabilitas konsentrasi. Setelah pemaparan, sampai melalui tahap germinasi yang kemudian dilakukan serangkaian analisis respon fisik dan kimia untuk melihat pengaruh perlakuan terhadap kualitas beras germinasi.

III.2.2 Rancangan Perlakuan

Rancangan perlakuan pada penelitian ini disusun menggunakan susunan Petak Terbagi (*Split Plot*). Faktor kondisi beras ditempatkan sebagai Petak Utama (*Main Plot*) sedangkan konsentrasi ozonisasi ditempatkan sebagai Anak Petak (*Sub Plot*). Dasar pemilihan konsentrasi merupakan hasil *trial and error* yang telah dilakukan sebelum penelitian.

1. Petak Utama : Faktor kondisi beras putih (K) yang terdiri dari 2 taraf yaitu

:

k_1 = gabah

k_2 = beras pecah kulit

2. Anak Petak : Faktor konsentrasi ozonisasi (O) yang terdiri dari 4 taraf yaitu

:

o_1 = 0 ppm

o_2 = 2 ppm

o_3 = 4 ppm

o_4 = 6 ppm

III.2.3 Rancangan Percobaan

Rancangan percobaan yang digunakan pada penelitian ini adalah Rancangan Petak Terbagi (*Split Plot Design*) dengan dasar Rancangan Acak Kelompok (RAK) sebagai berikut.

Tabel III.1 Model Eksperimental Interaksi Pola Faktorial (2x4) dalam Rancangan Petak Terbagi (RPT) dengan 3 kali Ulangan

Kondisi Beras (A) sebagai Petak Utama	Ulangan	Konsentrasi Ozon (B) sebagai Anak Petak			
		0 ppm	2 ppm	4 ppm	6 ppm
Gabah (a_1)	1	a_1b_1	a_1b_2	a_1b_3	a_1b_4
	2	a_1b_1	a_1b_2	a_1b_3	a_1b_4
	3	a_1b_1	a_1b_2	a_1b_3	a_1b_4

Kondisi Beras (A) sebagai Petak Utama	Ulangan	Konsentrasi Ozon (B) sebagai Anak Petak			
		0 ppm	2 ppm	4 ppm	6 ppm
Sub Total		$\Sigma a_1 b_1$	$\Sigma a_1 b_2$	$\Sigma a_1 b_3$	$\Sigma a_1 b_4$
Rata-Rata					
Beras Pecah Kulit (a_2)	1	$a_2 b_1$	$a_2 b_2$	$a_2 b_3$	$a_2 b_4$
	2	$a_2 b_1$	$a_2 b_2$	$a_2 b_3$	$a_2 b_4$
	3	$a_2 b_1$	$a_2 b_2$	$a_2 b_3$	$a_2 b_4$
Sub Total		$\Sigma a_2 b_1$	$\Sigma a_2 b_2$	$\Sigma a_2 b_3$	$\Sigma a_2 b_4$
Rata-Rata					
Total		$\Sigma a_1 b_1 + \Sigma a_2 b_1$	$\Sigma a_1 b_2 + \Sigma a_2 b_2$	$\Sigma a_1 b_3 + \Sigma a_2 b_3$	$\Sigma a_1 b_4 + \Sigma a_2 b_4$
Rata-Rata					
Kelompok		1	2	3	4
Total					

Sumber : (Gasperz, 2006)

Rancangan percobaan dilakukan dengan tiga kali ulangan sehingga diperoleh plot sebanyak 24 plot percobaan (anak petak). Penelitian ini menggunakan dua faktor, yaitu Kondisi Beras (A) sebagai Petak Utama (*Main Plot*) dan Konsentrasi Ozon (B) sebagai Anak Petak (*Sub Plot*). Berdasarkan rancangan di atas dapat disusun denah tata letak (*layout*) percobaan *Split Plot 2x4* dengan 3 kali ulangan sebagai berikut.

Tabel III.2. *Layout* Percobaan dalam Rancangan Petak Terbagi (RPT)**Kelompok I**

a ₁				a ₂			
b ₄	b ₃	b ₂	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₁

Kelompok II

a ₂				a ₁			
b ₃	b ₄	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₁	b ₂

Kelompok III

a ₂				a ₁			
b ₂	b ₄	b ₃	b ₁	b ₄	b ₁	b ₂	b ₃

Model percobaan untuk penelitian ini adalah sebagai berikut :

$$Y_{ijk} = u + K_k + A_i + \delta_{ik} + B_j + (AB)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Keterangan :

Y_{ijk} = Nilai pengamatan (respons) pada kelompok ke-K yang memperoleh taraf ke-I dari faktor A dan taraf ke-j dari faktor B.

u = Nilai rata-rata yang sesungguhnya.

K_k = Pengaruh aditif dari kelompok ke-K.

A_i = Pengaruh aditif dari kelompok ke-K.

δ_{ik} = Pengaruh galat yang muncul pada taraf ke-I dari faktor A dalam kelompok ke-k, sering disebut galat petak utama (galat a).

B_j = Pengaruh aditif dari taraf ke-j faktor B.

β_j = Pengaruh perlakuan taraf ke-j faktor konsentrasi ozon

$(\alpha\beta)_{ij}$ = Pengaruh interaksi antara taraf ke-i faktor kondisi beras putih dan taraf ke-j faktor konsentrasi ozonisasi

$(AB)_{ij}$ = Pengaruh interaksi taraf ke-I faktor A dan taraf ke-j faktor B.

ϵ_{ijk} = Pengaruh galat pada kelompok ke-k yang memperoleh taraf ke-I faktor A dan taraf ke-j faktor B, sering disebut sebagai galat anakpetak (galat b)

III.2.4 Rancangan Analisis

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

Tabel III.3. Daftar Analisis Sidik Ragam Rancangan Petak Terbagi

Sumber Keragaman	Derajat Bebas (dB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F _{hitung}
PETAK UTAMA (<i>MAINPLOT</i>)				
Kelompok	r-1	JK(K)	JKK/(r-1)	-
Faktor A (Kondisi Beras)	a-1	JK(A)	JK(A)/(a-1)	KT(A)/KT (Galat a)
Galat a (Galat Kondisi Beras)	(a-1)(r-1)	JKG(a)	JK(Galat a)/(a-1)(r-1)	-
ANAK PETAK (<i>SUBPLOT</i>)				
Faktor B (Konsentrasi Ozonisasi)	b-1	JK(B)	JK(B)/(b-1)	KT(B)/KT(Galat b)
Interaksi (AB)	(a-1)(b-1)	JK(AB)	JK(AB)/(a-1)(b-1)	KT(AB)/KT(Galat b)
Galat b (Galat Konsentrasi Ozonisasi)	a(r-1)(b-1)	JKG(b)	JK(Galat b)/a(r-1)(b-1)	-
Total	abr-1	JKT	-	-

Sumber : (Gaspersz, 1995 yang dimodifikasi)

Selanjutnya ditemukan hipotesis yang diterima, yaitu :

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

III.2.5 Rancangan Respon

Rancangan respon yang dilakukan pada penelitian beras germinasi yang sudah dilakukan ozonisasi terdiri dari respon fisikokimia.

III.2.5.1. Respon Fisik

Analisis respon fisik terhadap produk beras germinasi yang telah dilakukan ozonisasi yaitu uji densitas Kamba menurut Banuera et al. (2020), uji (%) rendemen menurut Yuriah et al. (2015), uji (%) germinasi menurut Elfiani (2015), uji derajat putih menurut Yasmin et al. (2023), analisis RVA menurut Herbishy (2024), dan analisis morfologi permukaan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) mengacu pada Rohmah et al (2022).

III.2.5.2. Respon Kimia

Analisis respon kimia terhadap produk beras germinasi yang telah dilakukan ozonisasi yaitu analisis proksimat yang meliputi kadar air mengacu pada AOAC (2006), kadar pati mengacu pada Ifmaily (2018), analisis aktivitas antioksidan mengacu pada Pratiwi et, al (2010), dan analisis kadar gula pereduksi mengacu pada Suedy et al, (2023).

III.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan pada penelitian ini, meliputi :

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 (k_2) untuk memisahkan antara beras pecah kulit dengan kulit tanduk atau sekamnya.

3. Perendaman Awal

Perendaman awal dilakukan agar kadar air yang terkandung dalam beras lebih dari 14% dan bertujuan untuk melunakkan lapisan luar gabah (k_1) dan beras pecah kulit (k_2), air diganti selama 6 jam sekali.

4. Penirisan

Proses penirisan dilakukan untuk meniriskan dan membuang aquades sisa perendaman pada sampel gabah (k_1) dan beras pecah kulit (k_2).

5. Proses Ozonisasi

Proses ozonisasi menggunakan berbagai macam variasi konsentrasi yaitu 0,2,4,6 ppm berfungsi untuk mengoksidasi senyawa anti-nutrisi seperti asam fitat pada permukaan beras, serta memperbaiki porositas lapisan perikarp guna memfasilitasi penyerapan air yang lebih efisien selama fase germinasi selanjutnya.

6. Perendaman

Perendaman dilakukan dengan merendam gabah dan BPK dengan perbandingan 1 : 2 dengan aquades. Perendaman berfungsi menghidrasi sel-sel pada gabah (k_1) dan beras pecah kulit (k_2) 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 6 jam sekali.

7. Penirisan

Penirisan berfungsi untuk meniriskan dan membuang aquades steril sisa perendaman pada gabah (k_1) dan beras pecah kulit (k_2).

8. Pembilasan

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

9. Proses Germinasi

Proses germinasi dilakukan dalam kondisi gelap pada suhu ruang selama 24 jam di atas baki yang telah diberi alas kain lap hingga muncul tunas sepanjang 2-3 mm.

10. Pengeringan

Pengeringan dilakukan setelah proses germinasi selesai dilakukan, dengan menggunakan oven pada suhu 55°C selama 12 jam sampai kadar air mencapai sekitar 14%.

11. Pengupasan Kulit/*Hulling*

Sampel gabah (k_1) dilakukan pengupasan kulit/*Hulling* untuk menghilangkan sekam, sehingga dihasilkan beras pecah kulit, hal tersebut dilakukan untuk memudahkan dalam analisis respon.

12. Analisis Fisik

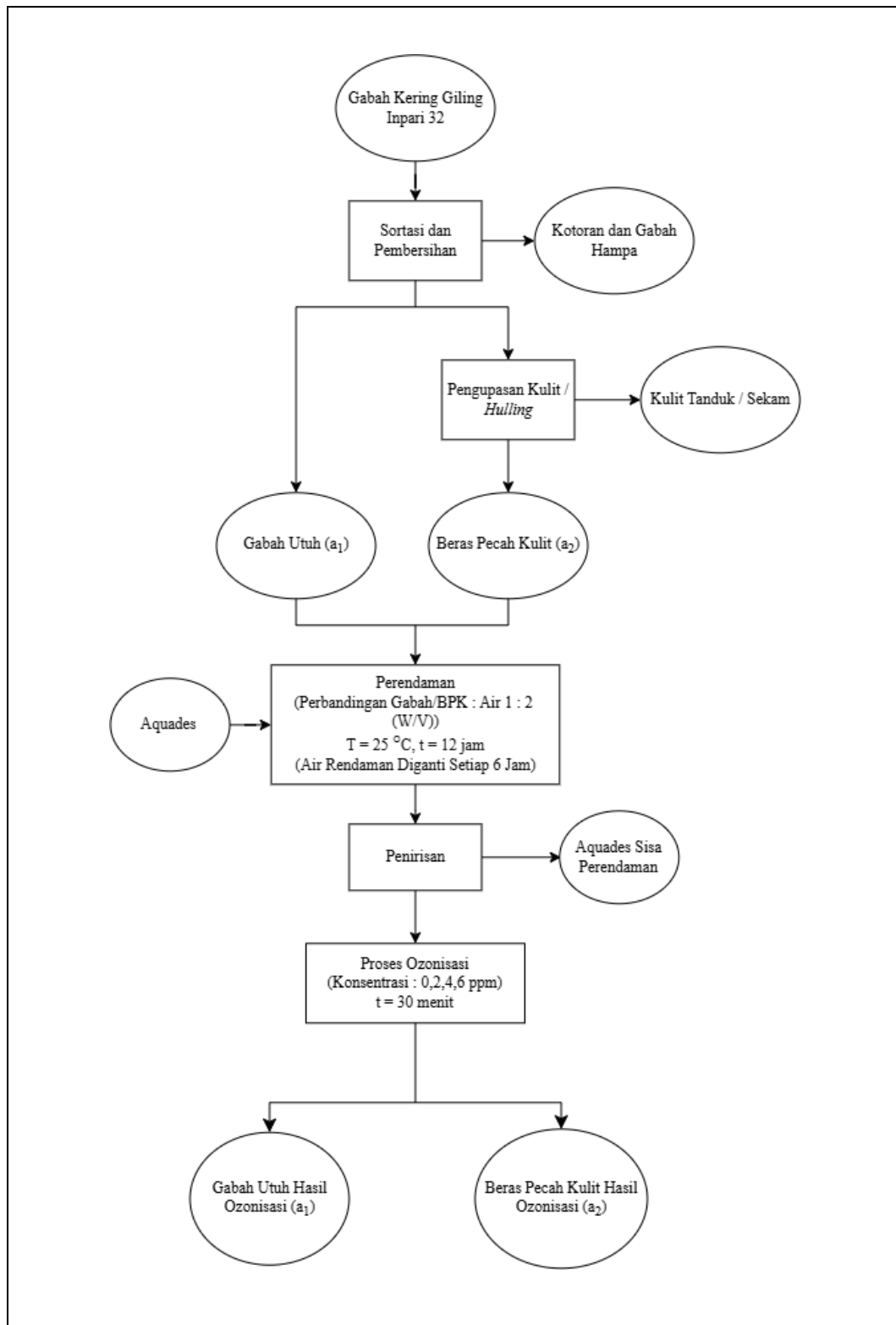
Sampel beras pecah kulit hasil perkecambahan (k_1 dan k_2) utuh dilakukan analisis respon fisik.

13. Penghancuran dan Pengayakan

Pada sampel gabah (k_1) dan sampel beras pecah kulit (k_2) dilakukan penghancuran dan pengayakan dengan menggunakan *mesh* 60. Hal tersebut dilakukan untuk mempermudah analisis respon pada kimia.

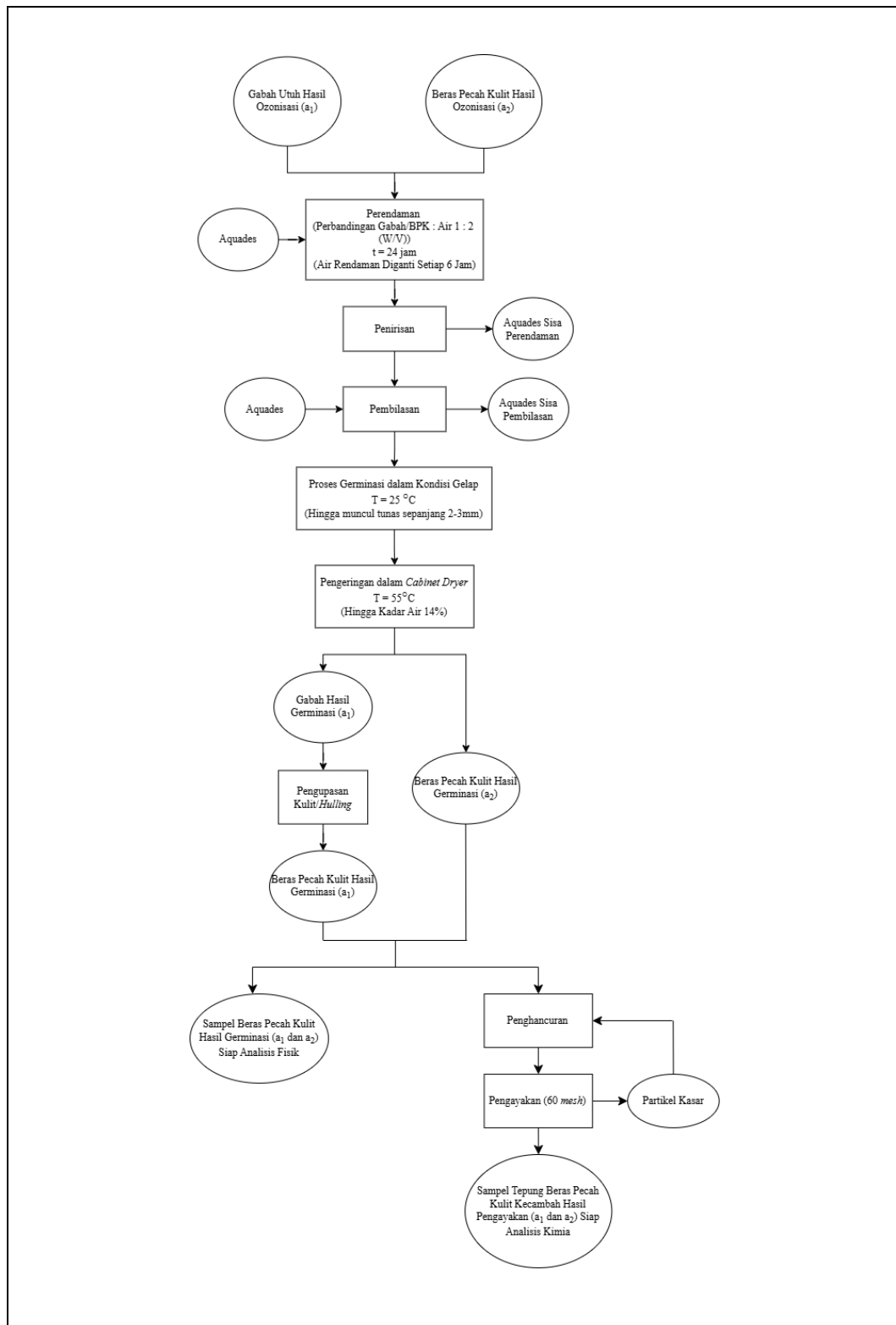
14. Analisis Kimia

Sampel tepung beras pecah kulit hasil germinasi (k_1) dan (k_2) dilakukan pengujian analisis kimia.



Gambar III.1 Diagram Alir Prosedur Penelitian 1

(Sumber : (Triwitono, 2024))



Gambar III.2 Diagram Alir Prosedur Penelitian 2
(Sumber : (Triwitono, 2024))

III.4 Jadwal Pelaksanaan Penelitian

Tabel III.4. Jadwal Pelaksanaan Penelitian

No.	Uraian Kegiatan	2025		2026						
		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 I									
4.	Proses Bimbingan dengan Pembimbing II									
5.	Seminar Usulan Penelitian									
6.	Pelaksanaan Penelitian									
7.	Pengolahan Data Hasil Penelitian									
8.	Proses Bimbingan dengan Pembimbing I									
9.	Proses Bimbingan dengan Pembimbing II									
10.	Sidang Tugas Akhir									
11.	Publikasi Jurnal									

Bab IV Hasil dan Pembahasan

Bab ini akan menguraikan mengenai: (IV.1) Hasil Penelitian, meliputi (IV.1.1) Respon Fisik, dan (IV.1.2) Respon Kimia.

IV.1 Hasil Penelitian

Penelitian dimulai dari proses pembuatan beras putih germinasi dimana diawali dengan tahapan sortasi gabah kering giling varietas Inpari 32 yang kemudian dibagi menjadi dua kondisi fisik bahan, yaitu bentuk Gabah Utuh (a_1) dan Beras Pecah Kulit (a_2). Kedua jenis bahan tersebut kemudian dilakukan proses perendaman selama 12 jam dan dilakukan proses ozonisasi dengan variasi konsentrasi 0 ppm, 2 ppm, 4 ppm, dan 6 ppm, selama 30 menit.

Pemilihan rentang konsentrasi rendah (0 – 6 ppm) didasarkan pada kondisi sampel yang lembap atau basah pasca perendaman, bukan bahan kering. Ozon dalam media basah terdekomposisi jauh lebih cepat dibanding fase gas kering, waktu paruhnya dalam air murni hanya 20 – 30 menit pada suhu 20 °C (F. Zhu, 2018), karena adanya kadar air tinggi mempercepat reaksi ozon dengan komponen organik permukaan bahan (Sitoe et al., 2025).

Selain itu, densitas ozon (2,14 kg/m³) yang lebih besar daripada udara (1,43 kg/m³) menyebabkan ozon cenderung lebih resisten mengalir vertikal dan lebih mudah berdifusi lateral (Pandiselvam et al., 2017), sehingga pada bahan lembap yang permukaannya lebih reaktif, distribusi ozon ke seluruh bagian biji menjadi lebih sulit dikendalikan apabila digunakan konsentrasi tinggi. Konsentrasi tinggi pada kondisi basah juga berisiko menyebabkan ozon terdekomposisi masif sebelum berinteraksi optimal dengan seluruh permukaan, sekaligus memicu efek fitotoksik akibat ROS berlebih dalam waktu singkat.

Hal ini sejalan dengan konsep CT (*concentration x time*) dari Sarron et al. (dalam Sitoe et al., 2025) di mana konsentrasi rendah dengan waktu paparan cukup

dapat menghasilkan efek setara konsentrasi tinggi dalam waktu singkat, namun kesetaraan ini tidak berlaku *universal*, sebagaimana ditunjukkan McDonough et al. (dalam Kaur et al., 2023) bahwa *T. castaneum* memerlukan CT 256.500 ppm/menit dan *P. interpunctella* 183.000 ppm/menit untuk mencapai mortalitas 100%, membuktikan bahwa efek ozon sangat bergantung pada kombinasi dosis dan waktu spesifik, bukan konsentrasi tunggal. Konsentrasi tinggi dan waktu singkat juga terbukti lebih fitotoksik dibanding konsentrasi rendah dalam waktu yang lama (Souza & Pagliuso, dalam Siteo et al., 2025).

Dengan demikian, rentang 0 hingga 6 ppm dipilih sebagai strategi memperoleh efek oksidatif ozon yang terkendali dan bersifat elisitor pada bahan lembap, tanpa menimbulkan kerusakan fisiologis berlebih, sekaligus konsisten dengan praktik laboratorium umum, di mana meski metode *corona discharge* mampu menghasilkan ozon hingga 6% dari oksigen murni (Guzel-Seydim et al, dalam Zhu, 2018), aplikasi skala kecil biasanya dioperasikan pada taraf ppm jauh lebih rendah demi kestabilan proses dan keamanan operator, mengingat paparan di atas 0,1 – 0,3 ppm pada udara ambien sudah dikategorikan berisiko bagi saluran pernafasan manusia.

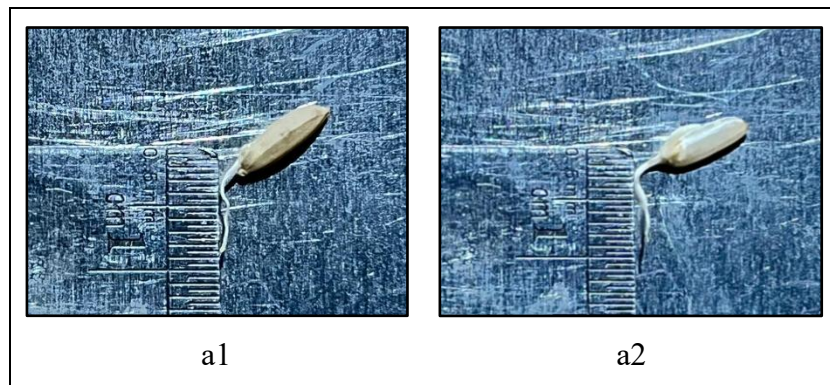
Berdasarkan hasil pengamatan fisik setelah proses ozonisasi, paparan gas ozon tidak memicu perubahan karakteristik yang signifikan pada kedua jenis bahan. Warna permukaan tetap seragam pada seluruh taraf konsentrasi, gabah (a1) mempertahankan warna kuning keemasan alami, sedangkan beras pecah kulit (a2) tetap konstan pada warna agak putih sejak 0 hingga 6 ppm. Hal ini juga sejalan dengan prinsip bahwa struktur mikropori atau permukaan berserat pada bahan pangan menyerap ozon lebih banyak, sedangkan *pericarp* atau sekam yang tebal menghambat masuknya ozon ke jaringan dalam (Kaur et al., 2023), menjelaskan mengapa gabah bersekam menunjukkan perubahan visual yang lebih minimal dibanding beras pecah kulit yang permukaannya langsung terekspos.



Gambar IV.1 Gabah (a1) dan Beras Pecah Kulit (a2) Hasil Ozonisasi

Tidak tercium pula aroma khas ozon pada kedua sampel, sejalan dengan Kaur et al. (2023) yang melaporkan waktu paruh ozon pada gabah hanya sekitar 6,32 menit karena cepat terurai menjadi oksigen bebas setelah bereaksi dengan komponen organik bahan, konsisten dengan mekanisme dua fase reaksi ozon dan biji di mana fase awal berupa reaksi cepat dengan sisi aktif permukaan yang menurunkan konsentrasi tajam, diikuti fase kedua berupa aliran ozon yang lebih stabil setelah sisi aktif jenuh (Pandiselvam et al., 2017). Hal ini menegaskan bahwa pada kondisi bahan lembap, ozon memang didesain terdekomposisi cepat setelah bereaksi, tidak menyisakan residu atau bau menyengat pada produk akhir, sesuai karakteristik ozon sebagai *green technology* yang tidak meninggalkan jejak kimiawi (F. Zhu, 2018).

Setelah fase ozonisasi, seluruh sampel melewati tahap hidrasi melalui perendaman menggunakan aquades untuk mengaktifkan kembali enzim hidrolitik internal, kemudian dilakukan penirisan dan inkubasi dalam kondisi gelap total pada suhu ruang untuk memicu proses perkecambahan. Perkecambahan dilakukan hingga tunas mencapai panjang 2-5 mm selama 36 jam, sesuai dengan penelitian dari Munarko et al (2019).



Gambar IV.2. Gabah (a1) dan Beras Pecah Kulit (a2) Hasil Germinasi

Setelah dilakukan perkecambahan kemudian dilakukan pengeringan sampai dengan kadar air gabah (a1) dan beras pecah kulit (a2) mencapai 12-14%. Sampel gabah (a1) dan beras pecah kulit (a2) tersebut kemudian dianalisis respon fisiknya. Setelah dianalisis, kemudian ditepungkan dan diayak menggunakan mesh berukuran 60. Sampel gabah (a1) dan beras pecah kulit (a2) lalu dilakukan analisis respon kimia.

IV.1.1 Respon Fisik

Analisis respon fisik terhadap beras putih germinasi hasil ozonisasi yaitu densitas kamba, uji % rendemen, uji % germinasi, uji derajat putih serta uji profil gelatinisasi pati menggunakan RVA.

IV.1.1.1 Uji Densitas Kamba

Densitas kamba merupakan salah satu karakteristik fisik materi pangan yang krusial untuk dipahami dalam memproyeksikan sistem pengemasan, manajemen gudang (penyimpanan), serta mobilisasi distribusi. Komoditas pangan yang memiliki nilai densitas kamba rendah secara otomatis memerlukan volume ruang atau wadah penampung yang jauh lebih luas daripada komoditas dengan nilai densitas kamba yang tinggi untuk bobot massa yang setara (Sasmitaloka et al., 2020).

Selain itu, nilai densitas kamba dapat mempresentasikan persentase ruang *inter-granular* atau jumlah rongga kosong yang terbentuk di antara partikel-partikel tumpukan bahan. Peningkatan nilai densitas kamba suatu bahan mengindikasikan

bahwa susunan partikelnya semakin rapat sehingga volume rongga kosong di dalamnya menjadi seminimal mungkin. Parameter fisik ini sendiri sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti karakteristik varietas atau jenis bahan, tingkat kadar air, serta geometri bentuk dan dimensi ukuran bahan. Suatu bahan pangan dikategorikan sebagai produk yang kamba apabila memiliki nilai kerapatan *bulk* yang rendah, di mana penurunan nilai densitas kamba tersebut berbanding lurus dengan tingkat porositas yang semakin tinggi pada matriks tumpukan produk (Sasmitaloka et al., 2020).

Pengukuran nilai densitas kamba dilakukan dengan cara memasukkan butiran sampel ke dalam gelas ukur kapasitas tertentu hingga mencapai volume konstan. Wadah gelas ukur tersebut kemudian diketuk secara mekanis sebanyak 25 kali untuk meminimalkan rongga udara antar butiran sebelum massa bahan ditimbang menggunakan timbangan analitik. Nilai densitas kamba selanjutnya dihitung menggunakan rumus matematis yaitu $\text{Densitas Kamba} = ((\text{Bobot sampel} + \text{Gelas Ukur}) - (\text{Bobot Gelas Ukur})) / (\text{Volume Gelas Ukur})$ (Pudjihastuti et al., 2021).

Secara teoritis, kondisi bahan diduga akan memberikan pengaruh nyata terhadap densitas kamba, mengingat perbedaan struktur fisik antara gabah bersekam dan beras pecah kulit tanpa sekam akan memengaruhi porositas dan volume ruhan tumpukan. Konsentrasi ozon pada rentang rendah (0–6 ppm) dalam kondisi bahan lembap tidak diduga memberikan efek nyata terhadap densitas kamba, mengingat parameter ini lebih ditentukan oleh struktur fisik makro (ukuran, bentuk, keberadaan sekam) dibandingkan reaksi kimia oksidatif dari ozon.

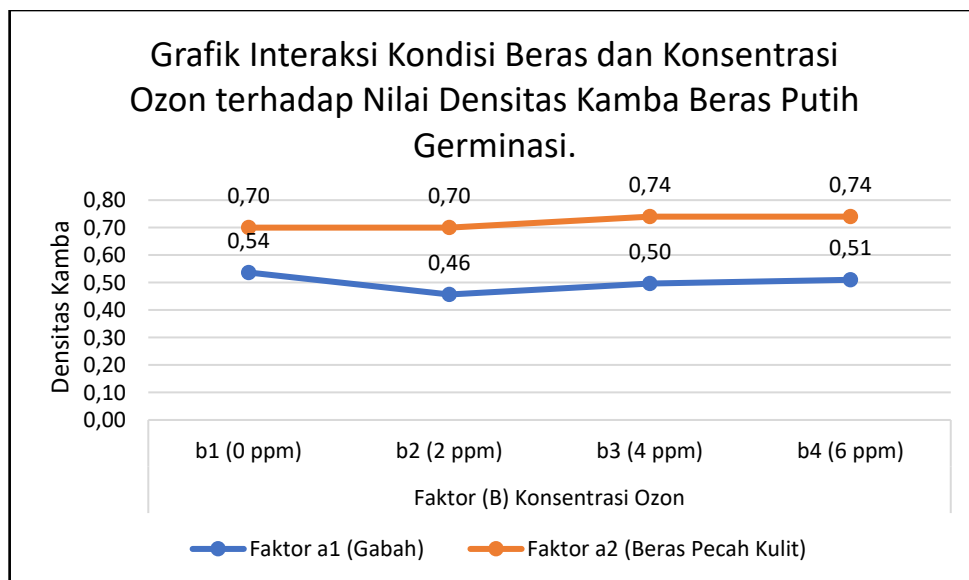
Berdasarkan hasil analisis variansi (ANAVA) menunjukkan bahwa perlakuan faktor A (kondisi beras) memberikan pengaruh nyata ($p < 0,05$) terhadap nilai densitas kamba beras putih germinasi varietas Inpari 32, sedangkan faktor B (konsentrasi ozon) maupun interaksi antara kedua faktor (AB) tidak memberikan pengaruh nyata pada densitas kamba beras putih germinasi.

Tabel IV.1 Pengaruh Kondisi Bahan (faktor A) terhadap Nilai Densitas Kamba Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32

Kondisi Bahan (A)	Rata-rata	Taraf Nyata 5%
a1 (Gabah)	0,50 ± 0,041	a
a2 (Beras Pecah Kulit)	0,72 ± 0,033	b

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

Notasi pada Tabel IV.1 menggunakan huruf kecil karena hanya faktor tunggal A (kondisi bahan) yang berpengaruh nyata terhadap densitas kamba, huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata, sedangkan huruf berbeda menunjukkan berbeda nyata pada taraf 5%. Berdasarkan tabel tersebut, faktor kondisi bahan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai densitas kamba, di mana kelompok perlakuan beras pecah kulit (a2) secara nyata memiliki rata-rata densitas kamba yang lebih tinggi dibandingkan dengan kelompok perlakuan gabah (a1). Pola tersebut juga tergambar pada grafik interaksi kondisi beras dan konsentrasi ozon terhadap nilai densitas kamba berikut ini:



Gambar IV.3. Grafik Interaksi Kondisi Beras dan Konsentrasi Ozon terhadap Nilai Densitas Kamba Beras Putih Germinasi

Berdasarkan grafik, garis a2 (beras pecah kulit) secara konsisten berada di atas garis a1 (gabah) pada seluruh taraf konsentrasi ozon (b1 hingga b4), dengan nilai densitas kamba a2 berkisar antara 0,70 – 0,74 g/ml, sedangkan a1 berkisar antara 0,46 – 0,54 g/ml. Kedua garis tersebut relatif sejajar dan tidak menunjukkan perpotongan di sepanjang taraf konsentrasi ozon, yang mengindikasikan bahwa pola perbedaan antara kondisi bahan bersifat konsisten pada setiap level ozon. Hal ini mendukung hasil ANAVA yang menyatakan bahwa interaksi antara faktor A dan faktor B tidak berpengaruh nyata, karena efek kondisi bahan terhadap densitas kamba tidak berubah arah maupun besarnya seiring perubahan konsentrasi ozon.

Meskipun garis a1 sempat mengalami sedikit penurunan pada titik b2 (2 ppm, 0,46 g/ml) sebelum kembali naik di b3 dan b4, fluktuasi ini kemungkinan besar merupakan variasi acak akibat ketidakseragaman ukuran dan bentuk butir gabah antar ulangan, bukan efek sistematis dari ozon, mengingat pola tersebut tidak konsisten arah naik-turunnya dan berada dalam rentang deviasi yang kecil (perbedaan maksimum hanya 0,08 g/ml antar taraf konsentrasi). Dengan demikian, rentang fluktuasi keseluruhan pada kedua kondisi beras tetap tergolong kecil (a1: 0,46–0,54 g/ml; a2: 0,70–0,74 g/ml), sehingga tidak cukup besar untuk menghasilkan pengaruh konsentrasi ozon yang nyata secara statistik terhadap densitas kamba, baik pada gabah maupun beras pecah kulit.

Perbedaan nyata antara a1 dan a2 disebabkan oleh adanya modifikasi struktur fisik makro dan morfologi permukaan tumpukan bahan setelah melalui proses pengupasan sekam. Menurut Zareiforush et al. (2011 dalam Meera et al., 2019) keberadaan sekam dan bulu gabah pada gabah memakan ruang lebih besar sehingga tumpukan menjadi kamba, meningkatkan volume ruahan, dan menurunkan densitas kamba. Temuan ini sejalan dengan Mir et al. (2013 dalam Meera et al., 2019) yang menjelaskan bahwa densitas kamba gabah secara konsisten lebih rendah daripada

varietas berasnya. Selain sekam, Bhattacharya (2011 dalam Meera et al., 2019) menambahkan bahwa bentuk biji yang semakin ramping akan meningkatkan porositas *inter-granular* sehingga menurunkan nilai densitas kamba bahan.

Nilai densitas kamba pada penelitian ini juga konsisten dengan pola yang dilaporkan pada varietas beras lain. Meera et al. (2019) melaporkan bahwa densitas kamba gabah (paddy) berkisar antara 0,49 g/ml (varietas Thengaipoo Samba) hingga 0,64 g/ml (varietas Rathasali), sedangkan pada beras pecah kulit (brown rice) nilainya jauh lebih tinggi, yaitu 0,76 g/ml (Kalanamak) hingga 0,87 g/ml (Thengaipoo dan Palkudavazhai). Pola serupa juga dilaporkan Mir et al. (2013 dalam Meera et al., 2019) di mana densitas kamba gabah (0,49–0,59 g/ml) secara konsisten lebih rendah dibandingkan beras pecah kulit (0,73–0,81 g/ml). Nilai densitas kamba pada penelitian ini (a1: 0,46–0,54 g/ml; a2: 0,70–0,74 g/ml) berada pada rentang yang sebanding dengan kedua studi tersebut, memperkuat bahwa perbedaan nyata antara gabah dan beras pecah kulit merupakan karakteristik fisik intrinsik akibat keberadaan sekam, konsisten pada berbagai varietas beras, dan tidak dipengaruhi oleh perlakuan germinasi maupun ozonisasi yang diterapkan pada penelitian ini.

Di sisi lain, variasi konsentrasi ozon (0, 2, 4, dan 6 ppm) tidak berpengaruh nyata karena stabilitas ozon sangat dipengaruhi oleh kadar air bahan. Menurut Siteo et al. (2025), pada kadar air tinggi atau kondisi lembap, ozon terdekomposisi jauh lebih cepat. Hal ini dibuktikan dari waktu paruh ozon pada sampel berkadar air tinggi (14,4 g 100 g⁻¹) yang hanya 11,61 menit, nyata lebih singkat dibandingkan sampel berkadar air rendah (11,4 g 100 g⁻¹) yang mencapai 13,80 menit.

Dengan demikian, karena ozonisasi pada penelitian ini dilakukan pada sampel yang lembap, perbedaan konsentrasi ozon 0, 2, 4, dan 6 ppm diduga tidak menghasilkan perbedaan paparan efektif yang cukup besar untuk mengubah densitas kamba secara nyata. Sebaliknya, kondisi fisik awal bahan lebih dominan memengaruhi nilai densitas kamba, karena aliran ozon dalam *bulk* beras juga dipengaruhi oleh

bulk density dan porositas awal sampel, serta sulitnya mempertahankan konsentrasi dan distribusi yang stabil dalam tumpukan beras (Pandiselvam et al., 2017).

IV.1.1.2 Uji (%) Rendemen

Rendemen menurut Senduk et al., (2020) merupakan rasio antara bobot kering produk yang diperoleh dengan bobot total bahan baku yang digunakan, sekaligus mencerminkan efisiensi proses dan indikator kehilangan bahan selama produksi. Nilai rendemen pada beras putih germinasi dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik yang bersifat biokimia (aktivasi enzim, perombakan pati dan protein, serta perubahan struktur endosperma selama perkecambahan) (Charoenthaikij et al., 2009; Ohtsubo et al., 2005), maupun faktor fisik-struktural bahan baku itu sendiri.

Berdasarkan hasil analisis variansi (ANOVA), perlakuan faktor A (Kondisi Beras) memberikan pengaruh yang sangat nyata ($p < 0,05$) terhadap nilai rendemen beras putih germinasi varietas Inpari 32, sedangkan faktor B (Konsentrasi Ozon) maupun interaksi antara keduanya (AB) tidak memberikan pengaruh yang nyata.

Tabel IV.2. Pengaruh Kondisi Bahan (Faktor A) terhadap Nilai Rata-rata (%) Rendemen Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32

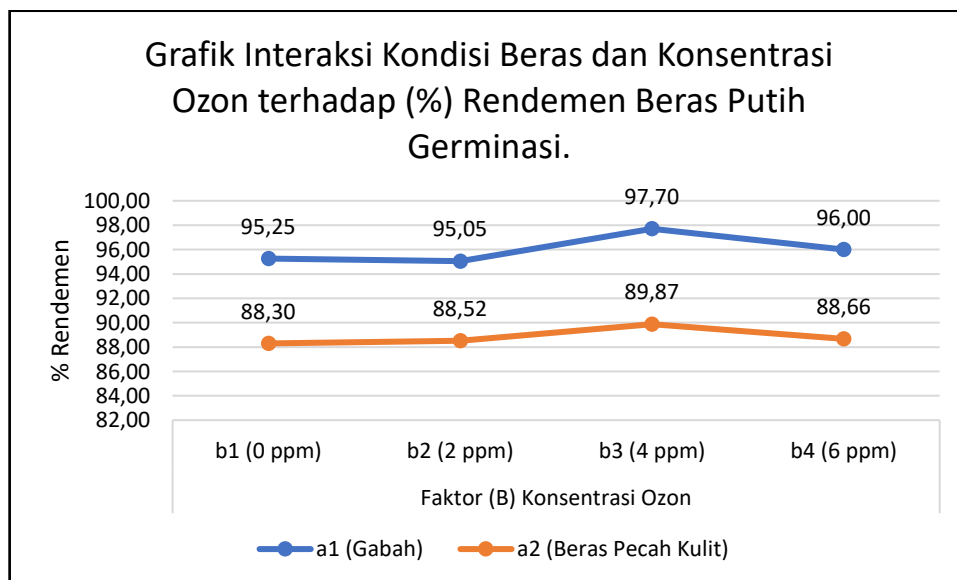
Kondisi Bahan (A)	Rata-rata	Taraf Nyata 5%
a1 (Gabah)	96,00 ± 1,95	a
a2 (Beras Pecah Kulit)	88,84 ± 2,24	b

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

Notasi pada Tabel IV.2 menggunakan huruf kecil karena hanya faktor tunggal A (kondisi bahan) yang berpengaruh nyata terhadap rendemen, huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata, sedangkan huruf berbeda menunjukkan berbeda nyata pada taraf 5%. Berdasarkan tabel tersebut, faktor kondisi bahan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai rendemen, di mana kelompok perlakuan

gabah (a1) secara nyata memiliki rata-rata rendemen yang lebih tinggi dibandingkan dengan kelompok perlakuan beras pecah kulit (a2).

Berdasarkan Tabel IV.2., faktor kondisi bahan menunjukkan pengaruh yang signifikan, di mana kelompok perlakuan gabah (a1) secara konsisten menghasilkan persentase rendemen yang nyata lebih tinggi (berkisar antara 95,05% hingga 97,70%) dibandingkan dengan kelompok beras pecah kulit (a2) yang hanya berkisar 88,30% hingga 89,87%. Pola ini juga terlihat jelas pada grafik interaksi kondisi beras dan konsentrasi ozon terhadap (%) Rendemen berikut:



Gambar IV.4. Grafik Interaksi Kondisi Beras dan Konsentrasi Ozon terhadap Nilai (%) Rendemen Beras Putih Germinasi

Berdasarkan grafik, garis a1 (gabah) secara konsisten ozon (b1 hingga b4), tanpa titik perpotongan (*crossing*) di sepanjang perlakuan. Hal ini menunjukkan bahwa keunggulan rendemen pada gabah bersifat konsisten pada setiap level konsentrasi ozon, sejalan dengan hasil ANAVA yang menyatakan interaksi AXB tidak berpengaruh nyata. Kedua garis juga menunjukkan pola pergerakan yang serupa (naik dari b1 ke b3, lalu turun di b4), yang mengindikasikan bahwa respons

terhadap konsentrasi ozon relatif sama pada kedua kondisi bahan, meski secara statistik variasi ini tidak signifikan. Pola konsisten ini sesuai dengan dugaan awal, mengingat gabah masih memiliki lapisan sekam utuh yang secara fisik melindungi endosperma dan aleuron dari kontak langsung dengan air rendaman maupun gas ozon, sehingga potensi kehilangan bahan terlarut diperkirakan lebih kecil dibandingkan beras pecah kulit yang telah kehilangan lapisan pelindung tersebut. Tingginya nilai rendemen pada kondisi gabah ini didukung oleh keberadaan lapisan sekam yang menyumbang sekitar 20% dari total bobot padi sekaligus berfungsi sebagai pelindung mekanis alami (Mihretu, 2025).

Selain itu, gabah memiliki karakteristik kekerasan mekanis yang jauh lebih tinggi (418,11-594,88 N) dibandingkan dengan beras pecah kulit (200,09-395,99 N), sehingga memberikan ketahanan terhadap pecah (*breakage resistance*) yang lebih baik selama proses (Meera et al., 2019). Tanpa adanya pelindung sekam, lapisan aleuron dan endosperma pada beras pecah kulit terpapar langsung oleh air dan gas ozon. Sifat ozon sebagai oksidator kuat kemudian memicu disrupsi jaringan dan pembentukan celah mikro pada struktur beras pecah kulit yang memfasilitasi pelarutan padatan terlarut ke dalam air rendaman secara masif, sehingga secara nyata menurunkan total bobot bahan kering dan rendemen akhirnya (Kaur et al., 2023). Pola kehilangan bobot akibat penanganan pascapanen ini turut sejalan dengan temuan Yustina et al. (2024) yang melaporkan bahwa kehilangan hasil sejak tahap pengumpulan hingga pengeringan gabah dapat mencapai 5,49%, serta menegaskan bahwa ketebalan kulit gabah dan ukuran butir turut menentukan besarnya rendemen yang diperoleh memperkuat argumen bahwa faktor fisik-struktural bahan baku, dan bukan semata perlakuan tambahan seperti ozonasi, menjadi determinan utama nilai rendemen.

Secara teoritis, germinasi diharapkan menghasilkan rendemen yang lebih rendah dibandingkan proses non-germinasi, karena perendaman dan perkecambahan memicu pelarutan komponen terlarut (gula pereduksi, asam amino, mineral) ke media rendam serta respirasi embrio yang mengonsumsi cadangan energi biji

(Charoenthaikij et al., 2009). Namun, sebagai pembanding, rendemen non-germinasi pada level setara justru lebih rendah. Lestari & Kurniawan (2021) melaporkan rendemen BPK sebesar 73,94% dari gabah varietas IPB 3S (kadar air 14,55%; gabah hampa/kotoran 1,64%), sementara Yustina et al. (2024) melaporkan rendemen BPK sebesar 72,49% pada varietas Inpari 32 HDB. Kedua angka ini jauh di bawah rendemen germinasi pada penelitian ini (a1: 95,05–97,70%; a2: 88,30–89,87%). Selisih ini bukan berarti germinasi lebih efisien, melainkan karena perbedaan basis perhitungan, di mana rendemen penelitian ini dihitung sebelum tahap penyosohan/pembuangan dedak, sedangkan kedua nilai pembanding sudah melalui proses giling penuh. Hal ini sejalan dengan Lestari & Kurniawan (2021) bahwa rendemen giling ditentukan oleh mutu gabah (kadar butir hampa, kadar air optimal <14%), faktor fisik bahan baku, bukan perlakuan tambahan seperti germinasi/ozonasi, tetap menjadi determinan utama rendemen akhir.

Di sisi lain, perlakuan konsentrasi ozon pada rentang 0 hingga 6 ppm serta interaksinya dengan kondisi beras tidak memberikan pengaruh yang berbeda nyata ($p > 0,05$) terhadap persentase rendemen. Fenomena ini mengindikasikan bahwa variasi dosis ozon dalam batas tersebut masih bersifat *inert* atau tidak sampai mendegradasi komponen struktural makro karbohidrat secara ekstrem hingga memicu penyusutan berat bahan. Temuan ini sejalan dengan ulasan dari Trombete et al (2016, dalam Zhu, 2018) yang melaporkan bahwa aplikasi ozon pada biji-bijian tidak mengubah laju ekstraksi tepung maupun rendemen hasil akhir secara signifikan. Perlakuan pra-ozonasi pada biji-bijian umumnya lebih berdampak fungsional pada modifikasi sifat mekanis internal, seperti menurunkan kebutuhan energi pemecahan selama penggilingan, alih-alih mengubah kuantitas massa bahan secara makro (Kaur et al., 2023; F. Zhu, 2018).

Meskipun secara statistik tidak memberikan pengaruh yang nyata, terdapat tren respons yang konsisten di mana nilai rendemen tertinggi dicapai pada konsentrasi ozon 4 ppm, baik pada beras pecah kulit (89,87%) maupun gabah (97,70%). Pola naik-turun ini pada dasarnya sesuai dengan hipotesis awal penelitian, yaitu bahwa

ozon pada dosis rendah hingga sedang akan memberikan efek stimulatif (hormesis), sedangkan pada dosis berlebih akan berbalik menjadi efek merugikan. Kenaikan nilai rendemen pada dosis optimal ini dipicu oleh mekanisme stimulasi biologis akibat stres oksidatif ringan, di mana paparan ozon pada lapisan penutup biji memicu pensinyalan sel yang meningkatkan efisiensi metabolisme perkecambahan awal (Kaur et al., 2023). Peningkatan efisiensi metabolisme ini menyebabkan biji lebih optimal dalam mengonversi cadangan pati menjadi energi tanpa banyak kehilangan komponen terlarut ke media rendam, sehingga bobot kering produk akhir relatif terjaga. Selain itu, sifat anti mikroba dari ozon mampu menekan aktivitas mikroba kompetitor pembusuk yang berpotensi mendegradasi zat organik biji selama fase perendaman, sehingga turut mencegah kehilangan bahan akibat aktivitas metabolisme mikroba yang tidak diinginkan.

Namun, saat dosis ozon ditingkatkan hingga mencapai 6 ppm, nilai rendemen kembali mengalami penurunan, sesuai dengan dugaan bahwa dosis berlebih akan melewati ambang batas toleransi biologis jaringan biji. Paparan ozon berlebih di atas ambang batas optimum diketahui dapat merusak integritas membran plasma sel aleuron dan mereduksi aktivitas enzim-enzim metabolisme (Kaur et al., 2023). Kerusakan seluler ini meningkatkan permeabilitas jaringan yang memicu fenomena eksudasi atau kebocoran komponen intraseluler seperti gula pereduksi dan asam amino keluar menuju media rendaman, sehingga menekan angka persentase rendemen proses pada titik perlakuan tinggi. Dengan kata lain, tren naik–turun yang teramati pada rentang 0–6 ppm menggambarkan kurva respons dosis yang khas pada fenomena hormesis yaitu peningkatan ringan pada dosis rendah–sedang akibat efek stimulatif, diikuti penurunan pada dosis tinggi akibat efek toksik/oksidatif berlebih, meskipun secara statistik variasi ini belum cukup besar untuk dinyatakan berbeda nyata pada taraf 5%.

IV.1.1.3 Uji (%) Germinasi

Germinasi merupakan persentase biji yang berhasil berkecambah melalui proses perendaman, ditandai dengan tumbuhnya tunas sepanjang 1-5 mm (Saputra et al.,

2024). Pada beras germinasi, tingginya persentase kecambah sangat penting karena berkorelasi langsung dengan peningkatan gizi, terutama pembentukan senyawa fungsional *Gamma-Aminobutyric Acid* (GABA) yang menjadi keunggulan utama produk ini (Ohtsubo et al., 2005). Oleh karena itu, perlakuan elisitasi seperti paparan ozon harus diatur secara presisi agar merangsang perkecambahan, bukan malah mematikan embrio beras.

Secara teoritis, gabah dengan lapisan sekam utuh diharapkan mempertahankan daya kecambah yang lebih stabil di seluruh taraf konsentrasi ozon, karena sekam berfungsi sebagai penghalang fisik terhadap penetrasi gas ozon menuju embrio. Sebaliknya, beras pecah kulit yang embrionya sudah terekspos langsung diperkirakan jauh lebih rentan mengalami penurunan tajam seiring naiknya dosis ozon.

Berdasarkan hasil analisis ragam (ANAVA), perlakuan kondisi beras (faktor A), konsentrasi ozon (B), serta interaksi antara keduanya (AB) memberikan pengaruh yang berbeda nyata ($p < 0,05$) terhadap persentase germinasi beras putih varietas Inpari 32. Pengaruh interaksi dari kedua faktor tersebut disajikan lebih rinci dalam bentuk matriks kombinasi pada tabel dua arah:

Tabel IV.3. Dua Arah untuk Analisis (%) Germinasi Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32

Kondisi Beras (A)	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	87,33 ± 3,06	A	89,33 ± 3,06	B	82,67 ± 3,06	B	80,00 ± 3,06	B
	b		b		a		a	
a2 (Beras Pecah Kulit)	84,00 ± 2,00	A	50,67 ± 3,06	A	63,33 ± 3,06	A	6,00 ± 2,00	A
	d		b		c		a	

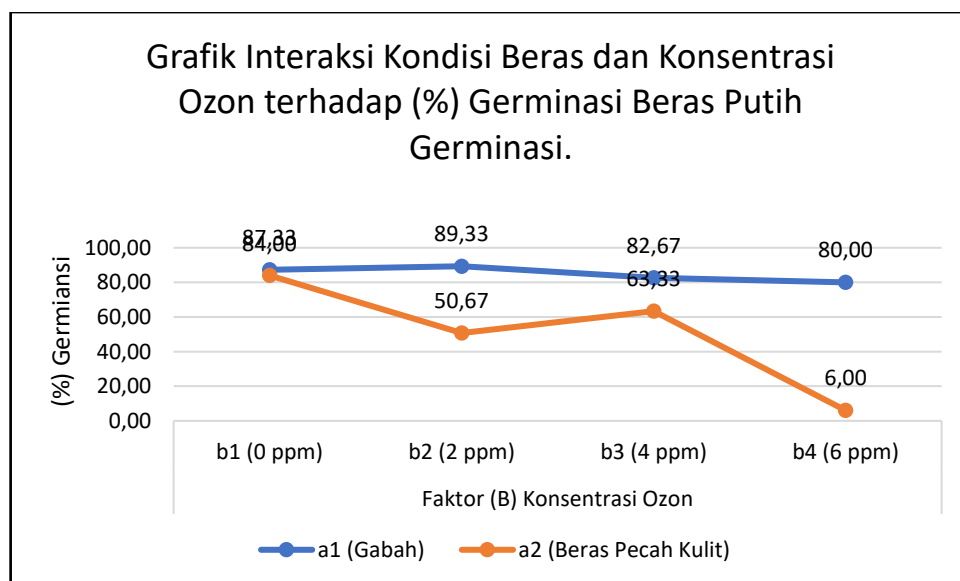
Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal)

Notasi pada Tabel IV.3 dibaca dua arah: huruf besar (A, B) di samping tiap nilai dibaca vertikal, membandingkan a1 dan a2 pada konsentrasi ozon yang sama, huruf kecil di bawahnya dibaca horizontal, membandingkan antar taraf ozon (b1–b4) pada kondisi bahan yang sama. Berdasarkan huruf besar, a1 dan a2 tidak berbeda nyata hanya pada 0 ppm (sama-sama A), namun berbeda nyata pada 2–6 ppm (a1 = B, a2 = A), menunjukkan efek proteksi sekam baru terlihat setelah bahan terpapar ozon. Berdasarkan huruf kecil, gabah (a1) hanya membentuk dua kelompok signifikansi (b1–b2 dan b3–b4), sedangkan beras pecah kulit (a2) seluruh taraf ozon berbeda nyata satu sama lain, menegaskan fluktuasi germinasinya jauh lebih tajam dan tidak stabil.

Data pada Tabel. IV.3. menunjukkan adanya perbedaan respons yang signifikan antara bahan baku yang masih memiliki pelindung sekam (gabah) dengan bahan baku yang sudah melewati penggilingan (beras pecah kulit) ketika dipaparkan pada konsentrasi ozon yang sama. Pada perlakuan kondisi gabah (a1), persentase germinasi menunjukkan pola yang relatif stabil dan tetap tinggi di atas 80%. Ketika bahan diberikan perlakuan ozon sebesar 2 ppm (a1b2), persentase germinasi mengalami sedikit kenaikan menjadi 89,33% jika dibandingkan dengan kondisi kontrol tanpa ozon atau 0 ppm (a1b1) (87,33%).

Peningkatan awal ini terjadi karena paparan ozon dosis rendah pada perlakuan 2 ppm mampu mengoksidasi senyawa penghambat perkecambahan yang ada di kulit biji, sehingga memicu rangkaian sinyal seluler yang menstimulasi perkecambahan (Kaur et al., 2023). Namun, saat konsentrasi ozon ditingkatkan menjadi 4 ppm (a1b3) (82,67%) dan 6 ppm (a1b4) (80,0%), persentase germinasi mulai menunjukkan penurunan. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya volume radikal bebas yang berhasil menembus jaringan biji sehingga melampaui kapasitas antioksidan internal benih dan memicu stres oksidatif yang mengganggu aktivitas enzim perkecambahan.

Meskipun demikian, penurunan pada kondisi gabah tidak berlangsung secara drastis karena adanya sekam yang berfungsi sebagai pelindung fisik. Sekam tersebut membatasi dan memperlambat penetrasi gas ozon secara langsung, sehingga sebagian besar embrio gabah tetap terlindungi dari kerusakan seluler yang parah (Pandiselvam et al., 2019). Untuk memperjelas perbedaan dan arah interaksi fluktuasi data antara kedua kondisi beras tersebut, dapat dilihat pada grafik:



Gambar IV.5. Grafik Interaksi Kondisi Beras dan Konsentrasi Ozon terhadap (%) Germinasi Beras Putih Germinasi

Berbeda drastis dengan gabah, grafik pada Gambar IV.5. mengilustrasikan penurunan persentase germinasi yang tajam dan fluktuatif pada kondisi beras pecah kulit (a2). Tanpa adanya proteksi dari sekam, jaringan embrio terekspos secara langsung oleh ozon yang merupakan agen pengoksidasi kuat. Beras pecah kulit kontrol (0 ppm) (a2b1) memiliki daya kecambah sebesar 84,00%, namun ketika diberi paparan ozon dosis terkecil sebesar 2 ppm (a2b2), nilai germinasinya langsung anjlok secara signifikan menjadi 50,67%. Penurunan ekstrem ini disebabkan oleh radikal bebas dari ozon yang merusak integritas membran sel

embrio serta mengganggu aktivitas enzim-enzim hidrolitik yang krusial bagi metabolisme awal perkecambahan (Kaur et al., 2023).

Meskipun demikian, terdapat pola yang tidak stabil berupa kenaikan persentase germinasi menjadi 63,33% pada perlakuan konsentrasi 4 ppm (a2b3). Secara ilmiah, fluktuasi ini dapat diidentifikasi sebagai bentuk respons adaptif atau fenomena hormesis, di mana tingkat cekaman oksidatif tertentu dalam batas tertentu justru menstimulasi mekanisme pertahanan internal benih, seperti aktivasi sistem perbaikan DNA atau stimulasi aktivitas antioksidan untuk memecah dormansi demi bertahan hidup (Pandiselvam et al., 2019). Namun, mekanisme pertahanan seluler tersebut runtuh sepenuhnya saat konsentrasi ozon ditingkatkan ke dosis maksimal 6 ppm (a2b4), yang menyebabkan persentase germinasi turun drastis hingga menyisakan 6,00% akibat terjadinya kerusakan oksidatif yang fatal pada jaringan meristematik embrio secara permanen (Pandiselvam et al., 2019).

Penurunan daya kecambah pada dosis ozon tinggi juga dapat dijelaskan lewat gangguan sistem α -amilase benih, yang berperan menghidrolisis pati cadangan endosperma sebagai sumber energi utama perkecambahan (Damaris et al., 2019). Sintesis α -amilase dipicu oleh hormon giberelin yang dilepaskan embrio ke lapisan aleuron; kerusakan oksidatif pada jaringan ini dapat mengganggu jalur pensinyalan tersebut sehingga pasokan energi bagi pertumbuhan radikula dan plumula menjadi tidak mencukupi. Damaris et al. (2019) mencatat bahwa cekaman abiotik seperti salinitas dan logam berat menurunkan aktivitas α -amilase dan menghambat perkecambahan, dan ozon dosis tinggi diduga bekerja melalui mekanisme oksidatif serupa. Hal ini sejalan dengan data pada beras pecah kulit (a2) yang endospermnya langsung terpapar tanpa pelindung sekam dan mengalami penurunan daya kecambah paling tajam.

Sebagai konteks pembandingan, variabilitas germinasi akibat tekanan lingkungan juga dilaporkan oleh Verma & Sandhu (2024) pada studi toleransi germinasi anaerobik padi, di mana kontrol positif berkecambah mulai hari ketujuh sementara

kontrol negatif sama sekali tidak berkecambah pada kondisi tergenang, dengan rata-rata persentase germinasi populasi uji berkisar 25,74–47,90% tergantung durasi dan tahun pengamatan. Meskipun jenis cekamannya berbeda (anaerobik, bukan oksidatif), temuan ini menegaskan pola umum bahwa germinasi padi sangat sensitif terhadap stres lingkungan dan dapat anjlok mendekati titik nol bila melampaui ambang toleransi benih, sebagaimana juga teramati pada penurunan drastis germinasi BPK hingga 6,00% pada ozon 6 ppm (a2b4) dalam penelitian ini.

Hasil penelitian ini memiliki kesesuaian yang kuat dengan literatur-literatur terkini mengenai aplikasi ozon pada komoditas serelia. Studi dari Wu et al. dalam Pandiselvam et al., (2019) mengonfirmasi bahwa paparan gas ozon secara terus-menerus memberikan efek merugikan pada kapasitas perkecambahan biji-bijian yang tidak memiliki proteksi fisik yang memadai.

Kajian yang diulas oleh Kaur et al., (2023) juga menegaskan bahwa batas toleransi serta retensi viabilitas benih terhadap paparan ozon sangat bergantung pada karakteristik struktur pelindung luar biji. Secara keseluruhan, hasil pembahasan ini membuktikan bahwa efektivitas penggunaan teknologi ozon pada keadaan sampel basah dalam memproduksi beras germinasi sangat ditentukan oleh kondisi gabah jauh lebih direkomendasikan karena sekam mampu menyaring masuknya radikal bebas, sehingga ozon dapat menjalankan fungsinya sebagai elisitor abiotik yang merangsang sintesis senyawa bioaktif tanpa merusak viabilitas benih.

IV.1.1.4 Uji Derajat Putih

Derajat putih (*whiteness*) merupakan parameter fisik visual krusial dalam menentukan mutu dan penerimaan konsumen terhadap beras. Derajat putih mengindikasikan tingkat kecerahan yang berkorelasi dengan kebersihan permukaan, profil pigmen, serta struktur granula pati dalam endosperma. Pada beras germinasi, kecerahan optimal tanpa warna kusam (kecokelatan/kekuningan) diharapkan karena memberikan persepsi produk segar dan berkualitas tinggi (Shah et al., 2013). Paparan ozon selama perendaman atau keadaan basah dapat

memodulasi warna beras secara signifikan karena sifatnya sebagai oksidator kuat yang mendegradasi pigmen alami maupun mengubah struktur makromolekul beras (F. Zhu, 2018).

Ketiga faktor (kondisi bahan, konsentrasi ozon, dan interaksinya) diduga berpengaruh nyata terhadap derajat putih: kondisi bahan karena sekam membatasi difusi ozon ke endosperma, konsentrasi ozon karena sifatnya sebagai oksidator pigmen yang *dose-dependent*, dan interaksi AB karena efek pemucatan versus pencokelatan ozon bergantung pada ada-tidaknya pelindung sekam sehingga dosis yang sama dapat memberi efek berlawanan pada a1 dan a2.

Berdasarkan hasil ANAVA, faktor A, B, dan interaksi AB memberikan pengaruh berbeda nyata ($p < 0,05$) terhadap derajat putih beras germinasi, menunjukkan bahwa efek pemucatan atau pencokelatan ozon bergantung pada ketersediaan struktur pelindung fisik bahan baku. Interaksi kedua faktor disajikan pada tabel berikut:

Tabel IV.4. Dua Arah untuk Analisis Derajat Putih Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32

Kondisi Beras (A)	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	80,66 ± 0,02	B	80,53 ± 0,01	B	80,58 ± 0,00	B	80,93 ± 0,01	B
	c		a		b		d	
a2 (Beras Pecah Kulit)	77,01 ± 0,01	A	75,21 ± 0,00	A	76,48 ± 0,01	A	75,91 ± 0,01	A
	d		a		c		b	

Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal)

Tabel di atas menyajikan hasil interaksi AB dengan dua jenis notasi sekaligus: huruf besar dibaca vertikal, membandingkan antar kondisi bahan (a1 vs a2) pada konsentrasi ozon yang sama, sedangkan huruf kecil dibaca horizontal,

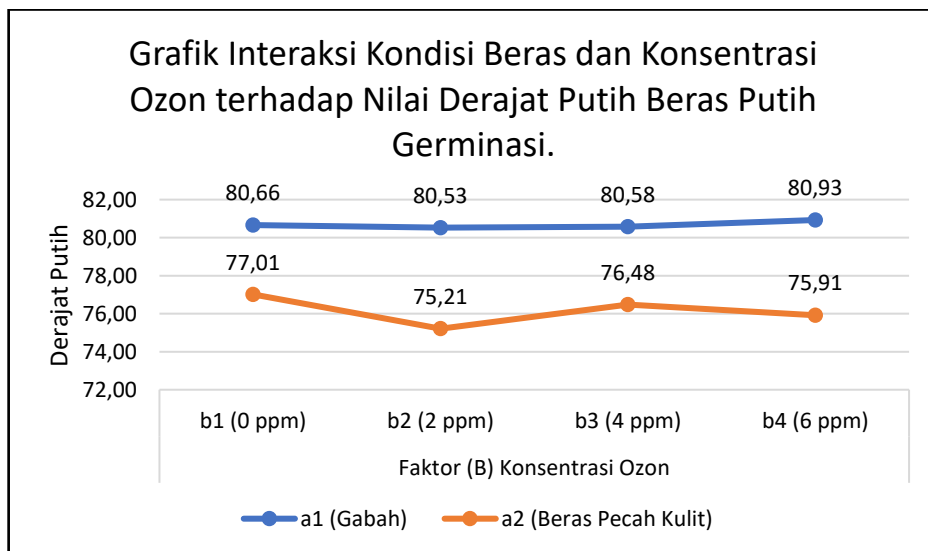
membandingkan antar taraf konsentrasi ozon pada kondisi bahan yang sama. Kedua notasi ini dibaca terpisah dan tidak boleh disilangkan, misalnya huruf besar A pada a2b1 hanya bermakna berbeda nyata dari a1b1 (bukan dari a1b2), sedangkan huruf kecil d pada a2b1 hanya bermakna berbeda nyata dari a2b2, a2b3, dan a2b4 (bukan dari a1).

Data pada Tabel IV.4 menunjukkan tren perubahan derajat putih pada gabah (a1) yang bergerak dalam rentang berdekatan namun memiliki pola fluktuasi spesifik. Pada kontrol 0 ppm (a1b1), derajat putih berada di 80,66%, menurun sedikit ke titik terendah 80,53% pada 2 ppm (a1b2), lalu naik kembali menjadi 80,58% pada 4 ppm (a1b3), dan mencapai puncaknya 80,93% pada 6 ppm (a1b4). Secara visual, selisih total hanya 0,4% ini membuat penampakan fisik antar perlakuan terlihat mirip dan hampir tidak menunjukkan perbedaan warna kontras. Meskipun demikian, uji lanjut BNT mendeteksi bahwa setiap perubahan konsentrasi memberikan pengaruh berbeda nyata ($p < 0,05$), didukung oleh presisi data yang sangat tinggi dengan SD 0,00–0,01.

Penurunan minor dari kontrol (a1b1) ke 2 ppm (a1b2) diduga terjadi akibat inisiasi awal reaksi oksidasi senyawa fenolik minor pada lapisan luar biji yang memicu penurunan mikroskopis kusam yang tertangkap alat (Shah et al., 2013). Namun, seiring peningkatan konsentrasi ke 4 ppm (a1b3) hingga 6 ppm (a1b4), efek pemucatan ozon mulai bekerja dominan: agen pengoksidasi kuat ini secara bertahap mendegradasi ikatan rangkap pada pigmen karotenoid dan polifenol. Kecenderungan kenaikan L^* /kecerahan akibat oksidasi ozon terhadap pigmen ini juga dilaporkan konsisten pada tepung gandum, jagung, dan sorgum, yang seluruhnya menunjukkan peningkatan keputihan dan penurunan yellowness setelah perlakuan ozon (F. Zhu, 2018).

Kenaikan hingga mencapai puncak kecerahan di dosis 6 ppm (a1b4) ini dapat terjadi karena sekam pada gabah berfungsi sebagai tameng atau penghalang difusi yang sangat efektif. Keberadaan sekam berhasil membatasi laju penetrasi ozon agar

tidak merusak endosperma secara agresif, melainkan mengarahkan energinya secara gradual untuk mengoksidasi pigmen serta memodifikasi struktur optik permukaan granula pati. Modifikasi tersebut menciptakan ruang udara mikroskopis yang meningkatkan hamburan pantulan cahaya, sehingga nilai derajat putih meningkat secara aman tanpa risiko pencokelatan akibat kerusakan makromolekul (Shah et al., 2013; F. Zhu, 2018). Untuk memperjelas pola dan arah interaksi fluktuasi data antara kedua kondisi beras tersebut, dapat dilihat pada grafik hubungan interaksinya di bawah:



Gambar IV.6. Grafik Interaksi Kondisi Beras dan Konsentrasi Ozon terhadap Nilai Derajat Putih Beras Putih Germinasi

Berbeda dengan gabah, beras pecah kulit (a2) menunjukkan pola tidak searah (berfluktuasi). Pada kontrol 0 ppm (a2b1), derajat putih berada di 77,01%, menurun menjadi 75,21% pada 2 ppm (a2b2) akibat inisiasi awal oksidasi permukaan aleuron. Ketika dosis dinaikkan ke 4 ppm (a2b3), nilai kembali naik menjadi 76,48% karena efek pemucatan ozon yang mendegradasi pigmen alami beras (F. Zhu, 2018). Pada 6 ppm (a2b4), derajat putih kembali menurun menjadi 75,91%, disebabkan oleh kerusakan seluler dan pemecahan makromolekul berlebihan (*over oxidation*). Tanpa sekam, paparan ozon berlebih memicu pemutusan ikatan

glikosidik karbohidrat dan ikatan peptida protein, menghasilkan senyawa karbonil dan asam amino bebas yang reaktif dan berpotensi terlibat dalam reaksi pencokelatan non-enzimatis maupun oksidasi fenolik lanjutan.

Peningkatan derajat putih pada dosis optimal sejalan dengan temuan F. Zhu (2018) dan Kaur et al. (2023), yang menyatakan bahwa ozon secara umum meningkatkan kecerahan (L^*) pada serelia melalui oksidasi agen pewarna alami seperti polifenol dan karotenoid, konsisten dengan temuan Sui et al. (2016 dalam F. Zhu, 2018) pada tepung gandum (L^* naik dari 93 menjadi 97) serta tepung jagung dan sorgum. Namun, penurunan derajat putih pada BPK di dosis tinggi tanpa pelindung sekam sejalan dengan Shah et al. (2013), yang membuktikan bahwa ozon dosis dan waktu berlebih pada beras tanpa kulit meningkatkan *yellowness* (b^*) melalui dua mekanisme simultan yaitu reaksi *Maillard* antara senyawa karbonil hasil pemecahan ikatan glikosidik dengan gugus amina bebas dari pemutusan ikatan peptida, serta pembentukan melanoidin akibat oksidasi fenolik berlebihan.

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Zhu (2018) dan Kaur et al. (2023), yang menyatakan bahwa perlakuan ozon secara umum mampu meningkatkan kecerahan atau lightness (L^*) pada serelia akibat teroksidasinya agen pewarna alami seperti polifenol dan karotenoid. Di sisi lain, temuan mengenai penurunan derajat putih pada dosis tinggi tanpa pelindung fisik sangat selaras dengan studi yang dilakukan oleh Shah et al., (2013). Studi tersebut membuktikan bahwa perlakuan ozon dengan dosis dan waktu yang berlebihan pada beras tanpa kulit akan meningkatkan nilai *yellowness* (b^*) yang diduga disebabkan oleh dua mekanisme yang dapat terjadi secara simultan, yaitu reaksi *maillard* antara senyawa karbonil hasil pemecahan ikatan glikosidik dengan gugus amina bebas dari pemutusan ikatan peptida, serta pembentukan senyawa melanoidin akibat oksidasi senyawa fenolik yang berlebihan (*over oxidation*).

Nilai derajat putih pada penelitian ini juga dapat dibandingkan dengan nilai kecerahan (L^*) pada beras putih non-germinasi tanpa perlakuan ozon. Shah et al.

(2013) melaporkan bahwa beras putih giling kontrol (tanpa ozonisasi) memiliki nilai L^* sebesar $69,4 \pm 0,007$, berada di bawah rentang derajat putih pada penelitian ini baik pada gabah ($a1$: 80,53–80,93) maupun beras pecah kulit ($a2$: 75,21–77,01). Hal ini mengindikasikan bahwa proses germinasi turut berkontribusi meningkatkan kecerahan beras dibandingkan beras giling konvensional, diduga terkait aktivitas enzim amilolitik yang memodifikasi permukaan granula pati selama imbibisi dan perkecambahan sehingga meningkatkan hamburan cahaya (Charoenthaikij et al., 2009).

Secara keseluruhan, pemanfaatan ozon dalam memperbaiki penampakan visual beras germinasi harus disesuaikan dengan kondisi fisiknya. Gabah memiliki ketahanan jauh lebih baik terhadap paparan ozon dosis tinggi tanpa mengorbankan mutu visual, sedangkan beras pecah kulit sangat rentan mengalami degradasi warna oksidatif jika dipaparkan ozon di atas kadar optimum.

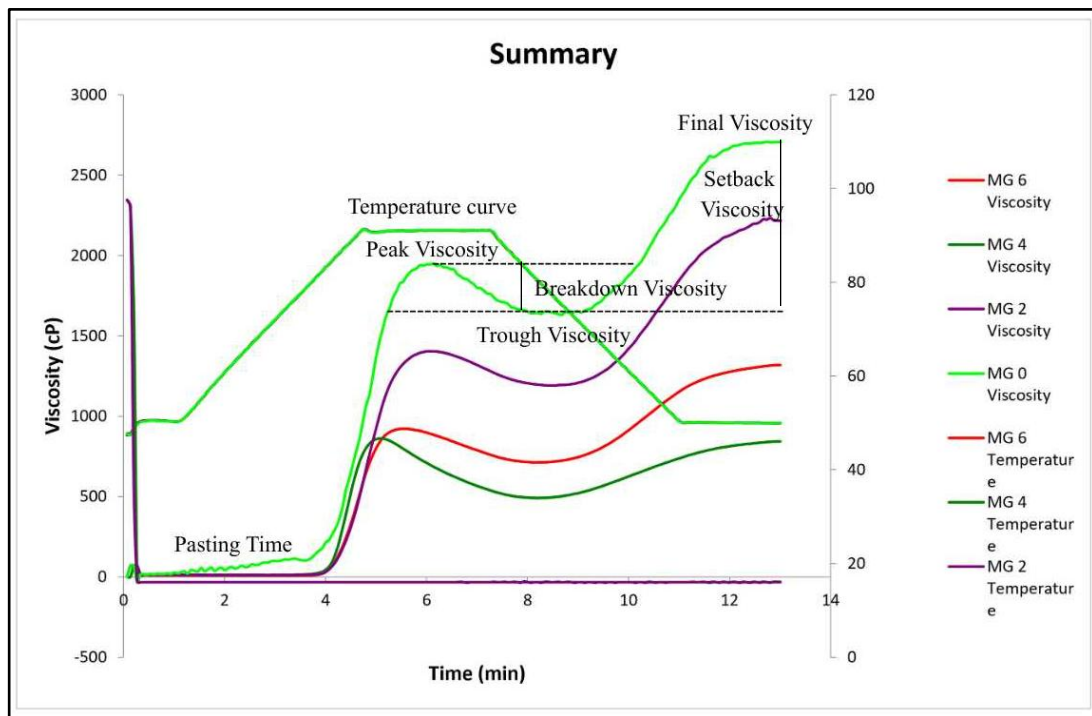
IV.1.1.5 Uji Profil Gelatinisasi (RVA)

Analisis profil pasting menggunakan *Rapid Visco Analyzer* (RVA) merupakan metode yang efektif untuk mereplikasi proses pemasakan dan mengevaluasi kualitas makan dan masak (*Eating and Cooking Quality/ECQ*) dari beras. Penelitian ini mengkaji sifat kekentalan dan tekstur pada gabah dan beras pecah kulit setelah diberi perlakuan gas ozon. Perubahan tekstur ini menunjukkan reaksi fisik dan kimia pada beras ketika terkena air dan panas. Hal ini sangat penting untuk menilai kualitas beras, seperti seberapa baik hasil masakan, se enak apa saat dimakan, dan kecocokannya untuk diolah menjadi produk makanan lain (Chinma et al., 2022).

RVA merupakan instrumen yang banyak digunakan untuk mengukur sifat reologi pati di bawah kondisi pemanasan dan pendinginan terkendali, sehingga membantu mengevaluasi perilaku pati dalam aplikasi pangan (Nastasi et al., 2025). Secara umum, oksidasi pati oleh ozon melibatkan dua reaksi utama yaitu gugus hidroksil pati teroksidasi menjadi gugus karbonil dan karboksil, diikuti pemutusan ikatan

glikosidik yang menyebabkan depolimerisasi sehingga pati yang teroksidasi ekstensif umumnya menunjukkan penurunan viskositas (Maqbool et al., 2024).

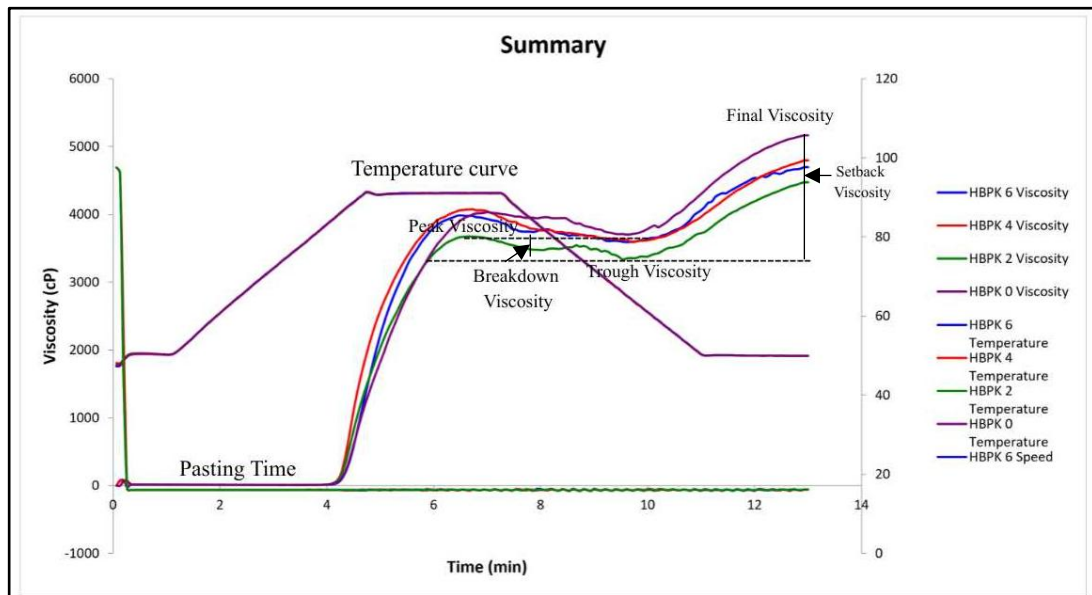
Untuk menguji signifikansi antar perlakuan, dilakukan uji lanjut *Least Significant Difference* (LSD) / Beda Nyata Terkecil (BNT) pada taraf 5%, sesuai rancangan petak terbagi (*split plot design*) yang digunakan. Notasi huruf kecil menunjukkan hasil uji lanjut antar konsentrasi ozon (B) dalam kondisi beras yang sama; notasi huruf kapital menunjukkan hasil uji lanjut antara a1 (Gabah) dan a2 (Beras Pecah Kulit) pada konsentrasi ozon yang sama.



Gambar IV.7. Grafik Profil Viskositas RVA Gabah (a1)

Keterangan :

MG = Kode Sampel Gabah
0, 2, 4, 6 = Konsentrasi Ozon (ppm)



Gambar IV.8. Grafik Profil Viskositas RVA Beras Pecah Kulit (a2)

Keterangan :

HBPk = Kode Sampel Beras Pecah Kulit

0, 2, 4, 6 = Konsentrasi Ozon (ppm)

Kedua kurva mengikuti pola khas profil RVA yang mengacu pada tahap pemanasan-penahanan-pendinginan, dengan parameter PT, PV, BD, FV, dan SB ditentukan dari titik-titik kurva tersebut (Nastasi et al., 2025). Pada gabah (a1), kurva kontrol (0 ppm) (a1b1) mencapai *peak viscosity* dan *final viscosity* tertinggi (1950,00 dan 2707,00 cP), sedangkan kurva 4 ppm (a1b3) terendah pada kedua parameter tersebut (862,00 dan 844,00 cP), sejalan dengan Tabel IV.5 dan Tabel IV.8. Pada beras pecah kulit (a2), keempat kurva memuncak berdekatan (3673,00 – 4075,00 cP) di sekitar menit ke 5–7 sebelum terpisah pada fase pendinginan, berbeda dari gabah, *final viscosity* tertinggi pada Beras Pecah Kulit (a2) justru dicapai oleh kontrol (a2b1: 5163,00 cP), diikuti 4 ppm (4796,00 cP) dan 6 ppm (4696,00 cP), sementara 2 ppm (a2b2) terendah pada kedua fase, puncak maupun akhir (3673,00 dan 4470,00 cP), sesuai Tabel IV.5 dan Tabel IV.8.

Tabel IV.5. Dua Arah untuk Analisis *Rapid Visco Analyser* (RVA) *Peak 1*

Kondisi	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
Beras (A)	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	1950,00 ± 8,00	A	1404,00 ± 9,00	A	862,00 ± 7,00	A	922,00 ± 8,00	A
	d		c		a		b	
a2 (Beras Pecah Kulit)	4030,00 ± 8,00	B	3673,00 ± 9,00	B	4075,00 ± 6,00	B	3984,00 ± 7,00	B
	c		a		d		b	

Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal)

Peak Viscosity (PV) merupakan viskositas maksimum merupakan indikator utama yang mencerminkan viskositas tertinggi yang dicapai pati selama fase pemanasan RVA, yaitu saat granula pati mengembang penuh (*swelling*) sebelum akhirnya pecah akibat kombinasi suhu tinggi dan gaya geser (*shear stress*), sehingga dapat menggambarkan kapasitas penyerapan air dan potensi pengentalan pati produk (Nakamura et al., 2021; Nastasi et al., 2025). Secara teoritis, nilai PV diekspektasikan akan mengalami peningkatan pada beras pecah kulit (a_2) dibandingkan gabah (a_1) karena hilangnya lapisan sekam/kulit tanduk yang menghambat penetrasi air dan panas ke dalam matriks pati. Selain itu, perlakuan ozonisasi diekspektasikan memicu modifikasi struktur pati (depolimerisasi maupun pembentukan ikatan silang) yang secara langsung memengaruhi daya kembang granula pati.

Hasil uji ANAVA dua arah pada Tabel IV.5 menunjukkan interaksi yang signifikan ($p < 0,05$) antara kondisi fisik beras dan konsentrasi ozon. Pembacaan notasi huruf kecil secara horizontal (a, b, c, d) mengonfirmasi bahwa perbedaan dosis ozon memberikan pengaruh beda nyata ($p < 0,05$) pada masing-masing kondisi beras. Sementara itu, notasi huruf besar secara vertikal (A, B) yang berbeda konsisten di setiap kolom membuktikan bahwa keberadaan sekam memberikan respons viskositas yang berbeda signifikan ($p < 0,05$) pada seluruh taraf perlakuan.

Pada gabah (a1), nilai PV mengalami penurunan tajam dari 1950,00 cP pada kontrol (a1b1) hingga titik terendah 862,00 cP pada 4 ppm (a1b3). Penurunan ini dipicu oleh oksidasi ozon yang mendepolimerisasi rantai amilosa dan amilopektin melalui pemutusan ikatan glikosidik (1 → 4) – α -D dan (1 → 6) – α -D, serta mengonversi gugus hidroksil (–OH) menjadi gugus karbonil (–C=O) dan karboksil (–COOH) pada daerah amorf (Kaur et al., 2023; Maniglia et al., 2022). Perubahan struktur ini melemahkan ikatan hidrogen dan menurunkan *swelling power* granula di bawah tekanan geser (Kaur et al., 2023; Nakamura et al., 2021). Sejalan dengan pola ozonasi pada pati kentang dan jagung (Maqbool et al., 2024). Namun pada 6 ppm (a1b4), nilai PV naik signifikan menjadi 922,00 cP akibat mulai mendominasinya pembentukan ikatan silang (*cross-linking*) intermolekuler yang memperkuat matriks pati, menyerupai fenomena pada pati singkong dan beras ketan terozonasi (Kaur et al., 2023; Maniglia et al., 2022; Maqbool et al., 2024).

Pada beras pecah kulit (a2), nilai PV diawali penurunan dari 4030,00 cP (a2b1) ke 3673,00 cP (a2b2) pada 2 ppm akibat kerusakan awal heliks ganda pati (Kaur et al., 2023; Maniglia et al., 2022). Pada 4 ppm (a2b3), nilai PV justru melonjak nyata ke 4075,00 cP melampaui kontrol karena ozon mendegradasi matriks protein aleuron (globulin, albumin, dan ikatan disulfida prolamin/glutelin) yang semula menghambat penetrasi air (Chinma et al., 2022; Shi et al., 2022). Hilangnya hambatan ini memaksimalkan hidrasi dan pengembangan granula pati (Nakamura et al., 2021). Pada 6 ppm (a2b4), PV kembali turun ke 3984,00 cP akibat akumulasi depolimerisasi rantai karbohidrat yang kembali dominan (Kaur et al., 2023; Maniglia et al., 2022)

Jika dibandingkan dengan data beras kontrol alami tanpa perlakuan pada penelitian Nakamura et al. (2021), yang mencatat nilai PV beras *Indica* sebesar 210,3 RVU, beras *Japonica* sebesar 379,0--411,9 RVU, serta *Indica low-amylose* sebesar 485,2 RVU, terlihat perbedaan pola daya kembang pati yang signifikan. Keberadaan sekam pada gabah (a_1) secara alami membatasi *swelling power*, dan

perlakuan ozonisasi 4 ppm (a_1b_3) semakin menekan daya kembang granula hingga mencapai titik terendahnya (862,00 cP). Sebaliknya, seluruh sampel beras pecah kulit (a_2) pada penelitian ini menghasilkan kisaran nilai PV yang jauh lebih tinggi (3673,00--4075,00 cP). Hal ini mengonfirmasi bahwa pengupasan sekam yang dikombinasikan dengan pembukaan matriks aleuron oleh ozon basah 4 ppm (a_2b_3) sangat efektif meningkatkan kapasitas pengentalan (*thickening power*) pati beras secara signifikan melampaui kondisi beras alami.

Tabel IV.6. Dua Arah untuk Analisis *Rapid Visco Analyser* (RVA) Through 1

Kondisi Beras (A)	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	1631,33 ± 3,51	A	1190,00 ± 5,00	A	491,33 ± 3,51	A	712,67 ± 2,08	A
	d		c		a		b	
a2 (Beras Pecah Kulit)	3559,00 ± 3,00	B	3331,33 ± 3,51	B	3591,33 ± 3,51	B	3591,33 ± 3,51	B
	b		a		c		c	

Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal)

Trough/Minimum Viscosity (TV) adalah viskositas terendah selama fase penahanan (*holding period*) yang menggambarkan titik ketika granula pati paling banyak mengalami kerusakan, sekaligus mencerminkan kemampuan pati mempertahankan viskositasnya selama pengolahan (Nastasi et al., 2025). Secara teoritis, nilai TV diekspektasikan lebih rendah pada gabah (a_1) akibat hambatan hidrasi sekam, serta mengalami penurunan akibat degradasi enzimatis dan oksidatif sebelum meningkat jika terjadi cross-linking. Hasil ANAVA menunjukkan interaksi signifikan ($p < 0,05$) antar perlakuan. Notasi horizontal (huruf kecil) mengonfirmasi beda nyata ($p < 0,05$) antar dosis ozon pada bentuk beras yang sama, sedangkan notasi vertikal (huruf besar A pada gabah dan B pada beras pecah kulit) membuktikan kondisi fisik beras berpengaruh beda nyata ($p < 0,05$) pada seluruh taraf ozon.

Pada gabah (a_1), nilai TV turun nyata dari 1631,33 cP (0 ppm) (a_1b_1) menjadi titik terendah 491,33 cP (4 ppm) (a_1b_3), lalu naik nyata menjadi 712,67 cP (6 ppm) (a_1b_4), sejalan dengan depolimerisasi amilopektin yang mendominasi hingga 4 ppm, diikuti mulai terbentuknya *cross-linking* pada 6 ppm (Kaur et al., 2023). Penurunan tajam hingga 4 ppm ini dipicu oleh aktivitas penguraian enzim α -amilase selama germinasi yang memotong ikatan internal amilosa/amilopektin (Xia et al., 2020), serta diakselerasi oleh pemutusan gugus hidroksil ($-OH$) dan ikatan glikosidik α -1,4 dan α -1,6 akibat oksidasi ozon basah (Kaur et al., 2023; Maniglia et al., 2022). Pemutusan gugus hidroksil ini melemahkan ikatan hidrogen intermolekuler, menjadikan granula pati lebih rapuh dan tidak tahan gaya geser pemanasan (Kaur et al., 2023).

Pada beras pecah kulit (a_2), nilai TV pada 4 ppm (a_2b_3) dan 6 ppm (a_2b_4) stabil pada 3591,33 cP (notasi **c**), meski keduanya berbeda nyata dari 0 ppm (3559,00 cP) dan 2 ppm (3331,33 cP, terendah), menunjukkan ketahanan pati relatif stabil setelah lapisan protein aleuron terdegradasi pada 4 ppm (Chinma et al., 2022). Notasi kapital A/B yang konsisten berbeda menegaskan TV gabah (a_1) selalu jauh lebih rendah dibanding beras pecah kulit (a_2). Sebagai pembanding kuantitatif, penelitian Nakamura et al. (2021) melaporkan bahwa beras kontrol alami tanpa perlakuan memiliki nilai *Trough Viscosity* sebesar 106,5–197,0 RVU pada varietas *Indica* dan *Japonica*, serta 30,9–99,5 RVU pada beras ketan. Pada penelitian ini, pemutusan gugus hidroksil pada gabah (a_1b_3) menekan nilai TV hingga titik terendahnya yaitu 491,33 cP. Sebaliknya, hilangnya sekam dan degradasi matriks aleuron pada beras pecah kulit (a_2) menghasilkan nilai TV yang jauh lebih tinggi (3331,33–3591,33 cP), mengonfirmasi bahwa perlakuan a_2 membentuk gel pati yang jauh lebih stabil dibandingkan kondisi beras alami tanpa perlakuan.

Tabel IV.7. Dua Arah untuk Analisis *Rapid Visco Analyser* (RVA) *Breakdown Viscosity*

Kondisi	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
Beras (A)	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	320,67 ± 2,08	A	214,67 ± 5,03	A	373,67 ± 5,51	A	210,33 ± 2,52	A
	c		b		d		a	
a2 (Beras Pecah Kulit)	470,33 ± 5,03	B	341,00 ± 4,58	B	484,67 ± 5,03	B	391,00 ± 5,29	B
	c		a		d		b	

Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal)

Nilai *Breakdown Viscosity* (BDV) mengindikasikan kerentanan granula pati pecah akibat pemanasan dan gaya geser (Nastasi et al., 2025). Secara teoritis, nilai BDV beras pecah kulit (a_2) diekspektasikan lebih tinggi dari gabah (a_1) karena hilangnya sekam, serta berfluktuasi akibat keseimbangan depolimerisasi dan *cross-linking* (Maqbool et al., 2024). Hasil ANAVA menunjukkan interaksi signifikan ($p < 0,05$). Pembacaan notasi huruf kecil (horizontal) menandakan beda nyata ($p < 0,05$) antar dosis ozon, sedangkan notasi huruf kapital A/B (vertikal) membuktikan BDV gabah (a_1) selalu lebih rendah secara signifikan dibanding beras pecah kulit (a_2) di seluruh taraf perlakuan.

Pada gabah (a_1), nilai BDV terendah terjadi pada 6 ppm (a_1b_4 , $210,33 \pm 2,52$ cP) dan memuncak pada 4 ppm (a_1b_3 , $373,67 \pm 5,51$ cP). Puncak BDV pada 4 ppm dipicu oleh penguraian amilosa/amilopektin oleh α -amilase germinasi (Xia et al., 2020) serta pemutusan gugus hidroksil ($-OH$) dan ikatan glikosidik α -1,4 dan α -1,6 oleh ozon basah (Kaur et al., 2023; Maniglia et al., 2022). Pemutusan gugus $-OH$ ini melemahkan ikatan hidrogen intermolekuler sehingga granula pati menjadi sangat rapuh (Kaur et al., 2023). Penurunan BDV di dosis 6 ppm terjadi akibat mulai terbentuknya ikatan silang (*cross-linking*) yang menstabilkan kembali granula pati.

Pada beras pecah kulit (a_2), nilai BDV terendah tercatat pada 2 ppm (a_2b_2 , $341,00 \pm 4,58$ cP) dan memuncak pada 4 ppm (a_2b_3 , $484,67 \pm 5,03$ cP). Puncak ini terjadi karena ozon merusak matriks protein aleurone (Chinma et al., 2022; Shi et al., 2022), memicu hidrasi maksimal namun membuat granula sangat rapuh dan mudah pecah saat menerima gaya geser (Nakamura et al., 2021). Ketiadaan sekam menyebabkan BDV a_2 secara konsisten lebih tinggi dibanding a_1 .

Sebagai pembanding kuantitatif, penelitian Nakamura et al. (2021) mencatat nilai *Breakdown* (BD) beras kontrol alami tanpa perlakuan sebesar 28,6 RVU (Indica Basmati), 231,2--290,5 RVU (Japonica), 377,4 RVU (Jasmin), dan 110,4--153,5 RVU (beras ketan). Nilai BDV gabah terozonasi 4 ppm (a_1b_3 , 373,67 cP) setara dengan varietas *Jasmin*, sedangkan beras pecah kulit 4 ppm (a_2b_3 , 484,67 cP) melonjak jauh melampaui seluruh kontrol alami, mengonfirmasi bahwa perlakuan a_2b_3 menghasilkan matriks pati paling rapuh dan paling mudah terdispersi.

Tabel IV.8. Dua Arah untuk Analisis *Rapid Visco Analyser* (RVA) *Final Viscosity*

Kondisi Beras (A)	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	2707,00 $\pm$ 8,00	A	2217,00 $\pm$ 9,00	A	844,00 $\pm$ 7,00	A	1319,00 $\pm$ 8,00	A
	d		c		a		b	
a2 (Beras Pecah Kulit)	5163,00 $\pm$ 8,00	B	4470,00 $\pm$ 900	B	4796,00 $\pm$ 6,00	B	4696,00 $\pm$ 7,00	B
	d		a		c		b	

Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal)

Final Viscosity (FV) menunjukkan viskositas pada akhir fase pendinginan yang mencerminkan tekstur, kemampuan pembentukan gel pati (*gelling capacity*), dan kecenderungan retrogradasi setelah pemanasan (Nastasi et al., 2025). Secara teoritis, nilai FV diekspektasikan lebih tinggi pada beras pecah kulit (a_2) dibanding

gabah (a_1) karena ketiadaan sekam, serta diekspektasikan menurun akibat depolimerisasi amilosa sebelum meningkat jika terjadi ikatan silang (*cross-linking*). Hasil ANAVA menunjukkan interaksi signifikan ($p < 0,05$) antar perlakuan. Pembacaan notasi huruf kecil (horizontal) menunjukkan beda nyata ($p < 0,05$) antar dosis ozon pada bentuk beras yang sama, sedangkan notasi huruf kapital A/B (vertikal) mengonfirmasi bahwa nilai FV beras pecah kulit (a_2) secara konsisten lebih tinggi dan berbeda nyata ($p < 0,05$) dibanding gabah (a_1) pada seluruh taraf ozon.

Pada gabah (a_1), nilai FV turun tajam secara signifikan dari 2707,00 cP (0 ppm) (a_1b_1) ke titik terendah 844,00 cP (4 ppm) (a_1b_3), lalu naik nyata ke 1319,00 cP (6 ppm) (a_1b_4). Penurunan hingga 4 ppm dipicu oleh pemotongan ikatan internal amilosa oleh enzim α -amilase selama germinasi (Xia et al., 2020), serta diakselerasi oleh pemutusan gugus hidroksil ($-OH$) dan ikatan glikosidik α -1,4 dan α -1,6 akibat oksidasi ozon basah. Oksidasi gugus $-OH$ memendekkan rantai amilosa dan memperlemah ikatan hidrogen intermolekuler, sehingga menghambat re-asosiasi rantai amilosa saat pendinginan dan menekan pembentukan gel (Kaur et al., 2023; Maniglia et al., 2022). Peningkatan FV pada 6 ppm terjadi akibat pembentukan ikatan silang (*cross-linking*) intermolekuler yang memperkuat kembali matriks gel (Maqbool et al., 2024).

Pada beras pecah kulit (a_2), nilai FV turun nyata dari 5163,00 cP (0 ppm) ke 4470,00 cP (2 ppm), naik ke 4796,00 cP (4 ppm), lalu kembali turun ke 4696,00 cP (6 ppm). Penurunan awal pada 2 ppm disebabkan oleh depolimerisasi awal rantai pati. Kenaikan pada 4 ppm terjadi karena ozon basah mengdegradasi matriks protein aleuron (Chinma et al., 2022; Shi et al., 2022), yang melepaskan lebih banyak pati terhidrasi untuk membentuk jaringan gel kokoh saat didinginkan (Nakamura et al., 2021). Penurunan kembali pada 6 ppm dipicu oleh akumulasi pemutusan ikatan glikosidik pada konsentrasi ozon tinggi. Notasi A/B yang berbeda nyata mengonfirmasi ketiadaan sekam pada a_2 memfasilitasi hidrasi dan pembentukan gel yang jauh lebih kuat dibanding a_1 .

Sebagai pembanding kuantitatif, penelitian Nakamura et al. (2021) melaporkan bahwa beras kontrol alami tanpa perlakuan memiliki nilai *Final Viscosity* (FV) sebesar 316,8 RVU (Indica Basmati), 337,7--486,6 RVU (Japonica), 587,7 RVU (Jasmin), dan 137,4--253,0 RVU (beras ketan/low-amylose). Depolimerisasi amilosa dan pemutusan gugus hidroksil pada gabah (a_1b_3 , 844,00 cP) menekan FV hingga menghasilkan gel yang sangat lunak. Sebaliknya, hilangnya sekam dan degradasi aleuron pada beras pecah kulit (a_2 , 4470,00--5163,00 cP) menghasilkan viskositas gel akhir yang jauh lebih tinggi melampaui seluruh kontrol alami, mengonfirmasi perlakuan a_2 membentuk jaringan gel pati yang sangat kokoh setelah didinginkan.

Tabel IV.9. Dua Arah untuk Analisis *Rapid Visco Analyser* (RVA) *Setback*

Kondisi Beras (A)	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	1078,67 ± 5,51	A	1029,00 ± 4,36	A	354,33 ± 2,31	A	605,67 ± 2,31	A
	d		c		a		b	
a2 (Beras Pecah Kulit)	1604,67 ± 4,04	B	1139,67 ± 3,06	B	1203,33 ± 3,79	B	1105,00 ± 3,00	B
	d		b		c		a	

Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal)

Setback Viscosity (SBV), mengukur kecenderungan retrogradasi atau rekristalisasi pati saat pendinginan (Nastasi et al., 2025). Pada gabah (a_1), SBV diekspektasikan menurun pasca-germinasi dan ozonisasi. Nilai SBV tinggi berdampak negatif memicu tekstur nasi kaku, keras, dan mempercepat pengerasan (*staling*), sedangkan SBV rendah menghasilkan tekstur gel lunak, elastis, dan meningkatkan mutu sensoris (Pang et al., 2016). Hasil ANAVA menunjukkan interaksi signifikan ($p < 0,05$). Pembacaan notasi horizontal (huruf kecil) menandakan beda nyata ($p < 0,05$) antar dosis ozon pada bentuk beras yang sama, sedangkan notasi vertikal (huruf kapital A/B) membuktikan SBV beras pecah kulit (a_2) secara konsisten lebih

tinggi dari gabah (a_1) akibat ketiadaan sekam yang memaksimalkan hidrasi dan gelatinisasi pati.

Pada gabah (a_1), nilai SBV turun tajam dari 1078,67 cP (0 ppm) ke titik terendah 354,33 cP (4 ppm), lalu naik ke 605,67 cP (6 ppm). Penurunan hingga 4 ppm dipicu oleh pemotongan ikatan amilosa oleh α -amilase germinasi (Xia et al., 2020) serta pemutusan gugus hidroksil ($-\text{OH}$) dan ikatan glikosidik α -1,4/ α -1,6 oleh ozon basah. Oksidasi $-\text{OH}$ memendekkan rantai amilosa dan melemahkan ikatan hidrogen intermolekuler, merintangi re-asosiasi amilosa untuk membentuk matriks kristalin kaku saat didinginkan (Kaur et al., 2023; Maniglia et al., 2022). Kenaikan pada 6 ppm disebabkan oleh mulai terbentuknya ikatan silang (*cross-linking*) intermolekuler (Maqbool et al., 2024).

Pada beras pecah kulit (a_2), seluruh sampel terozonasi (1105,00--1203,33 cP) berbeda nyata dan signifikan lebih rendah dari kontrol (1604,67 cP). Penurunan pada 2 ppm (1139,67 cP) disebabkan oleh pemutusan gugus hidroksil ($-\text{OH}$) dan ikatan glikosidik (α -1,4/ α -1,6) oleh ozon, yang melemahkan ikatan hidrogen dan merintangi re-asosiasi amilosa (Kaur et al., 2023; Maniglia et al., 2022). Kenaikan tipis pada 4 ppm (1203,33 cP) dipicu oleh degradasi protein aleuron yang membebaskan amilosa (Chinma et al., 2022; Munarko et al., 2022), sebelum turun ke titik terendah di 6 ppm (1105,00 cP) akibat pemotongan rantai pati yang bersinergi dengan α -amilase germinasi (Xia et al., 2020). Penurunan SBV ini membuktikan ozonisasi efektif menekan retrogradasi dan pengerasan nasi (*staling*) sehingga menghasilkan tekstur gel yang lebih empuk (Pang et al., 2016).

Sebagai pembanding kuantitatif, penelitian Nakamura et al. (2021) melaporkan bahwa beras kontrol alami tanpa perlakuan memiliki nilai *Setback Viscosity* (SBV) sebesar 106,5--289,6 RVU pada varietas *Indica* dan *Japonica*, serta 377,4 RVU pada varietas *Jasmin*. Pemutusan gugus hidroksil dan aktivitas α -amilase pada gabah terozonasi 4 ppm (a_1b_3 , 354,33 cP) secara drastis menekan SBV hingga mendekati kisaran kelunakan beras *Indica low-amylose*. Sebaliknya, pada beras

pecah kulit (a_2), meskipun nilai SBV secara absolut lebih tinggi akibat tingginya konsentrasi pati tanpa sekam, perlakuan ozon terbukti secara signifikan menekan nilai SBV dari kontrolnya (1604,67 cP ke 1105,00 cP), mengonfirmasi bahwa ozonisasi efektif menghambat retrogradasi dan menghasilkan tekstur pati yang lebih lunak serta tidak mudah mengeras dibanding kondisi beras kontrol alami.

Tabel IV.10. Dua Arah untuk Analisis *Rapid Visco Analyser* (RVA) *Peak Time*

Kondisi	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
Beras (A)	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	6,13 ± 0,07	A	6,07 ± 0,07	A	5,07 ± 0,07	A	5,53 ± 0,07	A
	d		c		a		b	
a2 (Beras Pecah Kulit)	7,00 ± 0,07	B	6,67 ± 0,07	B	6,73 ± 0,07	B	6,47 ± 0,07	B
	d		b		c		a	

Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal)

Peak Time mengukur waktu yang dibutuhkan granula pati untuk mencapai viskositas maksimum (*Peak Viscosity*) saat pemanasan, yang menjadi indikator kecepatan gelatinisasi dan efisiensi waktu pengolahan (Nastasi et al., 2025). Secara teoritis, *Peak Time* diekspektasikan semakin cepat (singkat) setelah perlakuan germinasi dan ozonisasi karena pembukaan struktur granula memfasilitasi penetrasi air lebih cepat. Hasil ANAVA menunjukkan interaksi signifikan ($p < 0,05$). Pembacaan notasi horizontal (huruf kecil) menandakan beda nyata ($p < 0,05$) antar taraf ozon pada kondisi beras yang sama. Sementara itu, notasi vertikal (huruf kapital A/B) membuktikan *Peak Time* gabah (a_1) selalu berbeda nyata dan secara signifikan lebih cepat dibandingkan beras pecah kulit (a_2) di seluruh taraf ozon, karena masa pati a_2 yang lebih padat memerlukan waktu hidrasi lebih lama.

Pada gabah (a_1), keempat taraf ozon berbeda nyata satu sama lain, dengan *Peak Time* tercepat pada 4 ppm (a_1b_3 , $5,07 \pm 0,07$ menit), diikuti 6 ppm (5,53 menit), 2 ppm (6,07 menit), dan kontrol (6,13 menit). Percepatan hingga 4 ppm dipicu oleh hidrolisis ikatan pati oleh α -amilase germinasi (Xia et al., 2020) serta pemutusan gugus hidroksil ($-OH$) dan ikatan glikosidik α -1,4/ α -1,6 oleh ozon basah. Oksidasi $-OH$ melemahkan ikatan hidrogen intermolekuler dan melebarkan pori granula, sehingga mempercepat penetrasi air (Kaur et al., 2023; Maniglia et al., 2022). Kenaikan kembali pada 6 ppm dipicu oleh pembentukan ikatan silang (*cross-linking*) intermolekuler yang sedikit menghambat hidrasi awal (Maqbool et al., 2024).

Pada beras pecah kulit (a_2), *Peak Time* melaju paling cepat pada 6 ppm (a_2b_4 , $6,47 \pm 0,07$ menit), diikuti 2 ppm (6,67 menit), 4 ppm (6,73 menit), dan paling lambat pada kontrol (7,00 menit). Pergeseran titik tercepat ke konsentrasi 6 ppm pada a_2 dipicu oleh berlanjutnya degradasi matriks protein aleuron (albumin, globulin, dan glutelin) oleh ozon basah (Chinma et al., 2022; Munarko et al., 2022). Rusaknya dinding protein aleuron secara bertahap mempermudah masuknya air ke dalam inti granula pati, sehingga mempercepat waktu gelatinisasi maksimum secara berkelanjutan hingga dosis tertinggi.

Sebagai pembanding kuantitatif, penelitian Nakamura et al. (2021) melaporkan bahwa beras kontrol alami tanpa perlakuan memiliki *Peak Time* rata-rata sebesar 5,8--6,8 menit pada varietas *Japonica* dan *Indica*. Pemutusan gugus hidroksil dan hidrolisis amilase pada gabah terozonasi 4 ppm (a_1b_3 , 5,07 menit) berhasil mempercepat gelatinisasi hingga signifikan melampaui kecepatan gelatinisasi beras kontrol alami. Hal ini mengonfirmasi bahwa kombinasi germinasi dan ozonisasi basah sangat efektif meningkatkan efisiensi energi dan waktu pemasakan beras.

Tabel IV.11. Dua Arah untuk Analisis *Rapid Visco Analyser* (RVA) *Pasting Temp*

Kondisi	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
Beras (A)	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	51,80 ± 0,10	A	83,20 ± 0,10	A	83,15 ± 0,05	A	83,25 ± 0,10	A
	d		c		a		b	
a2 (Beras Pecah Kulit)	84,75 ± 0,25	B	84,00 ± 0,10	B	83,77 ± 0,41	B	84,53 ± 0,08	B
	d		b		c		a	

Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal)

Pasting Temperature (PT) menandai suhu saat sampel mulai mengental dan viskositas awal naik, yang mencerminkan suhu minimal yang dibutuhkan pati untuk menyerap air, mengembang, dan mulai tergelatinisasi (Nastasi et al., 2025). Secara teoritis, nilai PT diekspektasikan menurun akibat hidrolisis amilase germinasi, namun dapat meningkat pasca-ozonisasi akibat pembentukan ikatan silang (*cross-linking*) atau reorganisasi kristalin yang meningkatkan resistensi termal. Hasil ANAVA menunjukkan interaksi signifikan ($p < 0,05$). Pembacaan notasi horizontal (huruf kecil) mengonfirmasi beda nyata ($p < 0,05$) antar dosis ozon pada bentuk beras yang sama. Sementara itu, notasi vertikal (huruf kapital A/B) membuktikan PT beras pecah kulit (a_2) secara konsisten lebih tinggi dan berbeda nyata ($p < 0,05$) dibanding gabah (a_1) karena matriks pati a_2 yang lebih padat memerlukan energi termal awal yang lebih tinggi untuk gelatinisasi.

Pada gabah (a_1), terjadi lonjakan nyata suhu gelatinisasi dari $51,80 \pm 0,10^\circ\text{C}$ pada kontrol (a_1b_1) menjadi $83,15\text{--}83,25^\circ\text{C}$ setelah ozonisasi. Nilai PT kontrol yang sangat rendah ($51,80^\circ\text{C}$) dipicu oleh penguraian amilosa/amilopektin daerah amorf oleh enzim α -amilase selama germinasi, membuat granula sangat mudah melunak pada suhu rendah (Xia et al., 2020). Namun saat diozonasi, terjadi oksidasi intensif yang memutus gugus hidroksil ($-\text{OH}$) serta ikatan glikosidik α -1,4 dan α -1,6.

Oksidasi gugus $-OH$ menjadi gugus teroksidasi dan terbentuknya ikatan silang (*cross-linking*) intermolekuler memperkuat struktur amorf/kristalin granula, sehingga memerlukan energi termal yang jauh lebih tinggi untuk mulai membentuk pasta (Kaur et al., 2023; Maniglia et al., 2022; Maqbool et al., 2024).

Pada beras pecah kulit (a_2), nilai PT berkisar $83,77--84,75^{\circ}C$ dengan seluruh taraf berbeda nyata, di mana nilai tertinggi pada kontrol ($84,75 \pm 0,25^{\circ}C$) dan terendah pada 4 ppm (a_2b_3 , $83,77 \pm 0,41^{\circ}C$). Penurunan tipis PT hingga 4 ppm terjadi karena ozon basah merusak lapisan protein aleuron (Chinma et al., 2022; Munarko et al., 2022), memfasilitasi penetrasi air yang lebih cepat ke inti granula pati (Kaur et al., 2023). Notasi kapital A/B mengonfirmasi PT a_2 selalu lebih tinggi dibanding a_1 di seluruh taraf perlakuan.

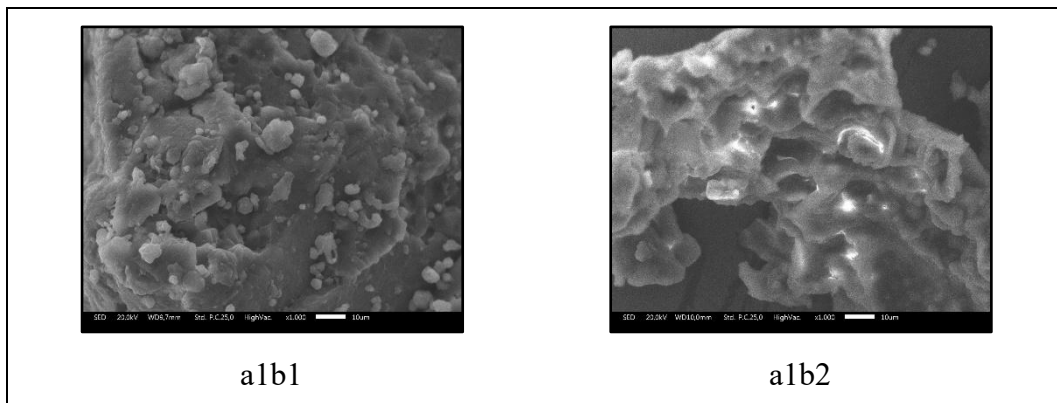
Sebagai pembandingan kuantitatif, penelitian Nakamura et al. (2021) mencatat nilai PT beras kontrol alami tanpa perlakuan sebesar $64,2--78,5^{\circ}C$ pada varietas *Indica*, *Japonica*, dan *Jasmin*. Germinasi tanpa ozon pada gabah (a_1b_1 , $51,80^{\circ}C$) menekan PT di bawah kontrol alami akibat degradasi amilase. Sebaliknya, ozonisasi ($83,15--84,75^{\circ}C$) melonjakkan PT melampaui seluruh kontrol alami Nakamura et al. (2021), mengonfirmasi bahwa oksidasi ozon memperkuat stabilitas termal awal granula pati.

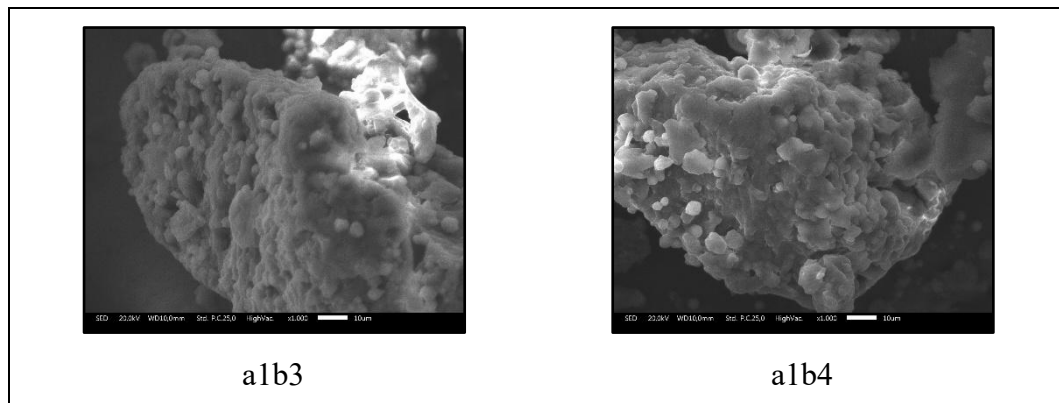
Secara keseluruhan, notasi A/B yang konsisten berbeda pada seluruh parameter RVA menegaskan bahwa kondisi fisik beras berpengaruh sangat nyata terhadap profil viskositas, terlepas dari dosis ozon. Pada gabah (a_1), perlindungan sekam menyebabkan penurunan viskositas konsisten hingga dosis 4 ppm akibat dominasi depolimerisasi oleh enzim amilase dan oksidasi ozon, sebelum ikatan silang (*cross-linking*) muncul pada 6 ppm (Kaur et al., 2023). Sebaliknya, pada beras pecah kulit (a_2), degradasi langsung lapisan protein aleuron oleh ozon memicu pengembangan pati lebih awal (4 ppm) sebelum terjadi akumulasi kerusakan karbohidrat pada dosis yang lebih tinggi (6 ppm) (Shi et al., 2022).

IV.1.1.6 Uji Analisis Morfologi Permukaan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) merupakan teknik mikroskopi yang memanfaatkan berkas elektron berenergi tinggi untuk memindai (*scanning*) permukaan suatu sampel, menghasilkan citra dengan resolusi dan kedalaman fokus yang jauh lebih tinggi dibandingkan mikroskop cahaya konvensional. Prinsip kerja SEM didasarkan pada interaksi antara berkas elektron primer dengan atom-atom pada permukaan sampel, yang kemudian memancarkan elektron sekunder yang ditangkap oleh detektor untuk direkonstruksi menjadi citra topografi permukaan (Müller et al., 2021).

Penerapan SEM mengevaluasi struktur mikroskopik granula pati secara langsung, sehingga perubahan fisik akibat suatu perlakuan dapat divisualisasikan dan dikorelasikan dengan data fisikokimia lain seperti profil viskositas (RVA) dan kadar pati. Pada penelitian ini, SEM digunakan untuk mengamati morfologi granula pati gabah (a1) dan beras pecah kulit (a2) pada empat tingkat konsentrasi ozon (faktor B) yaitu 0, 2, 4, dan 6 ppm dengan perbesaran 1000x, guna memvalidasi secara visual mekanisme degradasi struktural yang mendasari perubahan nilai RVA dan kadar pati yang telah dibahas sebelumnya.





Gambar IV.9. Morfologi SEM Gabah (a1) pada Konsentrasi Ozon 0, 2, 4, dan 6 ppm (perbesaran 1000x)

Hasil pembacaan SEM pada gabah kontrol (0 ppm) menunjukkan granula pati berbentuk bongkahan besar dengan bidang datar yang tegas dan saling berbatasan membentuk struktur poligonal, permukaan relatif halus dan padat tanpa retakan atau rongga berarti. Karakteristik ini sesuai dengan deskripsi Huang et al. dalam Müller et al., (2021), bahwa granula pati beras secara alami berbentuk poligonal (*polyhedral*) berukuran 2-11 μm dengan permukaan datar dan halus, kecuali beberapa guratan dan retakan alami. Kondisi granula *native* yang *smooth* dan *mostly defect-free* semacam ini juga umum dilaporkan pada berbagai sumber pati sebelum diberi perlakuan ozon (Maqbool et al., 2024). Struktur granula yang kompak ini menjadi alasan di balik tingginya nilai *Peak Viscosity* dan *Setback Viscosity* pada gabah.

Namun, perubahan mulai terlihat saat konsentrasi memasuki 2 ppm. Permukaan granula yang semula solid kini mulai dihiasi garis-garis retakan dan rongga kecil di sela-sela bidangnya, meskipun bentuk poligonal dasarnya masih bisa dikenali. Retakan awal ini mengindikasikan adanya mekanisme oksidasi permukaan tahap awal yang merusak heliks ganda pati, sejalan dengan konsep gangguan permeabilitas granula yang diuraikan oleh Huang et al dalam Müller et al., (2021). Peningkatan kekasaran permukaan pada tahap awal ozonasi seperti ini juga konsisten dengan temuan pada pati kentang, di mana granula yang semula halus mulai menunjukkan permukaan lebih tidak rata setelah paparan ozon (Maqbool et

al., 2024), sekaligus menjelaskan mengapa nilai *Peak Viscosity* gabah mulai menurun pada titik tersebut.

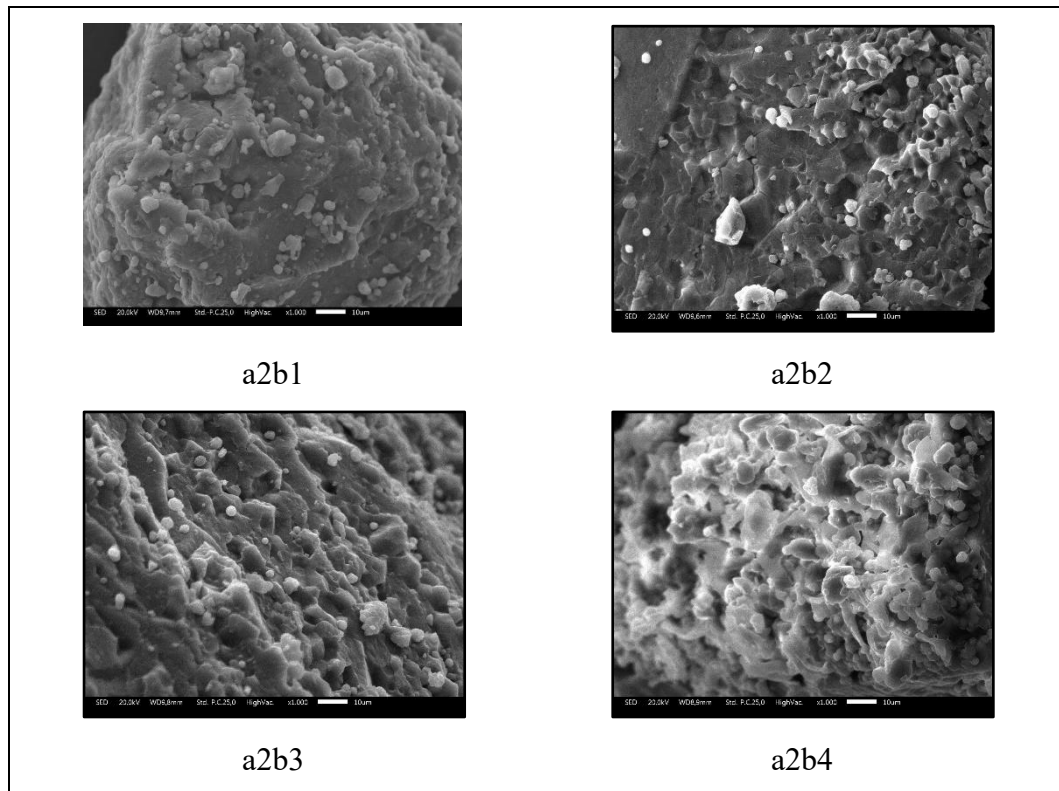
Kerusakan struktur paling ekstrem di antara seluruh sampel gabah ditemukan pada konsentrasi 4 ppm. Pada titik ini, permukaan granula terlihat sangat kasar dan dipenuhi rongga, bahkan granula individualnya sulit dipisahkan karena telah menyatu menjadi gumpalan kecil yang rapat dengan celah dan lubang berukuran besar. Porositas ekstrem tersebut terjadi karena peningkatan level perlakuan memicu terbentuknya pori-pori dan saluran radial yang memudahkan air serta enzim masuk lebih dalam ke dalam granula (Huang et al. dalam Müller et al., 2021).

Fenomena ini juga sebanding dengan proses *pitting* akibat lepasnya badan protein yang dilaporkan oleh Dang & Copeland, (2004). Karakteristik fisik ini memperjelas bahwa pada konsentrasi 4 ppm, granula pati gabah berada dalam kondisi paling tidak stabil. Hal tersebut dibuktikan oleh rendahnya nilai *Peak Viscosity* dan *Setback Viscosity* pada titik ini (Tabel IV.5 dan IV.9).

Sebaliknya, perubahan morfologi yang kontras terjadi saat konsentrasi dinaikkan menjadi 6 ppm. Granula tidak lagi menunjukkan rongga yang ekstrem, melainkan berubah menjadi kumpulan fragmen kecil berbentuk bulat yang tersusun rapat membentuk gerombolan dengan tekstur permukaan yang tampak menyatu kembali. Transisi morfologi ini sejalan dengan Huang et al. dalam Müller et al., (2021) yang menyatakan bahwa meningkatnya porositas dapat menghasilkan struktur granula yang lebih rapuh.

Kondisi ini juga serupa dengan deskripsi granula *fenotipe chalky* berstruktur bulat menurut Demone et al., (2022). Kecenderungan granula yang tampak seperti merapat kembali ini mengindikasikan adanya mekanisme *cross-linking* yang mendominasi pada 6 ppm. Dampaknya, terjadi sedikit kenaikan pada nilai *Peak Viscosity* (Tabel IV.5).

Morfologi permukaan granula pati beras pecah kulit akibat paparan ozon dengan berbagai tingkat konsentrasi dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar IV.10. Morfologi SEM Beras Pecah Kulit (a2) pada Konsentrasi Ozon 0, 2, 4, dan 6 ppm (perbesaran 1000x)

Hasil analisis SEM pada sampel kontrol (0 ppm) memperlihatkan granula pati berupa bongkahan padat berstruktur poligon kokoh dengan bidang datar (*facet*) yang tegas. Meskipun terdapat sedikit partikel kecil yang menempel, struktur utamanya tampak solid tanpa retakan signifikan. Karakteristik ini sesuai dengan deskripsi granula pati normal oleh Huang et al. dalam Müller et al., (2021), pola granula native yang smooth dan defect-free semacam ini turut dilaporkan sebagai kondisi umum pati sebelum ozonasi pada berbagai sumber pati lain (Maqbool et al., 2024), dan berkorelasi dengan tingginya nilai Setback Viscosity kontrol (1604,67 cP, Tabel IV.9), meskipun nilai Peak Viscosity kontrol (4030,00 cP, Tabel IV.5) sedikit lebih rendah dibandingkan 4 ppm (4075,00 cP) yang justru menjadi titik tertinggi PV pada BPK. Kondisi tersebut menandakan bahwa granula masih utuh

dan terikat kuat oleh matriks protein melalui ikatan disulfida (disulfide bonds) sebelum mengalami ozonisasi.

Saat konsentrasi meningkat ke 2 ppm, mulai muncul banyak garis retak/fraktur di permukaan, granula berbentuk poligonal tajam disertai rongga kecil di antaranya serta beberapa partikel putih terang menonjol menempel di permukaan, meski struktur masih relatif kompak. Retakan pada tahap ini sejalan dengan mekanisme kerusakan awal heliks ganda pati akibat oksidasi, sebagaimana konsep permeabilitas granula menurut Huang et al. dalam Müller et al., (2021). Peningkatan kekasaran serta munculnya retakan pada tahap awal ozonasi seperti ini konsisten dengan pola yang dilaporkan pada granula pati kentang terozonasi, yang mulai menunjukkan permukaan lebih tidak beraturan setelah kontak dengan ozon (Maqbool et al., 2024), dan mendukung penurunan nilai Peak Viscosity, Trough, Breakdown, dan Final Viscosity hingga mencapai titik terendah pada dosis ini (Tabel IV.5–IV.8), meskipun Setback Viscosity pada 2 ppm (1139,67 cP) belum menjadi titik terendahnya, karena SBV baru mencapai titik minimum pada 6 ppm (1105,00 cP, Tabel IV.9).

Perubahan morfologi paling kontras pada beras pecah kulit terjadi pada konsentrasi 4 ppm. Permukaan granula pati menjadi berserat, dipenuhi pori-pori kecil, dan rongganya lebih terbuka. Menurut Huang et al. dalam Müller et al., (2021) dan (Dang & Copeland, 2004), lubang-lubang ini muncul karena lapisan protein pelindungnya telah terkikis oleh ozon. Akibat hilangnya pelindung ini, air dan panas menjadi sangat mudah masuk ke dalam pati. Sejalan dengan hal tersebut, nilai Peak Viscosity dan Breakdown Viscosity melonjak ke titik tertinggi pada RVA (Tabel IV.5 dan IV.7).

Sementara itu, pada konsentrasi 6 ppm, bentuk pati berubah total. Granula pati pecah menjadi butiran-butiran bulat kecil yang bergerombol longgar, sehingga bentuk sudut tajamnya hilang. Kondisi ini mirip dengan ciri pati pada beras bermutu rendah (*chalky*) menurut Demone et al., (2022) dan menunjukkan kerusakan parah

akibat paparan ozon yang terlalu kuat (Dang & Copeland, 2004). Karena granula pati sudah hancur total, nilai Peak Viscosity, Breakdown, dan Final Viscosity kembali mengalami penurunan signifikan dibanding konsentrasi 4 ppm (Tabel IV.5, IV.7, IV.8), sementara Trough Viscosity relatif stabil dan tidak berbeda nyata dari 4 ppm (3591,33 cP, Tabel IV.6).

Perbedaan perubahan bentuk pati antara gabah dan beras pecah kulit disebabkan oleh adanya sekam sebagai pelindung alami pada gabah. Pada gabah, kerusakan pati terjadi secara perlahan dan bertahap hingga konsentrasi 4 ppm, lalu strukturnya tampak merapat kembali pada 6 ppm akibat adanya ikatan baru (*cross-linking*). Sebaliknya, pada beras pecah kulit yang tidak lagi terlindungi sekam, pati langsung terkena ozon secara acak dan tidak beraturan. Perubahannya terlihat drastis, mulai dari retak-retak pada 2 ppm, terbuka lebar akibat lapisan proteinnya hilang pada 4 ppm, hingga akhirnya hancur menjadi butiran-butiran kecil pada 6 ppm. Perbedaan ketahanan ini sesuai dengan teori "pelindung luar" (*protective shell*) dari Huang et al. dalam Müller et al., (2021). Intinya, bagian pati yang memiliki pelindung fisik (seperti sekam pada gabah) jauh lebih kuat menahan kerusakan akibat zat kimia atau enzim, dibandingkan dengan pati yang langsung terpapar tanpa pelindung.

IV.1.2 Respon Kimia

Analisis respon kimia terhadap beras putih germinasi hasil ozonisasi yaitu kadar air, kadar pati, uji antioksidan, dan kadar gula reduksi.

IV.1.2.1 Uji Kadar Air

Kadar air merupakan salah satu parameter fisikokimia utama yang menentukan umur simpan, kualitas, dan viabilitas beras selama proses penyimpanan maupun pengolahan lanjutan. Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI 6128:2020) tentang Beras, batas maksimal kadar air yang diizinkan untuk mempertahankan mutu beras yang baik dan mencegah pertumbuhan mikroorganisme pembusuk adalah 14,0% (Nasional, 2020). Standar ini berlaku umum baik untuk beras non-germinasi maupun germinasi, sehingga nilai 14,0% dapat digunakan sebagai acuan

pembandingan langsung, kadar air pada penelitian ini diekspektasikan tetap berada dalam ambang batas tersebut, terlepas dari ada-tidaknya perlakuan ozon, mengingat parameter ini lebih ditentukan oleh proses pengeringan pra-perlakuan (standarisasi bahan baku) dibandingkan oleh paparan ozon itu sendiri. Hasil analisis menunjukkan bahwa rata-rata kadar air beras putih germinasi pada seluruh kombinasi perlakuan berada pada rentang 13,14% hingga 13,22%, sebagaimana disajikan pada tabel berikut:

Tabel IV.12. Pengaruh Kondisi Bahan dan Konsentrasi Ozon terhadap Nilai Rata-rata Kadar Air Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32

Kondisi Beras (A)	Konsentrasi Ozon (B)	Rata-Rata
Gabah (a1)	0 ppm (b1)	13,14 ± 0,04
	2 ppm (b2)	13,22 ± 0,03
	4 ppm (b3)	13,14 ± 0,02
	6 ppm (b4)	13,16 ± 0,03
Beras Pecah Kulit (a2)	0 ppm (b1)	13,21 ± 0,03
	2 ppm (b2)	13,20 ± 0,03
	4 ppm (b3)	13,20 ± 0,07
	6 ppm (b4)	13,20 ± 0,02

Keterangan: Hasil ANAVA menunjukkan bahwa faktor A, faktor B, maupun interaksi AB tidak berpengaruh nyata ($p > 0,05$) terhadap kadar air beras putih germinasi.

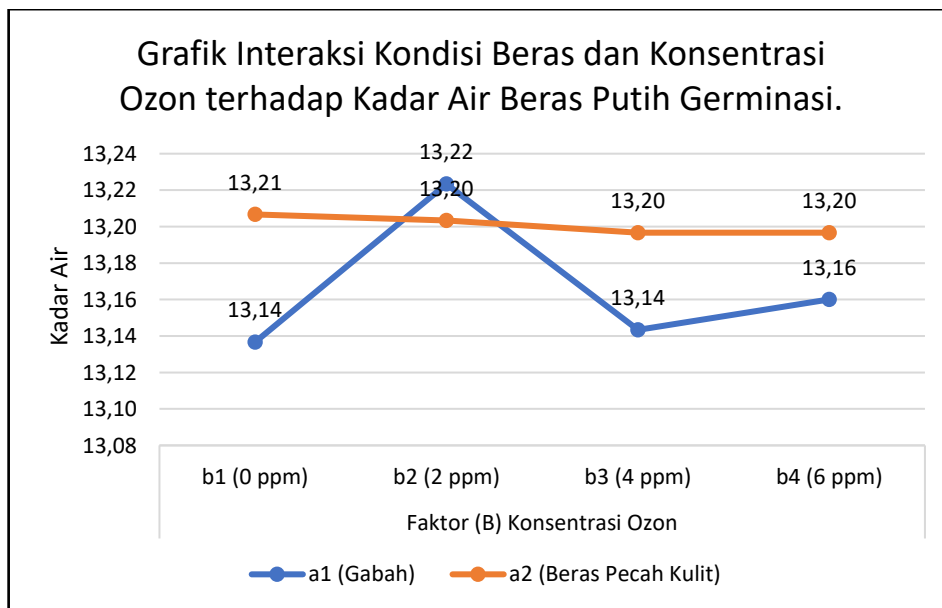
Berbeda dengan tabel parameter lain yang menampilkan notasi huruf hasil uji lanjut BNT (LSD) karena menunjukkan pengaruh nyata ($p < 0,05$), Tabel IV.12 tidak menampilkan notasi huruf karena baik faktor A, faktor B, maupun interaksi AB tidak berpengaruh nyata ($p > 0,05$), sehingga uji lanjut BNT tidak diperlukan, seluruh nilai rata-rata kadar air dapat dianggap setara secara statistik.

Berdasarkan hasil analisis sidik ragam (ANOVA) pada Rancang Petak Terbagi, perlakuan kondisi beras (gabah dan beras pecah kulit) sebagai faktor A dan petak utama, variasi konsentrasi (0, 2, 4, dan 6 ppm) sebagai anak petak dan faktor B, maupun interaksi antara keduanya menunjukkan pengaruh yang tidak berbeda nyata ($p > 0,05$) terhadap kadar air beras putih germinasi. Ketidaknyataan pengaruh antar perlakuan ini secara utama disebabkan oleh standarisasi ketat pada tahap preparasi sampel.

Dalam penelitian ini, proses pengeringan bahan baku (baik gabah (a1) dan beras pecah kulit (a2)) secara sengaja dikontrol dan dihentikan ketika kadar air bahan telah mencapai titik target, yaitu pada kisaran 12,5% hingga 14% sesuai dengan ambang batas SNI (Nasional, 2020). Pengendalian titik akhir pengeringan ini sangat penting untuk memastikan setiap bahan memiliki kadar air yang seragam sebelum diberikan perlakuan. Oleh karena itu, hasil akhir kadar air yang tidak berbeda nyata merupakan konsekuensi wajar dari bahan baku yang sudah diseragamkan sejak awal.

Lebih lanjut, tetap stabilnya kadar air pada kisaran 13,14%-13,22% pasca perlakuan juga membuktikan secara ilmiah bahwa pemaparan gas ozon hingga konsentrasi 6 ppm tidak memberikan efek dehidrasi oksidatif atau kerusakan struktural yang mengubah kesetimbangan air bahan. Ozon dikenal sebagai agen pengoksidasi kuat, namun, pada aplikasi dosis rendah dan tekanan rendah, molekul ozon umumnya hanya bereaksi di tingkat permukaan (sekam pada gabah atau lapisan bekatul pada beras pecah kulit). Secara mekanis, ozon segera terdekomposisi menjadi radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) begitu berkontak dengan lapisan terluar biji yang lembab, radikal ini sangat reaktif namun berumur sangat pendek (short-lived), sehingga habis bereaksi dengan komponen permukaan (lignin, silika pada sekam, atau lipid pada bekatul) sebelum sempat berdifusi lebih jauh ke lapisan air bebas di ruang intergranular endosperma (Sachadyn-Król & Agriopoulou, 2020).

Reaksi permukaan ini mencegah penetrasi ozon secara masif ke dalam endosperma. Akibatnya, air bebas di dalam ruang *inter granular* tidak mengalami penguapan yang signifikan (Sitoe et al., 2025). Perlu ditegaskan bahwa mekanisme pemutusan gugus hidroksil pada rantai pati (dibahas pada parameter RVA dan kadar pati) merupakan reaksi yang berbeda dari interaksi gugus hidroksil pada molekul air bebas yang dibahas di sini, kestabilan kadar air justru mengonfirmasi bahwa ketersediaan air sebagai prasyarat aktivitas enzim α -amilase selama germinasi tetap terjaga merata di seluruh sampel, sehingga variasi hasil pada parameter fisikokimia lain benar-benar mencerminkan efek ozon terhadap struktur pati, bukan akibat perbedaan ketersediaan air antar perlakuan. Tren kestabilan nilai kadar air dapat dilihat pada grafik berikut:



Gambar IV.11. Grafik Interaksi Kondisi Beras dan Konsentrasi Ozon terhadap Nilai Kadar Air Beras Putih Germinasi

Berdasarkan grafik, garis a1 (gabah) menunjukkan fluktuasi yang lebih tampak dibandingkan garis a2 (beras pecah kulit), dengan pola naik turun dari 13,14% (a1b1) ke 13,22% (a1b2), turun kembali ke 13,14% (a1b3), lalu naik tipis ke 13,16% (a1b4). Sebaliknya, garis a2 relatif datar di sepanjang taraf ozon, bergerak

dari 13,21% (a2b1) menjadi 13,20% dan bertahan stabil hingga a2b4. Kedua garis terlihat berpotongan (*crossing*) di sekitar titik b2, namun rentang perbedaan nilai antar garis sangat kecil (hanya berkisar 0,00% - 0,08%), sehingga secara visual pola ini tidak mencerminkan perbedaan yang bermakna secara biologis maupun statistik. Hal ini konsisten dengan hasil ANAVA yang menyatakan bahwa baik faktor A, faktor B, maupun interaksi AB tidak berpengaruh nyata terhadap kadar air.

Meskipun secara statistik tidak berbeda nyata akibat standarisasi awal bahan, terdapat fluktuasi mikro pada nilai kadar air antar perlakuan. Pada kondisi gabah (a1), rata-rata kadar air mengalami fluktuasi ringan yaitu 13,14% (0 ppm) (a1b1), 13,22 % (2 ppm) (a1b2), 13,14% (4 ppm) (a1b3), dan 13,16% (6 ppm) (a1b4). Kenaikan minor pada 2 ppm (a1b2) diduga akibat stres oksidatif ringan dari ozon yang melonggarkan ikatan mikroskopis pori-pori sekam, memungkinkan gabah menyerap sedikit kelembapan ruang perlakuan (Kaur et al., 2023), sementara penurunan kembali pada 4 ppm (a1b3) mengindikasikan ozon mulai mengikat sebagian kecil molekul air bebas di lapisan luar pelindung gabah. Fluktuasi ini sejalan dengan ekspektasi awal bahwa gabah, dengan permukaan sekam yang berpori dan bertekstur lebih kompleks, memiliki kapasitas pertukaran uap air permukaan (*surface moisture exchange*) yang lebih besar dibandingkan beras pecah kulit, meskipun secara statistik tidak bermakna.

Sementara itu, pada kondisi beras pecah kulit (a2), respon kadar air tampak jauh lebih stabil dan seragam, yaitu 13,21% (0 ppm) (a2b1) dan menetap di 13,20% pada perlakuan 2 ppm (a2b2), 4 ppm (a2b3), maupun 6 ppm (a2b4). Hal ini terjadi karena beras pecah kulit yang kehilangan lapisan sekam protektif akan mengekspos lapisan bekatul (*bran*) yang kaya lipid dan antioksidan, sehingga ozon yang sangat reaktif secara instan habis bereaksi (*scavenged*) dengan komponen lipid permukaan tersebut, sekaligus menghalangi penetrasi ozon untuk mengoksidasi air di dalam endosperma (Sitoe et al., 2025).

Secara keseluruhan, tidak berbedanya parameter kadar air dalam penelitian ini mengonfirmasi dua hal penting. Pertama, validitas metode preparasi di mana pengeringan berhasil mencapai dan menahan target SNI secara seragam. Kedua, keamanan perlakuan ozon hingga konsentrasi 6 ppm yang terbukti sebagai teknologi ramah lingkungan yang tidak mendisrupsi stabilitas kadar air beras putih germinasi yang telah terstandarisasi.

IV.1.2.2 Uji Kadar Pati

Pati merupakan komponen makromolekul karbohidrat utama yang mendominasi endosperma biji beras dan memegang peranan krusial dalam menentukan karakteristik fisikokimia, sifat tekno-fungsional, serta kualitas akhir produk berbasis beras. Secara fisiologis, imbibisi air pada awal germinasi memicu mobilisasi hormon giberelin (GA) yang menstimulasi sintesis dan aktivitas enzim amilolitik endogen untuk merombak pati menjadi gula fungsional sebagai sumber energi pertumbuhan embrio (Chinma et al., 2022).

Secara teoritis, kadar pati diekspektasikan menurun pada dosis ozon rendah-sedang (indikator keberhasilan germinasi), namun meningkat kembali pada dosis tinggi akibat efek fitotoksik yang menghambat enzim amilolitik dan pembentukan ikatan silang (cross-linking) yang menghalangi akses enzim. Pola respons a1 dan a2 diekspektasikan berbeda arah karena perbedaan perlindungan sekam terhadap paparan ozon.

Berdasarkan hasil analisis sidik ragam (ANOVA), diketahui bahwa perlakuan kondisi beras sebagai petak utama (Faktor A), konsentrasi ozon sebagai anak petak (Faktor B), serta interaksi antara kondisi beras dan konsentrasi ozon (Faktor AB) memberikan pengaruh yang berbeda nyata ($p < 0,05$) terhadap kadar pati beras putih germinasi varietas Inpari 32. Signifikansi pada nilai interaksi ini menandakan bahwa laju biodegradasi enzimatik maupun modifikasi struktural komponen pati tidak dipengaruhi oleh satu faktor tunggal, melainkan merupakan hasil kombinasi dinamis antara keberadaan lapisan pelindung fisik biji dengan tingkat paparan stres

oksidatif dari gas ozon. Data rata-rata kadar pati dari masing-masing kombinasi perlakuan dapat dilihat pada tabel dua arah berikut:

Tabel IV.13. Dua Arah untuk Analisis Kadar Pati Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32

Kondisi Beras (A)	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	65,21 ± 0,90	B	64,08 ± 1,05	A	61,84 ± 0,96	A	67,59 ± 0,84	B
	b		b		a		c	
a2 (Beras Pecah Kulit)	63,71 ± 0,48	A	63,78 ± 0,10	A	64,62 ± 0,17	B	62,90 ± 0,24	A
	ab		ab		b		a	

Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal).

Tabel IV.13 menampilkan interaksi AB, sehingga menggunakan notasi huruf besar (dibaca vertikal, membandingkan a1 vs a2 pada konsentrasi sama) dan huruf kecil (dibaca horizontal, membandingkan antar konsentrasi pada kondisi bahan sama). Notasi huruf besar pada a1 berpola B-A-A-B (0, 2, 4, 6 ppm), menunjukkan kadar pati a1 berbeda nyata dari a2 pada kontrol dan 6 ppm, namun tidak berbeda nyata pada 2 dan 4 ppm.

Melalui matriks tabel di atas, terlihat pola kontras yang tajam antara a1 dan a2 pada dosis 4 dan 6 ppm: kadar pati gabah turun ke titik terendah 61,84% pada 4 ppm namun beras pecah kulit justru naik ke 64,62%, sedangkan pada 6 ppm gabah melonjak ke titik tertinggi 67,59% sementara beras pecah kulit merosot ke 62,90%. Pola yang berlawanan arah ini terjadi karena penguraian pati sesungguhnya dikendalikan oleh dua mekanisme yang berbeda sifat yaitu jalur biologis-enzimatis dan jalur kimiawi-oksidatif, yang mana yang mendominasi bergantung pada ada atau tidaknya sekam sebagai pelindung fisik (Sitoe et al., 2025). Pada gabah yang

terlindungi sekam, ozon tidak langsung menyentuh pati sehingga jalur enzimatis tetap menjadi penggerak utama perubahan kadar pati. Sebaliknya, pada beras pecah kulit yang tidak terlindungi, ozon dapat langsung bereaksi dengan granula pati sehingga jalur kimiawi-oksidatif menjadi penggerak dominan. Perbedaan jalur dominan inilah yang menyebabkan arah perubahan kadar pati antara kedua kondisi bahan menjadi berlawanan pada dosis yang sama, sebagaimana diuraikan lebih lanjut berikut ini.

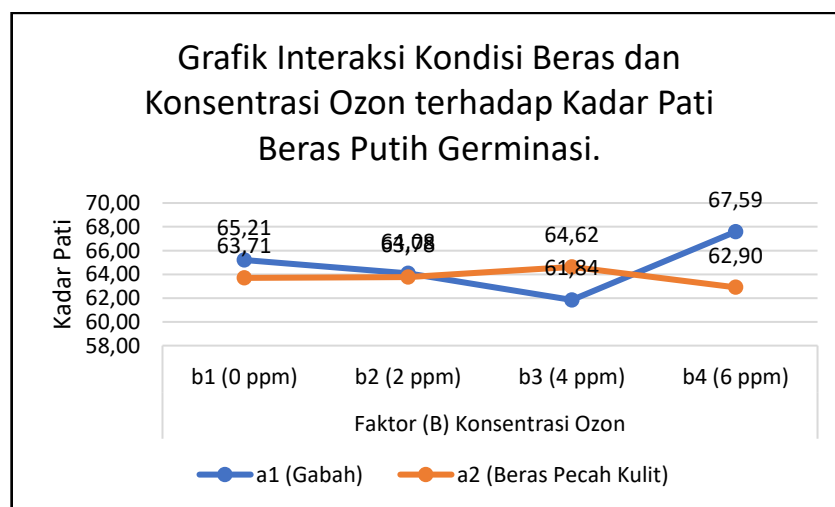
Secara enzimatis, α -amilase memutus ikatan glikosidik α -1,4 secara acak di bagian dalam rantai amilosa/amilopektin menghasilkan dekstrin, sedangkan β -amilase memotong unit maltosa dari ujung non-pereduksi secara berurutan; keduanya bekerja sinergis menghasilkan gula sederhana bagi energi perkecambahan (Chinma et al., 2022; Damaris et al., 2019). Sintesis α -amilase diatur oleh GA yang disekresikan embrio ke lapisan aleuron, memicu ekspresi protein GAMYB yang berinteraksi dengan elemen GARE pada gen α -amilase (OsRamy1A, OsRamy3B, OsRamy3E) untuk menginduksi transkripsinya Gubler et al. (1995 dalam (Wang et al., 2025). Karena aktivitas enzim ini bergantung pada integritas aleuron, kerusakan oksidatif akibat ozon berlebih dapat mengganggu jalur GA-GAMYB tersebut dan menghambat produksi α -amilase secara keseluruhan.

Secara paralel, penguraian pati juga dipengaruhi oksidasi kimiawi langsung oleh ozon yaitu gugus hidroksil (-OH) pada rantai glukosa teroksidasi menjadi gugus karbonil dan karboksil pada daerah amorf granula, diikuti pemutusan ikatan glikosidik α -1,4/ α -1,6 yang mendepolimerisasi pati menjadi fragmen larut air (Kaur et al., 2023; Maqbool et al., 2024). Kedua jalur ini bersinergi pada dosis rendah-sedang, namun pada dosis tinggi oksidasi berlebih justru merusak struktur protein enzim itu sendiri sehingga menghambat aktivitas amilolitik meski oksidasi kimiawi pati tetap berlangsung (Srivastava et al., 2021).

Pada gabah (a1), kadar pati turun dari 65,21% (kontrol, notasi b) ke 64,08% (2 ppm, notasi b, tidak berbeda nyata dari kontrol), kemudian turun signifikan hingga titik

terendah 61,84% pada 4 ppm (notasi a). Penurunan ini didorong oleh dominannya jalur enzimatis, di mana oksidasi lignoselulosa sekam meningkatkan porositas dinding sel sehingga mempercepat difusi air dan sinyal GA-GAMYB yang memicu produksi amilase secara masif (Pandiselvam et al., 2019; Siteo et al., 2025). Sebaliknya, kadar pati melonjak ke titik tertinggi 67,59% pada 6 ppm (notasi c, berbeda nyata dari seluruh taraf) karena efek fitotoksik ROS berlebih merusak jaringan embrio dan struktur enzim pengurai, sehingga proses perkecambahan terhenti sebelum waktunya (Pandiselvam et al., 2019; Srivastava et al., 2021)

Pada beras pecah kulit (a2), kadar pati stabil tanpa beda nyata dari 63,71% (kontrol, notasi ab) ke 63,78% (2 ppm, notasi ab), kemudian naik nyata ke 64,62% pada 4 ppm (notasi b). Berbeda dari gabah, kenaikan ini didorong oleh dominannya jalur kimiawi, di mana ozon langsung mengoksidasi granula pati dan aleuron yang terbuka sehingga memicu ikatan silang yang menghambat akses air dan enzim (Kaur et al., 2023; F. Zhu, 2018). Pada 6 ppm (notasi a), kadar pati turun signifikan ke 62,90%, bukan disebabkan oleh aktivitas enzim, melainkan oleh penguraian kimiawi lanjutan, karena ozon merusak wilayah kristal granula dan memutus ikatan polimer karbohidrat menjadi oligosakarida larut air yang tidak lagi terhitung sebagai pati (Kaur et al., 2023; Siteo et al., 2025).



Gambar IV.12. Grafik Interaksi Kondisi Beras dan Konsentrasi Ozon terhadap Nilai Kadar Pati Beras Putih Germinasi

Pola berlawanan arah ini menegaskan peran sekam sebagai penentu jalur dominan. Pada gabah, sekam meredam paparan ozon sehingga jalur enzimatis (GA-GAMYB-amilase) tetap dominan hingga dosis tinggi memicu kerusakan fitotoksik, sedangkan pada beras pecah kulit, ketiadaan sekam membuat jalur kimiawi-oksidatif langsung mendominasi sejak dosis sedang (Kaur et al., 2023; F. Zhu, 2018).

Ditinjau dari mutu pangan fungsional, penurunan kadar pati selama perkecambahan merupakan arah yang diharapkan, menandakan keberhasilan konversi karbohidrat kompleks menjadi gula sederhana yang meningkatkan nilai gizi dan daya cerna produk (Chinma et al., 2022). Perlakuan gabah dengan ozon 4 ppm (a1b3) menghasilkan kadar pati terendah (61,84%), menandakan aktivitas perombakan pati paling maksimal tanpa kerusakan kimiawi berarti pada komponen utama biji (Pandiselvam et al., 2019).

Nilai ini juga perlu dibandingkan dengan kadar pati beras non-germinasi sebagai kontrol. Chaichoompu et al. (2024) melaporkan kadar pati varietas kontrol berkisar 76,45–83,26%, dengan RD43 sebesar 77,20% dan M7881 sebesar 82,40%, yang jauh lebih tinggi dibandingkan hasil penelitian ini (a1: 61,84–67,59%; a2: 62,90–64,62%). Perbedaan ini secara alami disebabkan oleh aktivitas α -amilase dan β -amilase selama germinasi yang menghidrolisis sebagian pati cadangan menjadi gula sederhana (Chinma et al., 2022), sehingga rentang kadar pati yang lebih rendah ini justru mengonfirmasi keberhasilan proses germinasi, sejalan dengan tujuan produksi beras germinasi sebagai pangan fungsional bernilai gizi dan daya cerna lebih baik.

IV.1.2.3 Uji Aktivitas Antioksidan Metode DPPH

Aktivitas antioksidan merupakan parameter fungsional yang menggambarkan kemampuan suatu bahan pangan dalam menangkal radikal bebas melalui mekanisme donasi atom hidrogen maupun elektron tunggal, sehingga menghambat reaksi oksidatif yang berpotensi merusak sel dan jaringan (Ciulu et al., 2018). Pada beras putih germinasi,, parameter ini berkaitan erat dengan senyawa fenolik, flavonoid, γ -oryzanol, dan vitamin E yang terkandung dalam lapisan alueron dan bekatul (Munarko et al., 2022). Pengujian dilakukan dengan metode *2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl* (DPPH), yang prinsipnya didasarkan pada kemampuan senyawa antioksidan mendonorkan atom hidrogen kepada radikal DPPH sehingga warna larutan berubah dari ungu menjadi kuning dan dapat diukur dengan spektrofotometri pada 517 nm (Ciulu et al., 2018).

Kekuatan aktivitas antioksidan dinyatakan sebagai nilai IC_{50} (*Inhibitory Concentration 50*), yaitu konsentrasi ekstrak (ppm) yang dibutuhkan untuk meredam 50% radikal DPPH, yang diperoleh melalui persamaan regresi linear antara persen inhibisi dan seri konsentrasi 100, 250, 500, dan 1000 ppm (Kurniasari et al., 2022). Nilai IC_{50} berbanding terbalik dengan kekuatan antioksidan, semakin kecil nilainya, maka semakin kuat aktivitas antioksidan sampel tersebut (Ciulu et al., 2018).

Secara teoritis, aktivitas antioksidan (dicerminkan oleh nilai IC_{50} yang rendah) diekspektasikan lebih tinggi pada dosis ozon rendah-sedang akibat efek elisitor yang memicu biosintesis senyawa fenolik sebagai respons pertahanan, namun berpotensi menurun pada dosis tinggi apabila kerusakan oksidatif melampaui kapasitas biosintesis kompensatif jaringan. Kondisi bahan juga diekspektasikan berpengaruh, karena keberadaan sekam pada gabah membatasi kontak langsung ozon dengan senyawa fenolik di lapisan aleuron dan bekatul, sehingga responsnya diperkirakan lebih stabil dibandingkan beras pecah kulit yang lapisannya terekspos langsung.

Berbeda dengan kadar air dan kadar pati yang telah diatur dalam SNI 6128:2020 Beras (Nasional, 2020), aktivitas antioksidan belum memiliki ambang baku mutu SNI, sehingga penilaian kekuatannya merujuk pada kalsifikasi nilai IC_{50} menurut literatur (Kurniasari et al., 2022). Berdasarkan hasil analisis sidik ragam (ANAVA), diketahui bahwa perlakuan kondisi beras sebagai petak utama (Faktor A), konsentrasi ozon sebagai anak petak (Faktor B), serta interaksi antara kondisi beras dan konsentrasi ozon (Faktor AB) memberikan pengaruh yang berbeda nyata ($p < 0,05$) terhadap aktivitas antioksidan beras putih germinasi varietas Inpari 32. Data rata-rata aktivitas antioksidan dari masing-masing kombinasi perlakuan dapat dilihat pada tabel dua arah berikut:

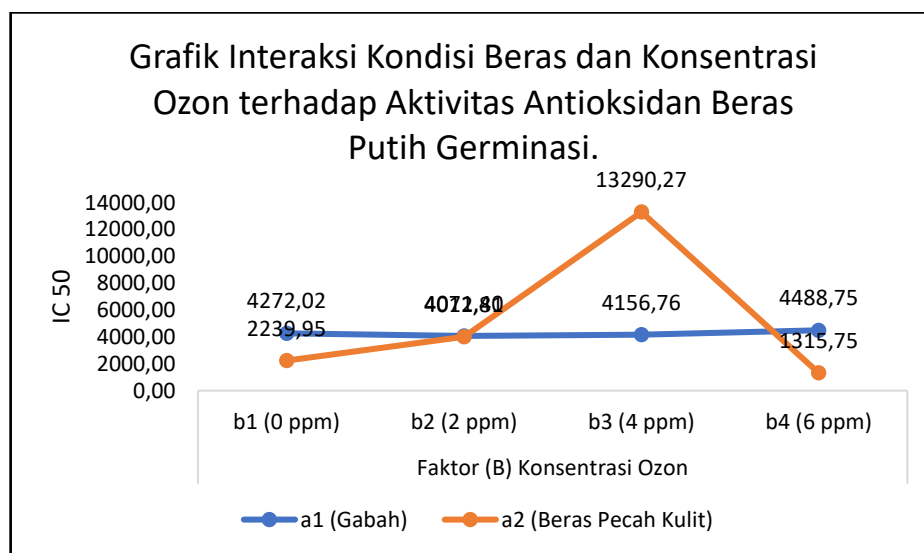
Tabel IV.14. Dua Arah untuk Aktivitas Antioksidan Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32

Kondisi Beras (A)	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	4272,02 ± 190,65	B	4071,40 ± 67,34	A	4156,76 ± 50,89	A	4488,75 ± 52,69	B
	a		a		a		a	
a2 (Beras Pecah Kulit)	2239,95 ± 31,43	A	4012,81 ± 81,79	A	13290,27 ± 1086,33	B	1315,75 ± 6,16	A
	b		c		d		a	

Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal).

Tabel IV.14 menampilkan hasil interaksi AB sehingga menggunakan dua notasi sekaligus, yaitu huruf besar yang dibaca vertikal untuk membandingkan a1 dan a2 pada konsentrasi ozon yang sama, serta huruf kecil yang dibaca horizontal untuk membandingkan antar konsentrasi ozon pada kondisi bahan yang sama. Pada gabah (a1), notasi huruf kecil yang seluruhnya sama menunjukkan bahwa keempat taraf konsentrasi ozon tidak berbeda nyata satu sama lain, sedangkan pada beras pecah kulit (a2), notasi huruf kecil yang seluruhnya berbeda menunjukkan bahwa keempat taraf tersebut saling berbeda nyata. Notasi huruf besar menunjukkan bahwa kondisi

bahan berbeda nyata pada konsentrasi 0, 4, dan 6 ppm, namun tidak berbeda nyata pada konsentrasi 2 ppm, sehingga pola pergantian ini turut menjelaskan mengapa terjadi titik silang (crossing) pada grafik interaksi.



Gambar IV.13. Grafik Interaksi Kondisi Beras dan Konsentrasi Ozon terhadap Nilai Aktivitas Antioksidan Beras Putih Germinasi

Berdasarkan Tabel Dua Arah dan Grafik Interaksi di atas terlihat gabah (a1) memiliki IC₅₀ lebih tinggi (lebih lemah) dibanding beras pecah kulit (a2) pada konsentrasi 0 ppm, namun tidak berbeda nyata pada 2 ppm, sebagai titik silang sementara. Pada konsentrasi 4 ppm, beras pecah kulit jauh lebih lemah, sedangkan pada konsentrasi 6 ppm, polanya berbalik total, di mana beras pecah kulit jauh lebih kuat. Pola non-monoton dan saling berlawanan arah inilah yang menjelaskan mengapa interaksi AxB sangat nyata secara statistik (Ciulu et al., 2018; Siteo et al., 2025). Pada gabah (a1), IC₅₀ relatif stabil pada kisaran 4071,40 sampai dengan 4488,75 ppm di seluruh taraf ozon, karena sekam berfungsi sebagai penghalang fisik yang menyerap sebagian radikal ozon sebelum sempat mengoksidasi senyawa fenolik pada lapisan aleuron dan bekatul dibaliknya (Kaur et al., 2023; Pandiselvam et al., 2019; Siteo et al., 2025).

Pola sebaliknya terlihat pada beras pecah kulit (a2), yang keempat tarafnya berbeda nyata satu sama lain. IC_{50} naik dari 2239,95 ppm (konsentrasi 0 ppm) menjadi 4012,81 ppm (konsentrasi 2 ppm) akibat oksidasi langsung senyawa fenolik bebas di permukaan bekatul yang tidak terlindungi sekam, sekaligus mempercepat *leaching* fenolik ke air rendaman pasca ozonisasi (Kaur et al., 2023; Munarko et al., 2019). Pada konsentrasi 4 ppm, IC_{50} melonjak ekstrem menjadi 13.290,27 ppm, mengindikasikan kerusakan oksidatif yang melampaui kapasitas penyangga antioksidan jaringan (Yodpitak et al., 2019). Namun pada konsentrasi 6 ppm, IC_{50} turun drastis menjadi 1315,75 ppm (terkuat dalam penelitian ini), konsisten dengan pelepasan fraksi fenolik terikat akibat rusaknya ikatan ester asam ferulat, serta aktivasi maksimal enzim fenilalanin amonia-liase (PAL) sebagai respons pertahanan sistemik pada dosis stres tertinggi (Ciulu et al., 2018; Yodpitak et al., 2019).

Merujuk klasifikasi pada Tabel IV.15., seluruh nilai IC_{50} penelitian ini (1315,75-13.290,27 ppm) tergolong sangat lemah (> 200 ppm), jauh di atas IC_{50} ekstrak bekatul murni sebesar 333,90 ppm (Kurniasari et al., 2022), karena ekstrak pada penelitian ini berasal dari tepung beras germinasi (hasil penggilingan utuh gabah maupun beras pecah kulit) yang komposisinya masih didominasi endosperma bertepung, sedangkan lapisan aleuron dan bekatul yang kaya senyawa fenolik hanya menyumbang fraksi kecil dari keseluruhan massa tepung, sehingga kandungan fenolik per satuan bobot ekstrak menjadi jauh lebih rendah dibanding ekstrak bekatul murni yang telah dipisahkan dari endosperma (Munarko et al., 2022).

Tabel IV.15. Klasifikasi Aktivitas Antioksidan Berdasarkan Nilai IC_{50}

Nilai	Klasifikasi
< 50 ppm	Sangat Kuat
50 – 100 ppm	Kuat
101 -150 ppm	Sedang
151 – 200 ppm	Lemah
> 200 ppm	Sangat Lemah

Perbedaan nilai IC_{50} antar perlakuan pada penelitian ini secara umum dipengaruhi oleh empat faktor utama. Pertama, dosis ozon yang diberikan, karena pada konsentrasi rendah hingga menengah (2-4 ppm) radikal ozon cenderung bersifat merusak (oksidatif), sedangkan pada konsentrasi tertinggi (6 ppm) kerusakan yang lebih ekstensif justru dapat memicu respons pertahanan kompensatif yang melampaui laju kerusakannya (Yodpitak et al., 2019). Kedua, karakteristik fisik bahan, yaitu ada atau tidaknya sekam sebagai lapisan pelindung yang menentukan seberapa besar konsentrasi ozon efektif yang benar-benar mencapai lapisan aleuron dan bekatul tempat sebagian besar senyawa fenolik terkonsentrasi (Kaur et al., 2023). Ketiga, aktivitas enzimatis selama germinasi, seperti fenilalanin amonia-liase (PAL) dan enzim hidrolitik dinding sel, yang laju aktivasinya berbeda antara jaringan bersekam dan tidak bersekam sehingga memengaruhi keseimbangan antara degradasi dan biosintesis senyawa fenolik baru (Ciulu et al., 2018). Keempat, sensitivitas metode DPPH itu sendiri terhadap rasio DPPH-antioksidan dan interferensi pigmen sebagaimana dibahas sebelumnya, yang turut memperbesar variasi nilai antar ulangan dan antar perlakuan, khususnya pada sampel dengan lapisan bekatul yang lebih terbuka (Yeo & Shahidi, 2019).

Pola non-monoton serupa juga dilaporkan Munarko et al., (2022) pada germinasi lima varietas beras pecah kulit Indonesia dengan metode perendaman sederhana, di mana kapasitas antioksidan menurun setelah perendaman 24 jam akibat pelepasan sebagian senyawa fenolik ke air rendaman, tetapi pada beberapa varietas (Inpari 43, Situ Bagendit, IPB 3S, dan Inpari 17) meningkat kembali setelah perendaman 48-96 jam, sejalan dengan pola pemulihan pada perlakuan ozon 6 ppm dalam penelitian ini. Data persen inhibisi Wanti et al., (2015) untuk beras putih, merah, dan hitam (18,40-46,20%) menunjukkan bahwa beras dengan pigmen alami (antosianin) memiliki aktivitas antioksidan jauh lebih tinggi dibanding beras putih tanpa pigmen, memperkuat dugaan bahwa rendahnya kandungan fenolik pada endosperma beras putih germinasi Inpari 32 turut berkontribusi terhadap IC_{50} yang tergolong sangat lemah pada penelitian ini.

Sebagai pembandingan lebih lanjut dengan kondisi kontrol tanpa perlakuan germinasi menggunakan metode IC₅₀ yang sama, Preecharram et al. (2025) melaporkan bahwa IC₅₀ DPPH brown rice varietas RD6 meningkat dari 7,6 mg per mL pada kontrol menjadi 9,3 mg per mL setelah germinasi, menunjukkan pelemahan aktivitas antioksidan. Pola berlawanan ditemukan pada varietas Hom Mali 105, di mana IC₅₀ justru menurun dari 7,9 menjadi 7,12 mg per mL setelah germinasi, nilai terkuat dari seluruh sampel yang diuji, yang dikaitkan dengan kandungan GABA yang mampu mendonasikan elektron kepada radikal bebas. Meskipun satuan tersebut tidak dapat dibandingkan langsung dengan IC₅₀ dalam ppm pada penelitian ini karena perbedaan metode ekstraksi, temuan ini menegaskan bahwa pengaruh germinasi terhadap aktivitas antioksidan bersifat varietas spesifik dan tidak selalu searah, sejalan dengan pola non-monoton dan interaksi AxB yang juga ditemukan pada penelitian ini.

Sementara itu, Butsat & Siriamornpun, (2010) melaporkan aktivitas antioksidan pada beras giling padi Thailand mengikuti urutan bekatul > sekam > beras pecah kulit > beras giling (25,2% - 89,5%), yang mendukung konsep bahwa fraksi bekatul kaya akan senyawa fenolik dan berptensti memiliki antioksidan tinggi. Pada penelitian ini, sampel gabah maupun beras pecah kulit sama-sama diolah menjadi tepung utuh (endosperma dan bekatul tercampur, tanpa fraksinasi terpisah), sehingga perbedaan IC₅₀ antar kondisi bahan lebih tepat dijelaskan oleh keberadaan sekam pada gabah sebagai pelindung fisik lapisan bekatul dibalikinya, bukan oleh perbandingan fraksi bekatul murni terhadap endosperma seperti pada studi Butsat & Siriamornpun, (2010) tersebut. Satuan persen inhibisi pada rentang konsentrasi tetap tidak dapat dibandingkan secara langsung dengan nilai IC₅₀. Ketiga studi tersebut secara konsisten menegaskan bahwa kapasitas antioksidan beras sangat dipengaruhi oleh keberadaan dan keterbukaan lapisan luar biji sebagai tempat utama senyawa fenolik.

Nilai IC₅₀ yang sangat tinggi disertai simpangan baku yang besar pada beberapa perlakuan terutama pada perlakuan a2b3 ((13.290,27) ± 1086,33 ppm), juga perlu

dicermati sebagai kemungkinan akibat keterbatasan dari metode DPPH itu. Rasio DPPH terhadap antioksidan dalam medium reaksi yang tidak terstandarisasi dapat menyebabkan nilai IC_{50} berubah-ubah hingga 2-3 kali lipat pada sampel dan metode yang sama (Deng et al., dalam Yeo & Shahidi, 2019), sehingga variasi antar ulangan dapat berpotensi lebih besar dibandingkan parameter fisikokimia lain.

Selain itu, pigmen dan senyawa berwarna dari ekstrak beras dapat menyerap cahaya pada rentang panjang gelombang yang sama dengan DPPH, sehingga dapat menimbulkan bias berupa penyimpangan absorbansi yang terbaca oleh alat sehingga nilai IC_{50} yang dihasilkan dapat menyimpang dari kapasitas aktivitas antioksidan sesungguhnya (Tatarczak-michalewska & Flieger, 2022; Yeo & Shahidi, 2019). Interferensi ini secara metodologis lebih mungkin terjadi pada beras pecah kulit, yang lapisan bekatulnya lebih terbuka dan berpotensi memiliki lebih banyak pigmen maupun hasil oksidasi lipid dibanding gabah yang masih memiliki sekam, sehingga dapat menjelaskan mengapa fluktuasi dan simpangan nilai IC_{50} pada beras pecah kulit lebih besar.

Secara keseluruhan, kombinasi beras pecah kulit dengan ozon 6 ppm (a2b4) menghasilkan IC_{50} terendah (1315,75 ppm) sehingga menjadi kombinasi dengan aktivitas antioksidan paling kuat, sedangkan kombinasi beras pecah kulit dengan ozon 4 ppm (a2b3) menghasilkan nilai IC_{50} tertinggi (13.290,27 ppm) dan merupakan kombinasi terlemah. Data tersebut menegaskan bahwa pengaruh ozon terhadap kapasitas antioksidan beras putih germinasi sangat bergantung pada kondisi fisik bahan serta konsentrasi paparan ozon.

IV.1.2.4 Uji Kadar Gula Pereduksi Metode *Luff-Schrool*

Gula pereduksi merupakan senyawa karbohidrat sederhana (monosakarida dan beberapa disakarida seperti maltosa) yang memiliki gugus aldehid atau keton bebas sehingga mampu mereduksi ion Cu^{2+} menjadi Cu^{+} , sebagaimana menjadi prinsip dasar metode *Luff Schrool*. Pada beras putih germinasi, kadar gula pereduksi mencerminkan derajat hidrolisis pati oleh enzim amilolitik (α -amilase dan β -

amilase) selama perkecambahan, sekaligus menjadi penanda ketersediaan energi bagi pertumbuhan embrio serta kontributor cita rasa manis alami pada produk akhir (L. Zhu et al., 2025).

Berdasarkan hasil analisis sidik ragam (ANAVA), diketahui bahwa perlakuan kondisi beras sebagai petak utama (Faktor A), konsentrasi ozon sebagai anak petak (Faktor B), serta interaksi antara kondisi beras dan konsentrasi ozon (Faktor AB) memberikan pengaruh yang berbeda nyata ($p < 0,05$) terhadap kadar gula pereduksi beras putih germinasi varietas Inpari 32. Signifikansi pada nilai interaksi ini menandakan bahwa laju hidrolisis pati oleh enzim amilolitik tidak dipengaruhi oleh satu faktor tunggal, melainkan merupakan hasil kombinasi dinamis antara keberadaan lapisan pelindung fisik biji dengan tingkat paparan oksidatif dari gas ozon.

Secara teoritis, kadar gula pereduksi diekspektasikan meningkat pada dosis ozon rendah-sedang akibat percepatan hidrolisis enzimatis, namun berpotensi menurun pada dosis tertinggi apabila oksidasi berlebih merusak aktivitas enzim atau mengoksidasi gula pereduksi menjadi komponen non-gula. Data rata-rata kadar gula pereduksi dari masing-masing kombinasi perlakuan dapat dilihat pada tabel dua arah berikut:

Tabel IV.16. Dua Arah untuk Analisis Kadar Gula Pereduksi Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32

Kondisi Beras (A)	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	72,46 ± 1,00	B	71,20 ± 1,16	A	68,72 ± 1,07	A	75,10 ± 0,93	B
	b		b		a		c	
a2 (Beras Pecah Kulit)	70,78 ± 0,54	A	70,86 ± 0,11	A	71,81 ± 0,19	B	69,90 ± 0,28	A
	ab		ab		b		a	

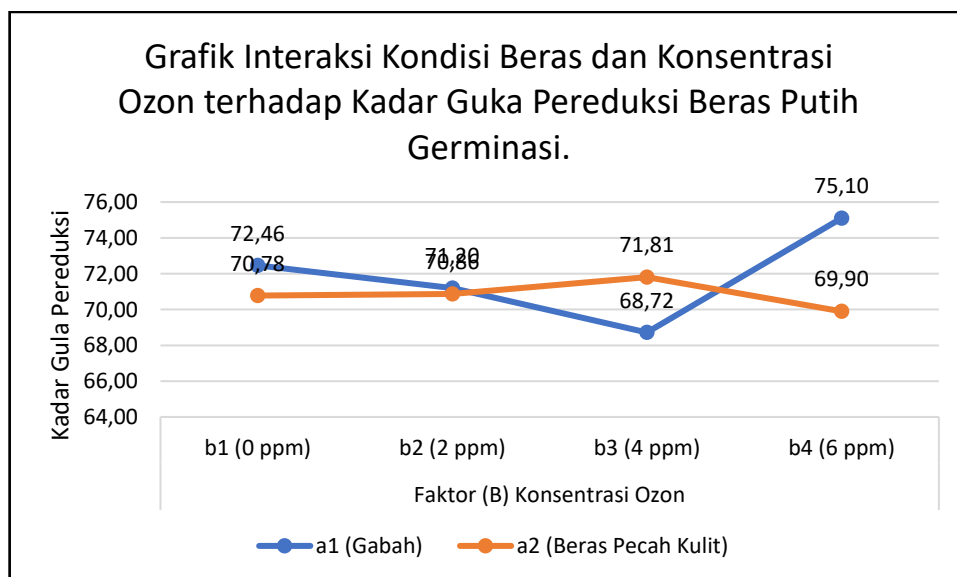
Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal).

Notasi huruf kecil dibaca horizontal untuk membandingkan pengaruh antar taraf konsentrasi ozon pada kondisi beras yang sama; nilai yang berbagi minimal satu huruf sama dinyatakan tidak berbeda nyata. Notasi huruf kapital dibaca vertikal untuk membandingkan pengaruh antara gabah dan beras pecah kulit pada taraf konsentrasi ozon yang sama.

Berdasarkan hasil *Least Significant Difference* (LSD) pada kondisi gabah (a1), kadar gula pereduksi tercatat sebesar 72,46% pada kontrol 0 ppm (a1b1), lalu menyusut menjadi 71,20% akibat paparan ozon 2 ppm (a1b2), meskipun keduanya berbagi notasi huruf "b" sehingga belum berbeda nyata. Tren penurunan ini berlanjut hingga berbeda nyata pada level minimum sebesar 68,72% pada konsentrasi 4 ppm (a1b3, notasi "a"). Reduksi bertahap ini menandakan bahwa gula pereduksi hasil hidrolisis pati diserap dengan cepat oleh embrio sebagai bahan bakar respirasi untuk memicu pertumbuhan. Kondisi ini menyebabkan laju konsumsi glukosa lebih tinggi daripada kapasitas produksinya (Chinma et al., 2022).

Di samping itu, konsentrasi ozon 4 ppm juga memicu oksidasi sebagian gula pereduksi menjadi komponen non-gula, seperti volatil dan asam organik (Sachadyn-Król & Agriopoulou, 2020), yang berujung pada merosotnya kadar gula terukur. Sebaliknya lonjakan tajam hingga mencapai puncaknya (75,10%) terjadi pada konsentrasi 6 ppm (a1b4, notasi "c", berbeda nyata dari seluruh taraf lain). Kenaikan drastis ini mengindikasikan fenomena fitotoksik akibat paparan ROS berlebih yang merusak sel embrio sekaligus mengganggu aktivitas enzim amilolitik. Dampaknya, pemanfaatan gula pereduksi untuk proses respirasi embrio terhenti secara prematur, sehingga memicu akumulasi gula yang telah diproduksi pada awal perkecambahan.

Data pada tabel dua arah menunjukkan adanya pergeseran nilai kontras yang signifikan antar kondisi bahan pada dosis ozon yang setara. Ketimpangan tren ini terlihat sangat jelas pada konsentrasi 4 ppm dan 6 ppm. Ketika diberi paparan ozon 4 ppm, kadar gula pereduksi pada gabah (a1b3) merosot ke level terendah (68,72%), sedangkan pada beras pecah kulit (a2b3) nilainya justru meningkat menjadi 71,81%. Fenomena sebaliknya terjadi pada dosis 6 ppm; kadar gula pereduksi gabah (a1b4) melesat hingga 75,10%, sementara beras pecah kulit (a2b4) justru menyusut ke angka 69,90%. Perbedaan respons yang kontradiktif ini dipengaruhi secara langsung oleh keberadaan sekam, sebagaimana diilustrasikan dalam grafik interaksi di bawah ini:



Gambar IV.14. Grafik Interaksi Kondisi Beras dan Konsentrasi Ozon terhadap Kadar Gula Pereduksi Beras Putih Germinasi

Merujuk pada grafik tersebut, karakteristik beras pecah kulit (a2) memperlihatkan tren fluktuasi yang berbeda dengan gabah akibat hilangnya sekam sebagai lapisan pelindung sebelum tahap germinasi dan ozonasi dilakukan. Kandungan gula pereduksi pada beras pecah kulit cenderung konstan, bergerak dari 70,78% pada kontrol 0 ppm (a2b1) menjadi 70,86% pada konsentrasi 2 ppm (a2b2). Kestabilan

nilai ini mengindikasikan bahwa aktivitas enzim amilase dalam menghidrolisis pati pada fase awal masih berjalan normal dan belum terpengaruh secara signifikan oleh paparan ozon berkonsentrasi rendah.

Kadar gula pereduksi kemudian cenderung meningkat ke angka 71,81% saat konsentrasi ozon dinaikkan menjadi 4 ppm (a2b3, notasi "b"), meskipun peningkatan ini belum berbeda nyata dibandingkan 2 ppm (notasi "ab", berbagi huruf "b" dengan 4 ppm). Kecenderungan kenaikan ini diduga dipicu oleh tidak adanya lapisan sekam, sehingga gas ozon dapat langsung berinteraksi dengan permukaan granula pati dan lapisan aleuron yang terbuka. Paparan ozon secara efektif mengikis lapisan protein aleuron yang awalnya membatasi penetrasi air dan enzim ke granula pati. Akibatnya, proses hidrolisis pati oleh amilase berlangsung lebih maksimal dan memicu peningkatan produksi gula pereduksi (L. Zhu et al., 2025).

Sebaliknya, pada perlakuan dosis tertinggi yaitu 6 ppm (a2b4, notasi "a"), nilai gula pereduksi pada beras pecah kulit menyusut kembali secara signifikan ke level terendah sebesar 69,90% (berbeda nyata dari 4 ppm). Nilai ini juga tidak berbeda nyata dari kontrol (70,78%, notasi "ab" berbagi huruf "a"), menunjukkan hasil akhir pada dosis tertinggi secara statistik kembali setara dengan kondisi awal BPK sebelum diozonisasi. Penurunan ini menandakan bahwa konsentrasi ozon ekstrem tersebut telah melewati batas toleransi yang menguntungkan bagi pemecahan enzimatis. Degradasi oksidatif langsung pada granula pati oleh ozon konsentrasi tinggi memang memecah polimer karbohidrat menjadi potongan oligosakarida terlarut, namun sebagian fraksi ini diduga mengalami oksidasi lanjutan menjadi molekul non-gula (Sachadyn-Król & Agriopoulou, 2020). Di sisi lain, kerusakan sel embrio akibat ozon 6 ppm juga menekan total aktivitas enzim amilolitik endogen, yang pada akhirnya menurunkan sintesis gula pereduksi jika dibandingkan dengan konsentrasi 4 ppm.

Variasi pola respons ini membuktikan betapa krusialnya peran struktur proteksi fisik pada bahan baku. Pada gabah (a1), sekam bertindak sebagai tameng mekanis yang mereduksi dan menghalangi kontak langsung radikal ozon dengan bagian dalam biji. Alhasil, fluktuasi kadar gula pereduksi pada gabah lebih dikendalikan oleh keseimbangan antara produksi dan konsumsi zat metabolit selama perkecambahan, sebelum akhirnya terjadi penumpukan drastis akibat kerusakan embrio pada dosis maksimal. Sebaliknya, tidak adanya sekam pada beras pecah kulit (a2) membuat ozon langsung menyerang struktur pati dan lapisan protein luar. Kondisi ini menyebabkan dinamika gula pereduksi pada beras pecah kulit lebih didominasi oleh kerusakan struktural granula pati ketimbang proses metabolisme germinasi konvensional.

Secara mekanis, peningkatan gula pereduksi pada berbagai titik data di atas merupakan hasil kerja sinergis dua enzim amilolitik. α -amilase berperan sebagai endoenzim yang memutus ikatan glikosidik α -1,4 secara acak di bagian internal rantai pati sehingga menghasilkan dekstrin dan oligosakarida rantai pendek, yang kemudian dipotong lebih lanjut oleh β -amilase sebagai eksoenzim yang memotong unit maltosa dari ujung non-pereduksi rantai. Kerja α -amilase menciptakan lebih banyak ujung rantai baru yang dapat diakses β -amilase, sehingga laju pembentukan gula pereduksi meningkat progresif seiring intensitas aktivitas enzimatis (Chinma et al., 2022). Selain jalur enzimatik, paparan ozon turut memengaruhi kadar gula pereduksi melalui pemutusan gugus hidroksil (OH) pada C2, C3, dan C6 unit glukosa penyusun rantai pati. Pemutusan gugus OH ini mengoksidasinya menjadi gugus karbonil dan karboksil, yang pada dosis tertentu dapat mempercepat pemutusan ikatan glikosidik dan melepaskan lebih banyak gula pereduksi seperti yang teramati pada BPK 4 ppm. Namun pada dosis berlebihan, gula pereduksi yang telah terbentuk juga rentan teroksidasi lanjut menjadi senyawa non-gula seperti asam organik dan senyawa volatil, dan mekanisme inilah yang mendasari penurunan pada dosis tertinggi (6 ppm) baik pada gabah maupun BPK (Kaur et al., 2023; Sachadyn-Król & Agriopoulou, 2020).

Secara menyeluruh, temuan dalam riset ini memperkuat teori bahwa integrasi teknologi ozon dan teknik perkecambahan mampu mengubah karakteristik biokimia beras secara signifikan (Sachadyn-Król & Agriopoulou, 2020; L. Zhu et al., 2025). Dalam konteks pengembangan pangan fungsional, peningkatan akumulasi gula pereduksi selama germinasi menjadi target utama karena mencerminkan intensitas hidrolisis pati yang berdampak positif pada perbaikan cita rasa serta nilai nutrisi produk. Merujuk pada orientasi kualitas tersebut, perlakuan beras pecah kulit dengan konsentrasi ozon 4 ppm (a2b3) menjadi kondisi optimal karena menghasilkan kadar gula pereduksi tertinggi (71,81%) yang diduga dipicu oleh aktivitas enzimatis yang lebih maksimal, sekaligus terhindar dari risiko kerusakan embrio parah seperti yang teramati pada gabah dengan konsentrasi 6 ppm (L. Zhu et al., 2025).

Sebagai pembandingan, Widyanti (2012) yang menganalisis kadar gula pereduksi beras non-germinasi dengan metode Luff Schoorl yang sama, melaporkan nilai 67,65% (beras putih), 77,06% (beras organik), dan 71,97% (beras merah), rentang yang relatif sebanding dengan hasil penelitian ini pada sampel germinasi (68,72 hingga 75,10% pada gabah dan 69,90 hingga 71,81% pada BPK). Kesamaan rentang ini mengindikasikan bahwa gula pereduksi awal pada beras non-germinasi varietas lain sudah relatif tinggi secara alami, sehingga efek germinasi tidak selalu tampak sebagai lonjakan drastis bila dibandingkan lintas varietas. Sebagai pembandingan arah perubahan, Patil & Khan (2011) melaporkan bahwa germinasi 24 jam meningkatkan kadar gula pereduksi hingga 2,75 kali lipat dibandingkan kontrol non-germinasinya sendiri, menguatkan bahwa arah peningkatan pada penelitian ini konsisten dengan pola literatur, meskipun besaran absolutnya tidak dapat dibandingkan langsung karena sumber tersebut hanya melaporkan rasio kelipatan tanpa nilai persentase awal-akhir.

Bab V Kesimpulan dan Saran

V.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Kondisi beras (gabah dan beras pecah kulit) berpengaruh nyata terhadap densitas kamba, % rendemen, % germinasi, derajat putih, seluruh parameter profil gelatinisasi pati (*Peak Viscosity, Trough, Breakdown, Final Viscosity, Setback, Peak Time*, dan *Pasting Temperature*) hasil analisis *Rapid Visco Analyzer* (RVA), kadar pati, aktivitas antioksidan, dan kadar gula pereduksi, namun tidak berpengaruh nyata terhadap kadar air.
2. Konsentrasi ozon (0, 2,4, dan 6 ppm) berpengaruh nyata terhadap % germinasi, derajat putih, seluruh parameter profil gelatinisasi pati (RVA), kadar pati, aktivitas antioksidan, dan kadar gula pereduksi, namun tidak berpengaruh nyata terhadap densitas kamba, % rendemen, dan kadar air.
3. Interaksi antara kondisi beras dan konsentrasi ozon berpengaruh nyata terhadap % germinasi, derajat putih, parameter profil gelatinisasi pati (RVA), kadar pati, aktivitas antioksidan, dan kadar gula pereduksi namun tidak berpengaruh nyata terhadap densitas kamba, % rendemen, dan kadar air.

V.2 Saran

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan mengenai analisis kadar GABA (*Gamma-Aminobutyric Acid*) secara langsung pada beras germinasi hasil ozonisasi, mengingat peningkatan GABA merupakan salah satu tujuan utama germinasi namun belum diukur secara kuantitatif pada penelitian ini.
2. Perlu dilakukan uji sifat sensoris (organoleptik) terhadap beras germinasi hasil perlakuan terbaik untuk mengetahui tingkat penerimaan konsumen, khususnya terkait tekstur yang menjadi latar belakang penelitian ini.
3. Perlu dikaji lebih lanjut mekanisme perubahan struktur granula pati akibat ozonisasi melalui analisis tambahan seperti FTIR atau XRD untuk

memperkuat interpretasi hasil profil gelatinisasi (RVA) dan mikrostruktur (SEM) yang diperoleh.

4. Perlu dilakukan uji stabilitas atau umur simpan beras germinasi hasil ozonisasi untuk mengetahui daya simpannya serta fluktuasi kadar gula pereduksi selama penyimpanan sebelum diaplikasikan pada skala yang lebih luas.
5. Kombinasi perlakuan terbaik pada penelitian ini masih berbeda-beda tergantung parameter mutu yang diutamakan, sehingga perlu penelitian lanjutan untuk menentukan satu kombinasi optimal (kondisi beras dan konsentrasi ozon) yang sesuai dengan tujuan aplikasi produk secara spesifik.
6. Perlu dilakukan pengujian lanjutan terhadap aktivitas antioksidan dengan variasi konsentrasi ozon serta waktu paparan ozon basah (wet ozonation) yang berbeda, untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai kondisi optimal yang mampu memaksimalkan kapasitas antioksidan beras germinasi tanpa menimbulkan degradasi senyawa fenolik akibat oksidasi berlebihan.

DAFTAR PUSTAKA

- Butsat, S., & Siriamornpun, S. (2010). Antioxidant capacities and phenolic compounds of the husk , bran and endosperm of Thai rice. *Food Chemistry*, 119(2), 606–613. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.07.001>
- Chaichoompu, E., Ruengphayak, S., Wattanavanitchakorn, S., Wansuksri, R., Yonkosung, U., Suklaew, P. O., Chotineeranat, S., Raungrusmee, S., Vanavichit, A., Toojinda, T., & Kamolsukyeunyong, W. (2024). Development of Whole-Grain Rice Lines Exhibiting Low and Intermediate Glycemic Index with Decreased Amylose Content. *Foods*, 13(22), 1–20.
- Charoenthaikij, P., Jangchud, K., Jangchud, A., Piyachomkwan, K., Tungtrakui, P., & Prinyawiwatkui, W. (2009). Germination Conditions Affect Physicochemical Properties of Germinated Brown Rice Flour. *JOURNAL OF FOOD SCIENCE*, 74(9), 658–665. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01345.x>
- Chinma, C. E., Adedeji, O., Jolayemi, O. S., Ezeocha, V. C., Ilowefah, M. A., Rosell, C. M., Adebo, J. A., Wilkin, J. D., & Adebo, O. A. (2022). Impact of germination on the techno-functional properties, nutritional composition, and health promoting compounds of brown rice and its products: A review. *Journal of Food Science*, 89.
- Ciulu, M., Gurrea, M. de la L. C., & Carretero, A. S. (2018). Extraction and Analysis of Phenolic Compounds in Rice : A Review. *Journal Molecules*, 1–20. <https://doi.org/10.3390/molecules23112890>
- Damaris, R. N., Lin, Z., Yang, P., & He, D. (2019). The Rice Alpha-Amylase , Conserved Regulator of Seed Maturation and Germination. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(2), 0–17. <https://doi.org/10.3390/ijms20020450>
- Dang, J. M. C., & Copeland, L. (2004). Studies of the fracture surface of rice grains using environmental scanning electron microscopy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 713(April 2004), 707–713. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1671>
- Demone, J., Barton, K. A., & Altosaar, I. (2022). *Transverse Sectioning of Mature Rice (Oryza sativa L .) Kernels for Scanning Electron Microscopy Imaging*

Using Pipette Tips as Immobilization Support. January, 1–11.
<https://doi.org/10.3791/61407>

Gomez, K. A., & Gomez, A. A. (1984). *STATISTICAL PROCEDURES FOR AGRICULTURAL RESEARCH Second Edition* (second edi, Vol. 6). John Wiley & Sons (Wiley-Interscience).

Jabeen, R., Hussain, S. Z., Jan, N., Fatima, T., Naik, H. R., & Jabeen, A. (2022). No Title. *Cereal Chemistry, 100*(2), 0–3. <https://doi.org/10.1002/cche.10620>

Kaur, K., Kaur, P., Kumar, S., Zalpouri, R., & Singh, M. (2023). Ozonation as a Potential Approach for Pesticide and Microbial Detoxification of Food Grains with a Focus on Nutritional and Functional Quality. *Food Reviews International, 39*(9), 6129–6161.
<https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2092129>

Kurniasari, Y., Khasanah, K., Yunita, V., Alawiyah, L., & WIjayanti, P. (2022). Aktivitas Antioksidan Ekstrak Serbuk Bekatul Menggunakan Metode DPPH, ABTS, dan FRAP. *Jurnal Ilmu Farmasi, 13*(2), 82–90.

Lestari, S., & Kurniawan, F. (2021). Pemutuan Fisik Gabah dan Beras Menurut Standar Nasional Indonesia (SNI). *Journal of Applied Agricultural Sciences, 5*(2), 159–168. <https://doi.org/10.25047/agriprima.v5i2.438>

Maniglia, B., Lima, D., Junior, M. M., Le-bail, P., Augusto, P. E. D., Maniglia, B., Lima, D., Junior, M. M., Le-bail, P., Le-bail, A., & Augusto, P. E. D. (2022). Hydrogels based on ozonated cassava starch : Effect of ozone processing and gelatinization conditions on enhancing 3D-printing applications. *Journal of Biological Macromolecules, 138*, 1087–1097.

Maqbool, N., Hussain, A., Kumar, K., Srivastava, S., Kumar, V., Shams, R., Bashir, M., Majeed, T., & Manzoor, S. (2024). Ozonation effects on structural and functional characteristics of starch. *Future Foods, 9*(March), 100334. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100334>

Meera, K., Smita, M., & Haripriya, S. (2019). Varietal distinctness in physical and engineering properties of paddy and brown rice from southern India. *Journal of Food Science and Technology, 56*(3), 1473–1483. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03631-x>

- Mihretu, M. A. (2025). Key Factors Affecting the Quality of Milling Recovery in Rice Processing. *American Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 10(1), 29–39.
- Moongngarm, A., & Saetung, N. (2010). Comparison of chemical compositions and bioactive compounds of germinated rough rice and brown rice. *Food Chemistry*, 122(3), 782–788. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.03.053>
- Müller, A., Carteri, P., Trojahn, M., Grohs, M., Bressiani, J., Eduardo, P., Francine, K., & Marlon, E. (2021). Effects of cultivars and fertilization levels on the quality of rice milling : A diagnosis using near-infrared spectroscopy , X-ray diffraction , and scanning electron microscopy scanning electron microscopy. *Food Research International*, 147(May), 110524. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110524>
- Munarko, H., Sitanggang, A. B., & Kusnandar, F. (2019). *Kecambah Beras Pecah Kulit : Proses Produksi dan Karakteristiknya*. 8.
- Munarko, H., Sitanggang, A. B., Kusnandar, F., & Budijanto, S. (2022). Germination of five Indonesian brown rice: evaluation of antioxidant, bioactive compounds, fatty acids and pasting properties. *Food Science and Technology (Brazil)*, 42. <https://doi.org/10.1590/fst.19721>
- Nakamura, S., Katsura, J., Maruyama, Y., & Ohtsubo, K. (2021). Evaluation of Hardness and Retrogradation of Cooked Rice Based on Its Pasting Properties Using a Novel RVA Testing. *Foods*, 10(5), 23.
- Nasional, B. S. (2020). SNI 6128:2020 Beras. *Standar Nasional Indonesia*.
- 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. *Journal of Applied Sciences*, 5–8.
- Ohtsubo, K., Suzuki, K., Yasui, Y., & Kasumi, T. (2005). Bio-functional components in the processed pre-germinated brown rice by a twin-screw extruder. *Journal of Food Composition and Analysis*, 18, 303–316. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2004.10.003>

- Pandiselvam, R., Mayookha, V. P., Kothakota, A., Sharmila, L., Bharathi, C. P., Gomathy, K., & Srikanth, V. (2019). Impact of Ozone Treatment on Seed Germination- A Systematic Review Impact of Ozone Treatment on Seed Germination – A Systematic Review. *Ozone: Science & Engineering*, 00(00), 1–16. <https://doi.org/10.1080/01919512.2019.1673697>
- Pandiselvam, R., Thirupathi, V., Chandrasekar, V., & Kothakota, A. (2017). Numerical Simulation and Validation of Mass Transfer Process of Ozone Gas in Rice Grain Bulks. *Ozone: Science & Engineering*, 00(00), 1–7. <https://doi.org/10.1080/01919512.2017.1404902>
- Pang, Y., Ali, J., Wang, X., Franje, N. J., Revilla, E., Xu, J., Li, Z., & Li, Z. (2016). Relationship of Rice Grain Amylose , Gelatinization Temperature and Pasting Properties for Breeding Better Eating and Cooking Quality of Rice Varieties. *Journal Pone*, 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168483>
- Patil, S. B., & Khan, K. (2011). Germinated brown rice as a value added rice product : A review. *Journal Food Science Technology*, 48(December), 661–667. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0232-4>
- Preecharram, S., Posoongnoen, S., Thummavongsa, T., Pasom, W., Panyakom, Si., Sripakdee, T., & Jandaruang, J. (2025). Values , bioactive compound , antioxidant activities of brown rice and germinated brown rice , and the pellet products. *Creative Science*, 17(1), 1–9. <https://doi.org/10.55674/cs.v17i1.257996>
- Pudjihastuti, I., Supriyo, E., & Rama Devara, H. (2021). Pengaruh Rasio Bahan Baku Tepung Komposit (Ubi Kayu, Jagung dan Kedelai Hitam) Pada Kualitas Pembuatan Beras Analog. *Gema Teknologi*, 21(2), 61–66.
- Sachadyn-Król, M., & Agriopoulou, S. (2020). Ozonation as a Method of Abiotic Elicitation Improving the Health-Promoting Properties of Plant. *Molecules*, 1–25.
- Saputra, W. D., Saputra, A. D., & Triwitono, P. (2024). *Germination Changes The Chemical Composition and Improves*. 9(2), 141–153.
- Sasmitaloka, K. S., Widowati, S., & Sukasih, E. (2020). Karakterisasi Sifat Fisikokimia, Sensori, dan Fungsional Nasi Instan dari Beras Amilosa Rendah. *Jurnal Penelitian Pascapanen Pertanian*, 17, 1–14.

- Senduk, T. W., Montolalu, L. A. D. Y., Dotulong, V., Ratulangi, S., Ratulangi, U. S., & Bahu, K. U. (2020). RENDEMEN EKSTRAK AIR REBUSAN DAUN TUA MANGROVE *Sonneratia alba* (The rendement of boiled water extract of mature leaves of mangrove *Sonneratia alba*). *Jurnal Perikanan Dan Kelautan Tropis*, 11(1), 9–15.
- Shah, N. N. A. K., Rahman, R. A., & Hashim, D. M. (2013). Changes in physicochemical characteristics of ozone-treated raw white rice. *Journal of Food Science and Technology*, Anonymous 1982. <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(January), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.758547>
- 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. *ComprRev Food Sci Food Saf*, July 2024, 1–37. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70173>
- Srivastava, S., Mishra, G., & Mishra, H. N. (2021). Vulnerability of different life stages of *Sitophilus oryzae* insects in stored rice grain to ozone treatment and its effect on physico-chemical properties in rice grain. *Food Frontiers*, February, 1–14. <https://doi.org/10.1002/fft2.89>
- Tatarczak-michalewska, M., & Flieger, J. (2022). Application of High-Performance Liquid Chromatography with Diode Array Detection to Simultaneous Analysis of Reference Antioxidants and 1 , 1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) in Free Radical Scavenging Test. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19.
- Verma, V. K., & Sandhu, N. (2024). Understanding anaerobic germination in direct-seeded rice : a genomic mapping approach. *BMC Plant Biology*, 24(1).
- 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).

- Wanti, S., Andriani, M. A. ., & Parnanto, N. H. R. (2015). Pengaruh berbagai jenis beras terhadap aktivitas antioksidan pada angkak oleh *Monascus purpureus*. *Jurnal Biofarmasi*, 13(1), 1–5. <https://doi.org/10.13057/biofar/fl30101>
- Widyanti, M. K. (2012). PENGARUH KADAR SERAT TERHADAP KADAR GULA PEREDUKSI PADA BERAS PUTIH, BERAS MERAH, DAN BERAS ORGANIK (Suatu Upaya Penggalan Pangan Alternatif Berindeks Glikemik Rendah Bagi Penderita Diabetes). *Universitas Airlangga*.
- Xia, Q., Tao, H., Li, Y., Pan, D., Cao, J., Liu, L., Zhou, X., & Barba, F. J. (2020). characterizing physicochemical, nutritional and quality attributes of wholegrain oryza sativa L. subjected to high intensity ultrasound - stimulated pre germination. *Food Control*, 108.
- Yeo, J., & Shahidi, F. (2019). Revisiting DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) assay as a useful tool in antioxidant evaluation: a new IC100 concept to address its limitations. *Journal of Food Bioactives*, 36–42. <https://doi.org/10.31665/JFB.2019.7196>
- Yodpitak, S., Mahatheeranont, S., & Boonyawan, D. (2019). Cold plasma treatment to improve germination and enhance the bioactive phytochemical content of germinated brown rice. *Food Chemistry*, 289(September 2018), 328–339. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.061>
- Yustina, I., Rachmawati, D., Aziz, F. N., Setiasih, Nirmalasari, S., & Baswarsati. (2024). Yield , milling quality , rice quality and preferences of superior and specific location rice varieties. *Jurnal IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1377(1), 1–8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1377/1/012030>
- Zhu, F. (2018). Effect of ozone treatment on the quality of grain products. *Food Chemistry*, May. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.047>
- Zhu, L., Xie, Q., Qin, D., He, Y., Yuan, H., Mao, Y., Pan, Z., Li, G., & Xia, X. (2025). Germination-Induced Biofortification : Improving Nutritional Efficacy , Physicochemical Properties , and In Vitro Digestibility of Black Rice Flour. *Journal of Foods*.

LAMPIRAN

Lampiran A Perhitungan Rancangan Percobaan Penelitian

Pada penelitian ini penentuan jumlah ulangan menggunakan rumus yang bersumber dari Gasperz (1955) sebagai berikut:

t = Kombinasi Perlakuan

r = Ulangan

Maka:

$$(t-1)(r-1) \geq 15$$

$$(8-1)(r-1) \geq 15$$

$$7(r-1) \geq 15$$

$$7r-7 \geq 15$$

$$7r \geq 22$$

$$r \geq 3,14 \sim 3 \text{ kali ulangan}$$

Maka dari itu, penelitian ini didapatkan 8 perlakuan dengan 3 kali ulangan sehingga menghasilkan 24 satuan percobaan.

Lampiran B. Analisis Densitas Kamba (Banuera 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 bobot sampel sebelum direhidrasi sebanyak 100 ml dengan volume gelas ukur yang sama (100 ml).

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

Keterangan:

W1 = gelas ukur 100 ml

W2 = sampel

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

Prosedur diawali dengan menimbang beras putih sebelum dikecambahkan sebagai bobot 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 putih kecambah ditimbang sebagai bobot akhir (W_k). Rendemen beras putih kecambah dihitung sebagai presentase bobot akhir terhadap bobot awal.

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

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

Uji persentase perkecambahan dilakukan dengan metode kertas saring menggunakan 20 butir benih yang diambil secara acak dari sampel benih murni, 55 kemudian dibagi menjadi empat ulangan masing-masing 5 butir. Benih diletakkan pada cawan petri yang telah dilapisi kertas saring lembap dan disusun dengan jarak seragam. Selanjutnya cawan petri diinkubasi pada suhu sekitar 18–22°C dan diamati setiap hari hingga hari ke-14. 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 E. Analisis Derajat Putih Metode Kolorimetri (Yasmin et al., 2023)

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 F. Analisis Pasting Profile RVA (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 dimasukan kedalam tabung canister RVA. Selanjutnya ditambahkan aquadest 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 G. Analisis Morfologi Permukaan Metode *Scanning Electron Microscope* (SEM) (Rohmah et al., 2022)

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

Lampiran H. 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 2 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.

$$\text{Kadar Air (\%)} = \frac{W_2 - W_3}{W_2 - W_1} \times 100\%$$

Keterangan:

W_1 = Berat cawan kosong (setelah dioven)

W_2 = Berat cawan + sampel awal (sebelum dioven)

W_3 = Berat cawan + sampel akhir (setelah kering konstan)

Lampiran I. Analisis Kadar Pati dan Kadar Gula Pereduksi Metode *Luff Schoorl* (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.

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

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:

mg_1 = Massa glukosa dalam tabel pada baris atas (nilai lebih kecil)

mg_2 = Massa glukosa dalam tabel pada baris bawah (nilai lebih besar)

V_1 = Volume Tio dalam tabel pada baris atas (nilai lebih kecil)

V_2 = Volume Tio dalam tabel pada baris bawah (nilai lebih besar)

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

Keterangan:

FP = Faktor pengencer

0,9 = Faktor Konversi

$$\% \text{ Gula Pereduksi} = \frac{\text{mg Glukosa} \times FP}{\text{mg Sampel}} \times 100\%$$

Keterangan:

FP = Faktor pengencer

Lampiran J. Uji Aktivitas Antioksidan Dengan Metode DPPH (Pratiwi et al., 2010)

Untuk penentuan aktivitas antioksidan, masing-masing sampel dengan berbagai konsentrasi dipipet sebanyak 0,2 mL dengan pipet mikro dan masukan ke dalam vial, kemudian tambahkan 3,8 mL larutan DPPH 50 μ M. Kocok campuran hingga homogen dan dibiarkan selama 30 menit ditempat gelap, ukur serapannya dengan spektrofotometri UV–Vis pada panjang gelombang maksimum DPPH. Aktivitas antioksidan sampel oleh besarnya hambatan serapan radikal DPPH dapat diketahui melalui perhitungan persentase inhibisi serapan DPPH dengan menggunakan rumus :

$$\text{Inhibisi} = \frac{\text{Abs. blanko} - \text{Abs. sampel}}{\text{Abs. Blanko}} \times 100\%$$

Keterangan :

Abs. Blanko = Absorban DPPH 50 μ M

Abs. Sampel = Absorbansi Sampel Uji

Aktivitas antioksidan ditentukan dengan menggunakan nilai IC_{50} (Inhibition Concentration 50%). IC_{50} adalah bilangan yang menunjukkan konsentrasi ekstrak yang mampu menghambat aktivitas suatu radikal sebesar 50%. Nilai IC_{50} masing-masing konsentrasi sampel dihitung dengan menggunakan rumus persamaan regresi linier, yang menyatakan hubungan antara konsentrasi fraksi antioksidan yang dinyatakan sebagai sumbu x dengan % inhibisi yang dinyatakan sebagai sumbu y dari seri replikasi pengukuran.

Lampiran K. Perhitungan Kebutuhan Sampel

Tabel 1. Perhitungan Kebutuhan Sampel

No.	Analisis	Berat Sampel (gram)	Banyaknya	Total (gram)
1.	Uji Densitas Kamba	10	24	240
2.	Uji % Rendemen	2	24	48
3.	Uji % Germinasi	2	24	48
4.	Uji Derajat Putih	2	24	48
5.	Uji <i>Pasting</i> (RVA)	3	24	72
6.	Uji Kadar Air	2	24	48
7.	Uji Kadar Pati	0,1	24	2,4
8.	Uji Antioksidan DPPH	0,2	24	4,8
9.	Uji Gula Reduksi	0,1	24	2,4
Total				513,6

Lampiran L. Kebutuhan Bahan Penelitian

Tabel 2. Kebutuhan Bahan Penelitian

No.	Nama Bahan	Harga	Keterangan	Jumlah	Total
1.	Beras Inpari 32	Rp13.000,00	Kg	1	Rp13.000,00
2.	Akuades	Rp8000,00	L	5	Rp40.000,00
Total					Rp53.000,00

Lampiran M. Kebutuhan Analisis Penelitian

Tabel 3. Kebutuhan Analisis Penelitian

No.	Analisis	Jumlah Sampel	Harga	Jumlah
1.	Uji Densitas Kamba	24 Sampel	Rp5.000,00	Rp120.000,00
2.	Uji % Rendemen	24 Sampel	Rp5.000,00	Rp120.000,00
3.	Uji % Germinasi	24 Sampel	Rp5.000,00	Rp120.000,00
4.	Uji Derajat Putih	24 Sampel	Rp25.000,00	Rp600.000,00
5.	Uji <i>Pasting</i> (RVA)	8 Sampel	Rp500.000,00	Rp4.000.000,00
6.	Uji Kadar Air	24 Sampel	Rp5.000,00	Rp120.000,00
7.	Uji Kadar Pati	24 Sampel	Rp650.000,00	Rp3.250.000,00
8.	Uji Antioksidan DPPH	24 Sampel	Rp250.000,00	Rp6.000.000,00
9.	Uji Gula Reduksi	24 Sampel	Rp25.000,00	Rp600.000,00
10.	Sewa Laboratorium	1 Semester	Rp250.000,00	Rp250.000,00
Total				Rp15.180.000,00

Lampiran N. Data Hasil Analisis Respon Fisik Densitas Kamba

Tabel 4. Data Perhitungan Nilai Densitas Kamba Beras Putih Germinasi

Sampel		Ulangan	Berat (gram)		V (ml)	Densitas Kamba (g/ml)
			W1	W2		
A1	B1	1	94,00	121,00	50,00	0,54
		2	94,00	119,50	50,00	0,51
		3	94,00	121,90	50,00	0,56
	B2	1	94,00	117,00	50,00	0,46
		2	94,00	118,50	50,00	0,49
		3	94,00	115,70	50,00	0,43
	B3	1	94,00	119,00	50,00	0,50
		2	94,00	120,30	50,00	0,53
		3	94,00	117,60	50,00	0,47
	B4	1	94,00	119,00	50,00	0,50
		2	94,00	121,00	50,00	0,54
		3	94,00	118,00	50,00	0,48
A2	B1	1	94,00	129,00	50,00	0,70
		2	94,00	127,40	50,00	0,67
		3	94,00	130,50	50,00	0,73
	B2	1	94,00	129,00	50,00	0,70
		2	94,00	131,00	50,00	0,74
		3	94,00	127,00	50,00	0,66
	B3	1	94,00	131,00	50,00	0,74
		2	94,00	129,70	50,00	0,71
		3	94,00	132,40	50,00	0,77
	B4	1	94,00	131,00	50,00	0,74
		2	94,00	132,30	50,00	0,77
		3	94,00	129,70	50,00	0,71

Contoh Perhitungan:

Nilai Densitas Kamba Perlakuan a1b1 ulangan 1

Diketahui:

W gelas ukur kosong (W1) = 94 gram

W gelas ukur + sampel (W2) = 121 gram

Volume gelas ukur (V) = 50 ml

$$\begin{aligned} \text{Densitas Kamba (g/ml)} &= \frac{W_2 - W_1}{V} \\ &= \frac{121 \text{ g} - 94 \text{ g}}{50 \text{ ml}} = 0,54 \text{ g/ml} \end{aligned}$$

Tabel 5. Data Hasil Analisis Respon Fisik Densitas Kamba

Kondisi Beras (A) sebagai Petak Utama	Ulangan	Konsentrasi Ozon (B) sebagai Anak Petak				Jumlah	Rata- Rata
		0 ppm (b1)	2 ppm (b2)	4 ppm (b3)	6 ppm (b4)		
Gabah (a₁)	1	0,54	0,46	0,50	0,50	2,00	0,50
	2	0,51	0,50	0,54	0,56	2,11	0,53
	3	0,56	0,41	0,45	0,47	1,89	0,47
Sub Total		1,61	1,37	1,49	1,53	6,00	1,50
Rata-Rata		0,54	0,46	0,50	0,51	2,00	0,50
Beras Pecah Kulit (a₂)	1	0,70	0,70	0,74	0,74	2,88	0,72
	2	0,67	0,74	0,71	0,77	2,89	0,72
	3	0,73	0,66	0,77	0,71	2,87	0,72
Sub Total		2,10	2,10	2,22	2,22	8,64	2,16
Rata-Rata		0,70	0,70	0,74	0,74	2,88	0,72
Jumlah Total		3,71	3,47	3,71	3,75	14,64	3,66
Rata-Rata Total		0,62	0,58	0,62	0,63	2,44	0,61

Perhitungan:

Diketahui: $a = 2$, $b = 4$, $r = 3$

1. Faktor Koreksi (FK)

$$\begin{aligned} FK &= \frac{Y_{...}^2}{abr} \\ &= \frac{(14,64)^2}{2 \times 4 \times 3} = 8,93040 \end{aligned}$$

2. Jumlah Kuadrat Total (JKT)

$$\begin{aligned} JKT &= \sum_{i,j,k} Y_{i,j,k}^2 - FK \\ &= (0,54)^2 + (0,51)^2 + \dots + (0,71)^2 - 8,93040 \\ &= 0,32740 \end{aligned}$$

3. Jumlah Kuadrat Petak Utama

$$\begin{aligned} JK \text{ (Petak Utama)} &= \frac{\sum_{i,k} Y_{i,k}^2}{b} - FK \\ &= \frac{2,00^2 + 2,11^2 + \dots + 2,87^2}{4} - 8,93040 \\ &= 0,2965 \end{aligned}$$

4. Jumlah Kuadrat Kelompok (JKK)

$$\begin{aligned} JKK &= \frac{\sum_k Y_{...k}^2}{ab} - FK \\ &= \frac{4,88^2 + \dots + 4,76^2}{3 \times 4} - 8,93040 \\ &= 0,004 \end{aligned}$$

5. Jumlah Kuadrat Faktor A

$$\begin{aligned} JK \text{ (A)} &= \frac{\sum_i Y_i^2}{rb} - FK \\ &= \frac{6,00^2 + 8,64^2}{3 \times 4} - 8,93040 \\ &= 0,290 \end{aligned}$$

6. Jumlah Kuadrat Galat Faktor A

$$\begin{aligned} JK \text{ (Galat a)} &= JK \text{ (Petak Utama)} - JKK - JK(A) \\ &= 0,2965 - 0,004 - 0,290 \\ &= 0,002 \end{aligned}$$

7. Jumlah Kuadrat Faktor B

$$\begin{aligned}
 JK(B) &= \frac{\sum_j y_j^2}{ra} - FK \\
 &= \frac{3,71^2 + 3,47^2 + \dots + 3,75^2}{3 \times 2} - 8,93040 \\
 &= 0,008
 \end{aligned}$$

8. Jumlah Kuadrat Interaksi A x B

$$\begin{aligned}
 JK(AB) &= \frac{\sum_{i,j} y_{ij}^2}{r} - FK - JK(A) - JK(B) \\
 &= \frac{1,61^2 + 1,37^2 + \dots + 2,22^2}{3} - 8,93040 - 0,290 - 0,008 \\
 &= 0,007
 \end{aligned}$$

9. Jumlah Kuadrat Galat Faktor B

$$\begin{aligned}
 JK(\text{Galat B}) &= JKT - JK(\text{Petak Utama}) - JK(B) - JK(AB) \\
 &= 0,32740 - 0,2965 - 0,008 - 0,007 \\
 &= 0,016
 \end{aligned}$$

Tabel 6. Analisis Variasi (ANAVA) Analisis Respon Fisik Densitas Kamba Beras Putih Germinasi

Sumber Keragaman (SK)	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Total (KT)	Fhitung	Ftabel 5%	Notasi
Petak Utama						
Kelompok (K)	2	0,004	0,002	1,44	19,00	tn
Faktor A	1	0,290	0,290	232,32	18,51	*
Galat (A)	2	0,002	0,001			
Total	5	0,297	0,293			
Anak Petak						
Faktor B	3	0,008	0,003	2,037	3,49	tn
Interaksi (AB)	3	0,007	0,002	1,640	3,49	tn
Galat (B)	12	0,016	0,001			
Total	18	0,031	0,006			

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel analisis variansi (ANAVA) dapat diketahui bahwa kondisi bahan (Faktor A) berpengaruh terhadap nilai densitas kamba beras putih germinasi. Perlakuan spesifik yang mempengaruhi nilai densitas kamba Beras Putih Germinasi dapat diketahui dengan menggunakan uji lanjut LSD.

Uji Lanjut LSD Nilai Densitas Kamba Faktor A

$$t_{(0,05; 3)} = 4,303$$

$$S_y = \sqrt{\frac{2 \text{ KT (Galat a)}}{r \times b}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \times 0,001}{3 \times 4}} = 0,014$$

$$\text{LSD} = S_y \times t_{(0,05; 3)}$$

$$= 0,014 \times 4,303 = 0,062$$

Tabel 7. Uji Lanjut LSD Faktor Kondisi Beras (A) terhadap Nilai Densitas Kamba Beras Putih Germinasi

LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan			Notasi
			1	2	3	
0,062	a1	0,50	-			a
	a2	0,72	0,22*	-		b

Keterangan: * = berbeda

tn = tidak berbeda

Tabel 8. Pengaruh Kondisi Bahan (faktor A) terhadap Nilai Densitas Kamba Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32

Kondisi Bahan (A)	Rata-rata	Taraf Nyata 5%
a1 (Gabah)	0,50 ± 0,041	a
a2 (Beras Pecah Kulit)	0,72 ± 0,033	b

Kesimpulan:

Berdasarkan hasil uji lanjut LSD, maka dapat disimpulkan perlakuan a1 berbeda nyata terhadap perlakuan a2.

Lampiran O. Data Hasil Analisis Respon Fisik % Rendemen

Tabel 9. Data Perhitungan % Rendemen Beras Putih Germinasi

Sampel		Ulangan	Berat (gram)		%Rendemen
			W0	Wk	
A1	B1	1	111	106	95,50
		2	114	106	92,98
		3	110	107	97,27
	B2	1	147	140	95,24
		2	145	141	97,24
		3	150	139	92,67
	B3	1	275	270	98,18
		2	278	267	96,04
		3	271	268	98,89
	B4	1	292	281	96,23
		2	290	273	94,14
		3	295	288	97,63
A2	B1	1	250	221	88,40
		2	248	224	90,32
		3	253	218	86,17
	B2	1	144	128	88,89
		2	148	127	85,81
		3	142	129	90,85
	B3	1	284	257	90,49
		2	281	247	87,90
		3	285	260	91,23
	B4	1	287	254	88,50
		2	285	260	91,23
		3	291	251	86,25

Contoh Perhitungan:

Nilai % Rendemen Perlakuan a1b1 ulangan 1

Diketahui:

Berat awal bahan baku (W_0) = 111 gram

Berat akhir produk (W_k) = 106 gram

$$\begin{aligned}\% \text{ Rendemen Beras Putih Kecambah} &= \frac{W_k}{W_0} \times 100\% \\ &= \frac{106 \text{ gram}}{111 \text{ gram}} \times 100\% = 95,50\%\end{aligned}$$

Tabel 10. Data Hasil Analisis Respon Fisik % Rendemen Beras Putih Germinasi

Kondisi Beras (A) sebagai Petak Utama	Ulangan	Konsentrasi Ozon (B) sebagai Anak Petak				Jumlah	Rata-Rata
		0 ppm (b1)	2 ppm (b2)	4 ppm (b3)	6 ppm (b4)		
Gabah (a ₁)	1	95,50	95,24	98,18	96,23	385,15	96,29
	2	92,98	97,24	96,04	94,14	380,40	95,10
	3	97,27	92,67	98,89	97,63	386,46	96,62
Sub Total		285,75	285,15	293,11	288,00	1152,01	288,00
Rata-Rata		95,250	95,05	97,70	96,00	384,00	96,00
Beras Pecah Kulit (a ₂)	1	88,4	88,89	90,49	88,50	356,28	89,07
	2	90,32	85,81	87,09	91,23	355,26	88,82
	3	86,17	90,85	91,23	86,25	354,50	88,63
Sub Total		264,89	265,55	269,62	265,98	1066,04	266,51
Rata-Rata		88,30	88,52	89,87	88,66	355,35	88,84
Jumlah Total		550,64	550,7	562,73	553,98	2218,05	554,51
Rata-Rata Total		91,77	91,78	93,79	92,33	369,68	92,42

Perhitungan:

Diketahui: a = 2, b = 4, r = 3

1. Faktor Koreksi (FK)

$$\begin{aligned} \text{FK} &= \frac{Y_{...}^2}{abr} \\ &= \frac{(2218,05)^2}{2 \times 4 \times 3} = 204989,408 \end{aligned}$$

2. Jumlah Kuadrat Total (JKT)

$$\begin{aligned} \text{JKT} &= \sum_{i,j,k} Y_{i,j,k}^2 - \text{FK} \\ &= (95,50)^2 + (92,98)^2 + \dots + (86,25)^2 - 204989,408 \\ &= 396,005 \end{aligned}$$

3. Jumlah Kuadrat Petak Utama

$$\begin{aligned} \text{JK (Petak Utama)} &= \frac{\sum_{i,k} Y_{i,k}^2}{b} - \text{FK} \\ &= \frac{385,15^2 + 380,40^2 + \dots + 354,50^2}{4} - 204989,408 \\ &= 313,434 \end{aligned}$$

4. Jumlah Kuadrat Kelompok (JKK)

$$\begin{aligned} \text{JKK} &= \frac{\sum_k Y_{...k}^2}{ab} - \text{FK} \\ &= \frac{741,43^2 + \dots + 740,96^2}{3 \times 4} - 204989,408 \\ &= 2,567 \end{aligned}$$

5. Jumlah Kuadrat Faktor A

$$\begin{aligned} \text{JK (A)} &= \frac{\sum_i Y_i^2}{rb} - \text{FK} \\ &= \frac{1152,01^2 + 1066,04^2}{3 \times 4} - 204989,408 \\ &= 307,952 \end{aligned}$$

6. Jumlah Kuadrat Galat Faktor A

$$\begin{aligned} \text{JK (Galat a)} &= \text{JK (Petak Utama)} - \text{JKK} - \text{JK(A)} \\ &= 313,434 - 2,567 - 307,952 \\ &= 2,916 \end{aligned}$$

7. Jumlah Kuadrat Faktor B

$$\begin{aligned} JK (B) &= \frac{\sum_j y_j^2}{ra} - FK \\ &= \frac{550,64^2 + 550,70^2 + \dots + 553,98^2}{3 \times 2} - 8,93040 \\ &= 16,224 \end{aligned}$$

8. Jumlah Kuadrat Interaksi A x B

$$\begin{aligned} JK (AB) &= \frac{\sum_{i,j} y_{ij}^2}{r} - FK - JK (A) - JK (B) \\ &= \frac{285,75^2 + 285,15^2 + \dots + 265,98^2}{3} - 204989,408 - 307,952 - 16,224 \\ &= 1,375 \end{aligned}$$

9. Jumlah Kuadrat Galat Faktor B

$$\begin{aligned} JK (\text{Galat B}) &= JKT - JK (\text{Petak Utama}) - JK (B) - JK (AB) \\ &= 396,005 - 313,434 - 16,224 - 1,375 \\ &= 64,972 \end{aligned}$$

Tabel 11. Analisis Variasi (ANAVA) Analisis Respon Fisik % Rendemen Beras Putih Germinasi

Sumber Keragaman (SK)	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Total (KT)	Fhitung	Ftabel 5%	Notasi
Petak Utama						
Kelompok (K)	2	2,567	1,283	0,880	19,000	tn
Faktor A	1	307,952	307,952	211,247	18,513	*
Galat (A)	2	2,916	1,458			
Total	5	313,434	310,693			
Anak Petak						
Faktor B	3	16,224	5,408	0,999	3,490	tn
Interaksi (AB)	3	1,375	0,458	0,085	3,490	tn
Galat (B)	12	64,972	5,414			
Total	18	82,571	11,281			

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel analisis variansi (ANAVA) dapat diketahui bahwa kondisi bahan (Faktor A) berpengaruh terhadap % Rendemen beras putih germinasi. Perlakuan spesifik yang mempengaruhi % Rendemen Beras Putih Germinasi dapat diketahui dengan menggunakan uji lanjut LSD.

Uji Lanjut LSD % Rendemen Faktor A

$$t_{(0,05; 3)} = 4,303$$

$$S_y = \sqrt{\frac{2 \text{ KT (Galat a)}}{r \times b}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \times 1,458}{3 \times 4}} = 0,493$$

$$\text{LSD} = S_y \times t_{(0,05; 3)}$$

$$= 0,493 \times 4,303 = 2,121$$

Tabel 12. Uji Lanjut LSD Faktor Kondisi Beras (A) terhadap Nilai Densitas Kamba Beras Putih Germinasi

LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan			Notasi
			1	2	3	
2,121	a2	88,84	-			a
	a1	96,00	7,16*	-		b

Keterangan: * = berbeda

tn = tidak berbeda

Tabel 13. Pengaruh Kondisi Bahan (faktor A) terhadap % Rendemen Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32

Kondisi Bahan (A)	Rata-rata	Taraf Nyata 5%
a1 (Gabah)	96,00 ± 1,95	a
a2 (Beras Pecah Kulit)	88,84 ± 2,24	b

Kesimpulan:

Berdasarkan hasil uji lanjut LSD, maka dapat disimpulkan perlakuan a1 berbeda nyata terhadap perlakuan a2.

Lampiran P. Data Hasil Analisis Respon Fisik % Germinasi

Tabel 14. Data Perhitungan % Germinasi Beras Putih Germinasi

Sampel		Ulangan	Jumlah (Butir)		%Germinasi
			Jumlah Kecambah Normal	Jumlah Benih yang Diuji	
A1	B1	1	44	50	88,00
		2	42	50	84,00
		3	45	50	90,00
	B2	1	46	50	92,00
		2	43	50	86,00
		3	45	50	90,00
	B3	1	40	50	80,00
		2	41	50	82,00
		3	43	50	86,00
	B4	1	40	50	80,00
		2	39	50	78,00
		3	41	50	82,00
A2	B1	1	43	50	86,00
		2	41	50	82,00
		3	42	50	84,00
	B2	1	25	50	50,00
		2	27	50	54,00
		3	24	50	48,00
	B3	1	32	50	64,00
		2	30	50	60,00
		3	33	50	66,00
	B4	1	3	50	6,00
		2	4	50	8,00
		3	2	50	4,00

Contoh Perhitungan:

Nilai % Germinasi Perlakuan a1b1 ulangan 1

Diketahui:

Jumlah Kecambah Normal = 44 butir

Jumlah Benih yang Diuji = 50 butir

$$\begin{aligned}\text{Persentase Perkecambahan (\%)} &= \frac{\text{Jumlah Kecambah Normal}}{\text{Jumlah Benih yang Diuji}} \times 100\% \\ &= \frac{44 \text{ butir}}{50 \text{ butir}} \times 100\% = 88,00\%\end{aligned}$$

Tabel 15. Data Hasil Analisis Respon Fisik % Germinasi Beras Putih Germinasi

Kondisi Beras (A) sebagai Petak Utama	Ulangan	Konsentrasi Ozon (B) sebagai Anak Petak				Jumlah	Rata-Rata
		0 ppm (b1)	2 ppm (b2)	4 ppm (b3)	6 ppm (b4)		
Gabah (a ₁)	1	88,00	92,00	80,00	80,00	340,00	85,00
	2	84,00	86,00	82,00	78,00	330,00	82,50
	3	90,00	90,00	86,00	82,00	348,00	87,00
Sub Total		262,00	268,00	248,00	240,00	1018,00	254,50
Rata-Rata		87,33	89,33	82,67	80,00	339,33	84,83
Beras Pecah Kulit (a ₂)	1	86,00	50,00	64,00	6,00	206,00	51,50
	2	82,00	54,00	60,00	8,00	204,00	51,00
	3	84,00	48,00	66,00	4,00	202,00	50,50
Sub Total		252,00	152,00	190,00	18,00	612,00	153,00
Rata-Rata		84,00	50,67	63,33	6,00	204,00	59,46
Jumlah Total		514,00	420,00	438,00	258,00	1630,00	407,50
Rata-Rata Total		85,67	70,00	73,00	43,00	271,67	67,92

Perhitungan:

Diketahui: $a = 2$, $b = 4$, $r = 3$

1. Faktor Koreksi (FK)

$$\begin{aligned} FK &= \frac{Y_{....}^2}{abr} \\ &= \frac{(1630,00)^2}{2 \times 4 \times 3} = 110704,16 \end{aligned}$$

2. Jumlah Kuadrat Total (JKT)

$$\begin{aligned} JKT &= \sum_{i,j,k} Y_{i,j,k}^2 - FK \\ &= (88,00)^2 + (84,00)^2 + \dots + (4,00)^2 - 110704,16 \\ &= 16947,83 \end{aligned}$$

3. Jumlah Kuadrat Petak Utama

$$\begin{aligned} JK (\text{Petak Utama}) &= \frac{\sum_{i,k} Y_{i,k}^2}{b} - FK \\ &= \frac{340,00^2 + 330,00^2 + \dots + 202,00^2}{4} - 110704,16 \\ &= 6910,83 \end{aligned}$$

4. Jumlah Kuadrat Kelompok (JKK)

$$\begin{aligned} JKK &= \frac{\sum_k Y_{...k}^2}{ab} - FK \\ &= \frac{546,00^2 + \dots + 550,00^2}{3 \times 4} - 110704,16 \\ &= 17,33 \end{aligned}$$

5. Jumlah Kuadrat Faktor A

$$\begin{aligned} JK (A) &= \frac{\sum_i Y_i^2}{rb} - FK \\ &= \frac{1018,00^2 + 612,00^2}{3 \times 4} - 110704,16 \\ &= 6868,167 \end{aligned}$$

6. Jumlah Kuadrat Galat Faktor A

$$\begin{aligned} JK (\text{Galat a}) &= JK (\text{Petak Utama}) - JKK - JK(A) \\ &= 6910,83 - 17,333 - 6868,167 \\ &= 25,333 \end{aligned}$$

7. Jumlah Kuadrat Faktor B

$$\begin{aligned}
 JK(B) &= \frac{\sum_j y_j^2}{ra} - FK \\
 &= \frac{514,00^2 + 420,00^2 + \dots + 258,00^2}{3 \times 2} - 110704,16 \\
 &= 5796,500
 \end{aligned}$$

8. Jumlah Kuadrat Interaksi A x B

$$\begin{aligned}
 JK(AB) &= \frac{\sum_{ij} y_{ij}^2}{r} - FK - JK(A) - JK(B) \\
 &= \frac{262,00^2 + 268,00^2 + \dots + 18,00^2}{3} - 110704,16 - 6868,167 - 5796,500 \\
 &= 4165,833
 \end{aligned}$$

9. Jumlah Kuadrat Galat Faktor B

$$\begin{aligned}
 JK(\text{Galat B}) &= JKT - JK(\text{Petak Utama}) - JK(B) - JK(AB) \\
 &= 16947,83 - 6910,83 - 5796,500 - 4165,833 \\
 &= 74,667
 \end{aligned}$$

Tabel 16. Analisis Variasi (ANAVA) Analisis Respon Fisik % Germinasi Beras Putih Germinasi

Sumber Keragaman (SK)	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Total (KT)	Fhitung	Ftabel 5%	Notasi
Petak Utama						
Kelompok (K)	2	17,333	8,667	0,68	19,00	tn
Faktor A	1	6868,167	6868,167	542,22	18,51	*
Galat (A)	2	25,333	12,667			
Total	5	6910,833	6889,500			
Anak Petak						
Faktor B	3	5796,500	1932,167	310,527	3,49	*
Interaksi (AB)	3	4165,833	1388,611	223,170	3,49	*
Galat (B)	12	74,667	6,222			
Total	18	10037,000	3327,000			

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel analisis variansi (ANAVA) dapat diketahui bahwa kondisi bahan (Faktor A), konsentrasi ozon (Faktor B), dan interaksi AXB berpengaruh terhadap % Germinasi beras putih germinasi. Perlakuan spesifik yang mempengaruhi % Germinasi Beras Putih Germinasi dapat diketahui dengan menggunakan uji lanjut LSD.

Uji Lanjut LSD % Germinasi Faktor AB

$$t \text{ student } a_{(0,05; 12)} = 2,179$$

$$S_y = \sqrt{\frac{2 \text{ KT (Galat b)}}{r}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \times 6,222}{3}} = 2,037$$

$$\text{LSD} = S_y \times t_{(0,05; 3)}$$

$$= 2,037 \times 2,179 = 4,438$$

Tabel 17. Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Uji % Germinasi Beras Putih Germinasi

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	4,438	a1b4	80,00	-				a
		a1b3	82,67	2,67 ^{tn}	-			a
		a1b1	87,33	7,33 [*]	4,67 [*]	-		b
		a1b2	89,33	9,33 [*]	6,67 [*]	2,00 ^{tn}	-	b

Tabel 18. Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Uji % Germinasi Beras Putih Germinasi

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	4,438	a2b4	6,00	-				a
		a2b2	50,67	44,67*	-			b
		a2b3	63,33	57,33*	12,67*	-		c
		a2b1	84,00	78,00*	33,33*	20,67*	-	d

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Keterangan: Nilai yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji LSD.

Uji Lanjut LSD % Germinasi Interaksi AB

$$t \text{ student } a_{(0,05 ; 2)} = 4,303$$

$$t \text{ student } a_{(0,05 ; 12)} = 2,179$$

$$t' = \frac{(b-1)(KT \text{ Galat B})(t_b) + (KT \text{ Galat a})(t_a)}{(b-1)(KT \text{ Galat b}) + (KT \text{ Galat a})}$$

$$= \frac{(3)(6,222)(2,179) + (12,667)(4,303)}{(3)(6,222) + (12,667)} = 3,037$$

$$S_y = \sqrt{\frac{2(b-1)KT(\text{Galat b}) + KT(\text{Galat a})}{r \times b}}$$

$$= \sqrt{\frac{2(3)(6,222) + (12,667)}{3 \times 4}} = 2,285$$

$$LSD = S_y \times t'$$

$$= 2,285 \times 3,307 = 6,941$$

Tabel 19. Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Uji % Germinasi Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	6,941	a2b1	84,00	-				A
		a1b1	87,33	3,33 ^{tn}	-			A

Tabel 20. Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Uji % Germinasi Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	6,941	a2b2	50,67	-				A
		a1b2	89,33	38,67*	-			B

Tabel 21. Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Uji % Germinasi Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	6,941	a2b3	63,33	-				A
		a1b3	82,67	19,33*	-			B

Tabel 22. Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Uji % Germinasi Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	6,941	a2b4	6,00	-				A
		a1b4	80,00	74,00*	-			B

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Keterangan: Nilai yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji LSD.

Tabel 23. Dua Arah untuk Analisis (%) Germinasi Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32

Kondisi Beras (A)	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	87,33 ± 3,06	A	89,33 ± 3,06	B	82,67 ± 3,06	B	80,00 ± 3,06	B
	b		b		a		a	
a2 (Beras Pecah Kulit)	84,00 ± 2,00	A	50,67 ± 3,06	A	63,33 ± 3,06	A	6,00 ± 2,00	A
	d		b		c		a	

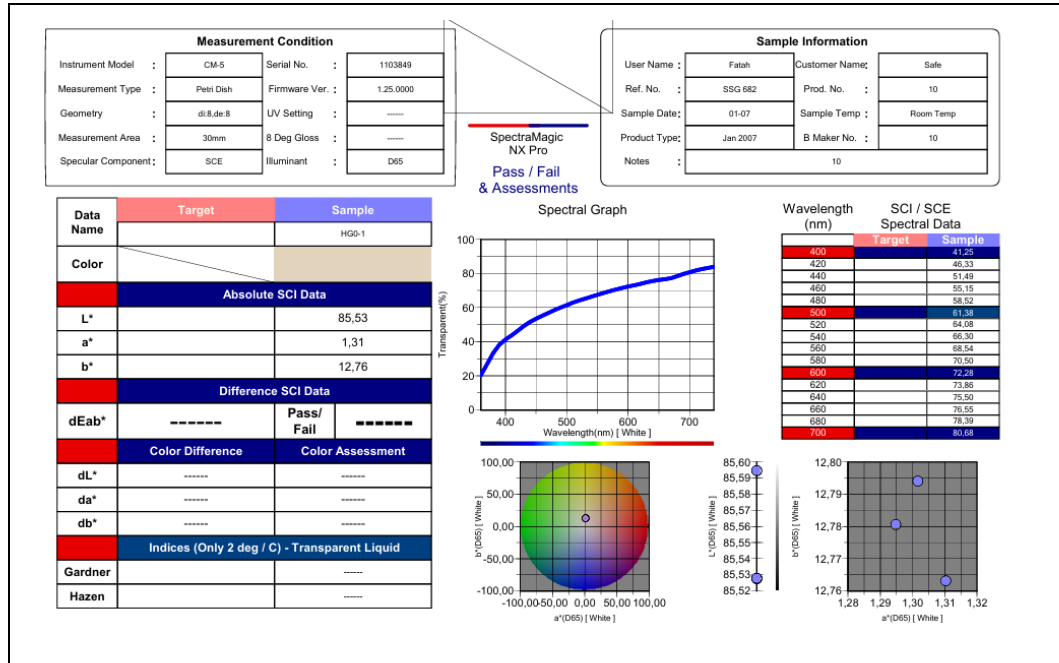
Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal)

Kesimpulan:

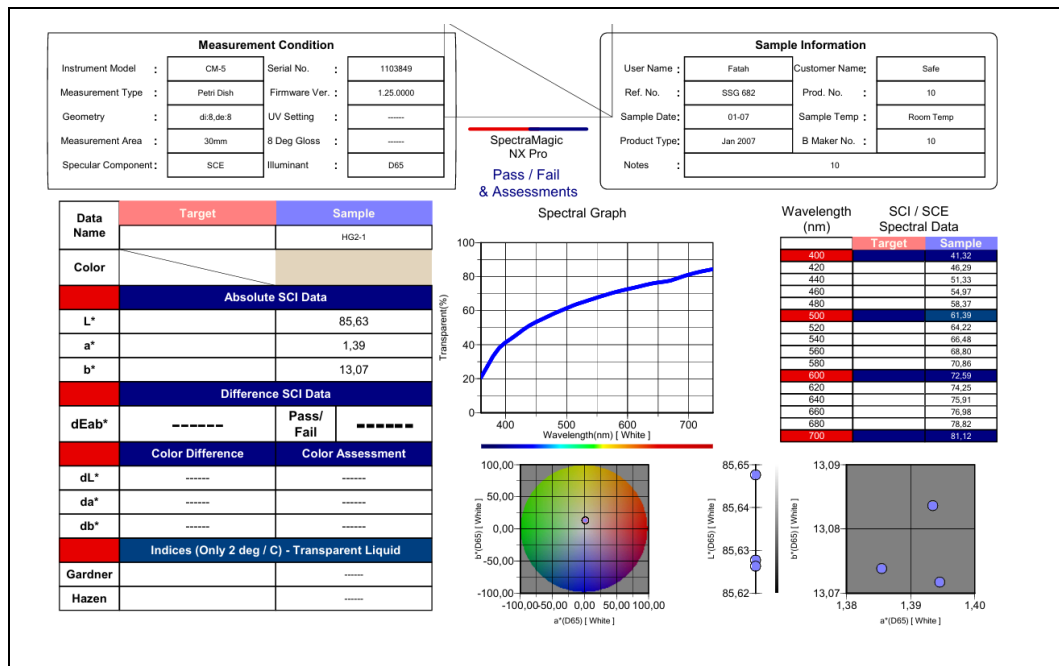
Semakin tinggi konsentrasi ozon pada kondisi beras gabah (a1) terjadi penurunan % germinasi yang nyata untuk b3 dan b4 terhadap b1 dan b2, sedangkan pada kondisi beras pecah kulit (a2) perubahan konsentrasi ozon memberikan pengaruh penurunan % germinasi yang nyata di setiap tingkat perlakuan (b1, b2, b3, dan b4).

Pada konsentrasi ozon yang sama yaitu 0 ppm (b1) tidak terjadi perbedaan % germinasi yang nyata antara kondisi beras gabah (a1) terhadap beras pecah kulit (a2), sedangkan pada konsentrasi ozon 2 ppm (b2), 4 ppm (b3) dan 6 ppm (b4) terjadi peningkatan % germinasi yang nyata pada kondisi beras gabah (a1) terhadap beras pecah kulit (a2).

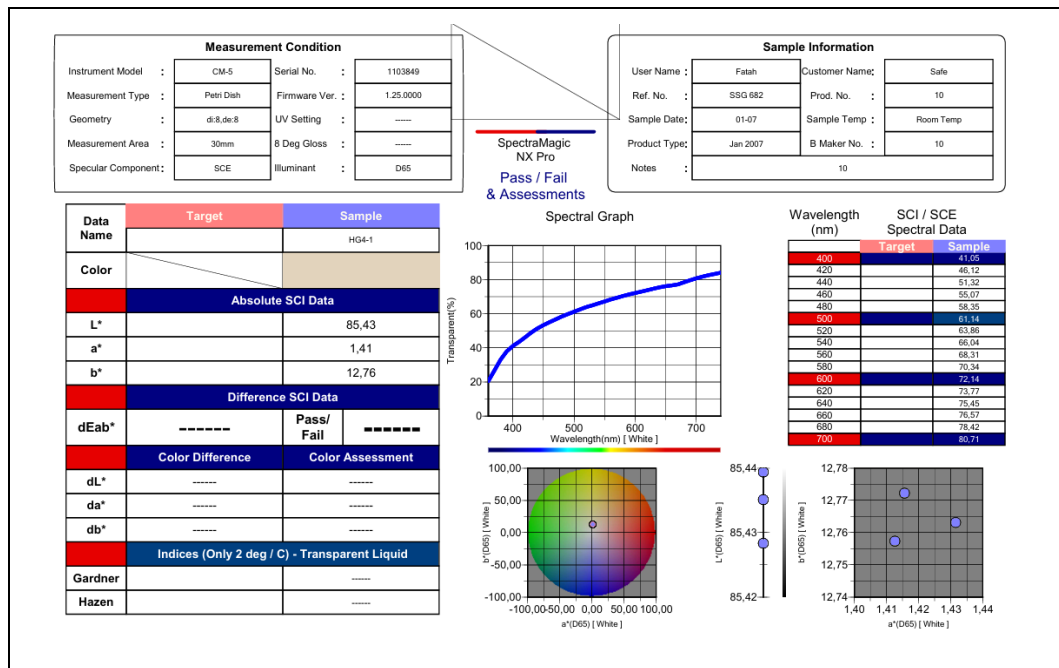
Lampiran Q. Data Hasil Analisis Respon Fisik Derajat Putih



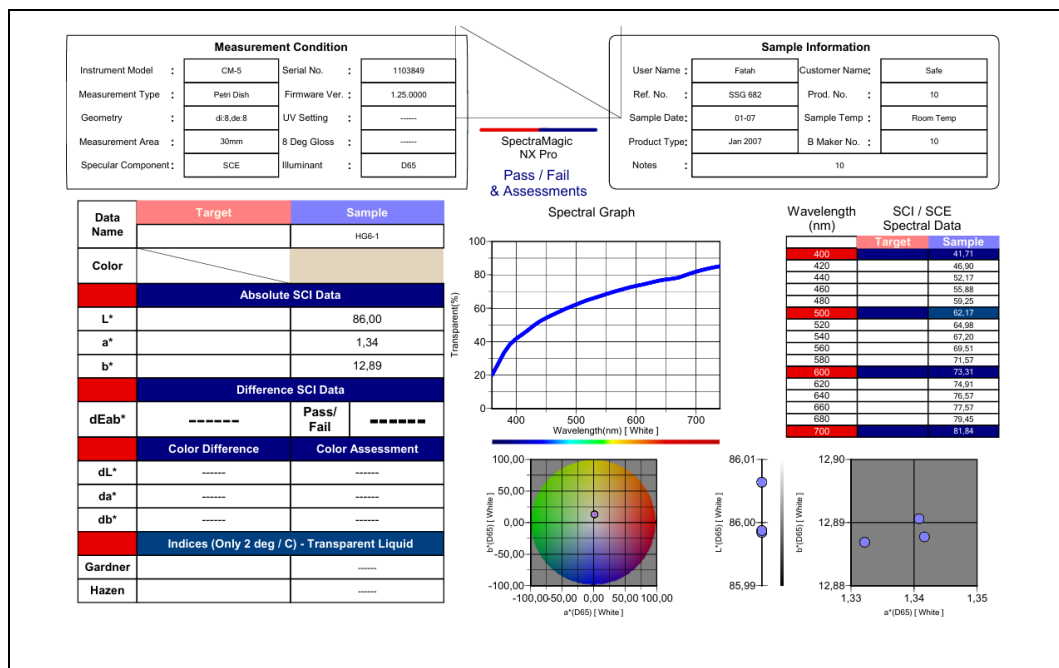
Gambar 1. Hasil Pengukuran Derajat Putih Sampel A1B1 dengan Spektrofotometer



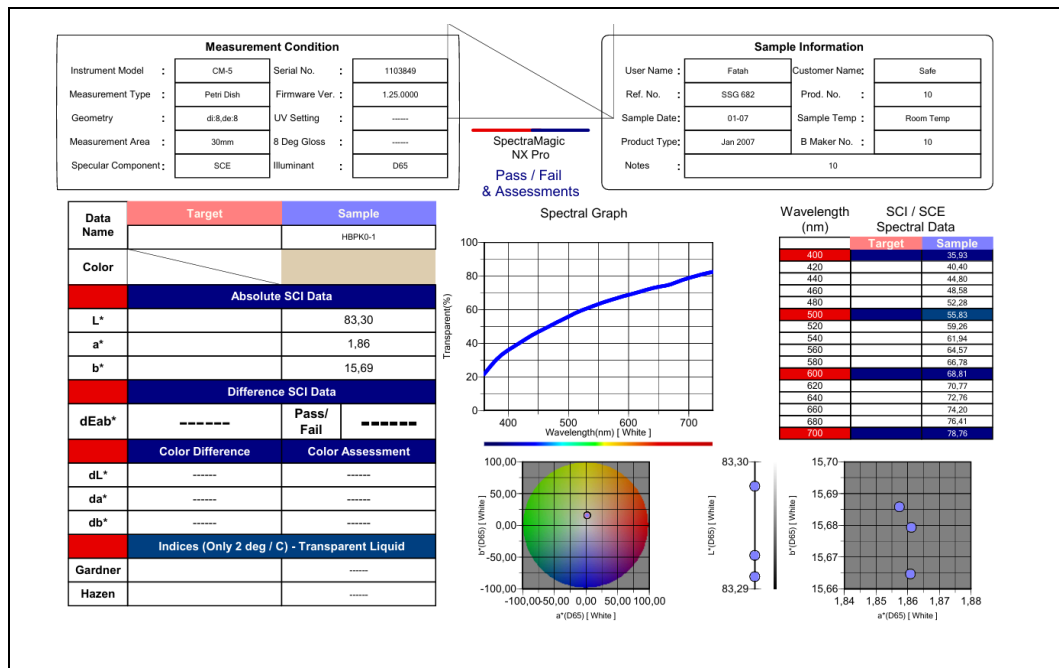
Gambar 2. Hasil Pengukuran Derajat Putih Sampel A1B2 dengan Spektrofotometer



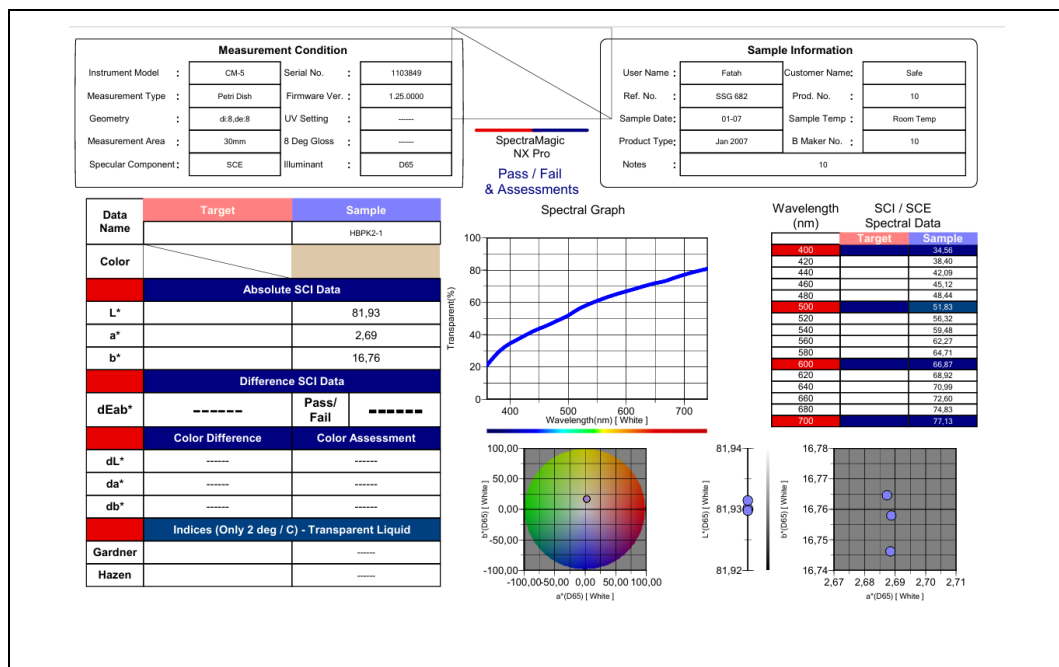
Gambar 3. Hasil Pengukuran Derajat Putih Sampel A1B3 dengan Spektrofotometer



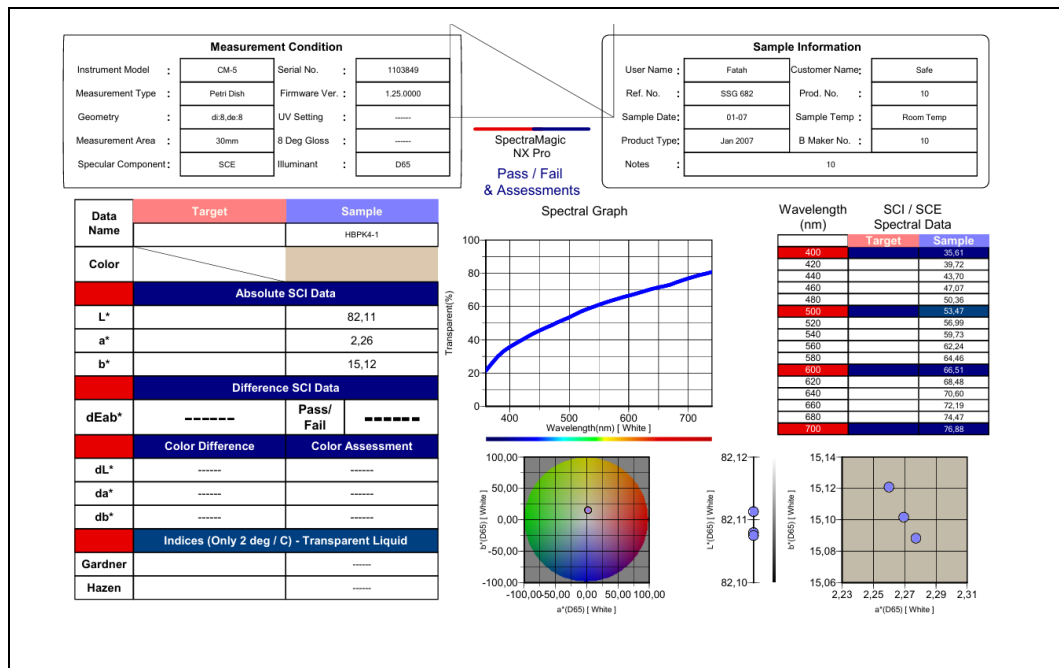
Gambar 4. Hasil Pengukuran Derajat Putih Sampel A1B4 dengan Spektrofotometer



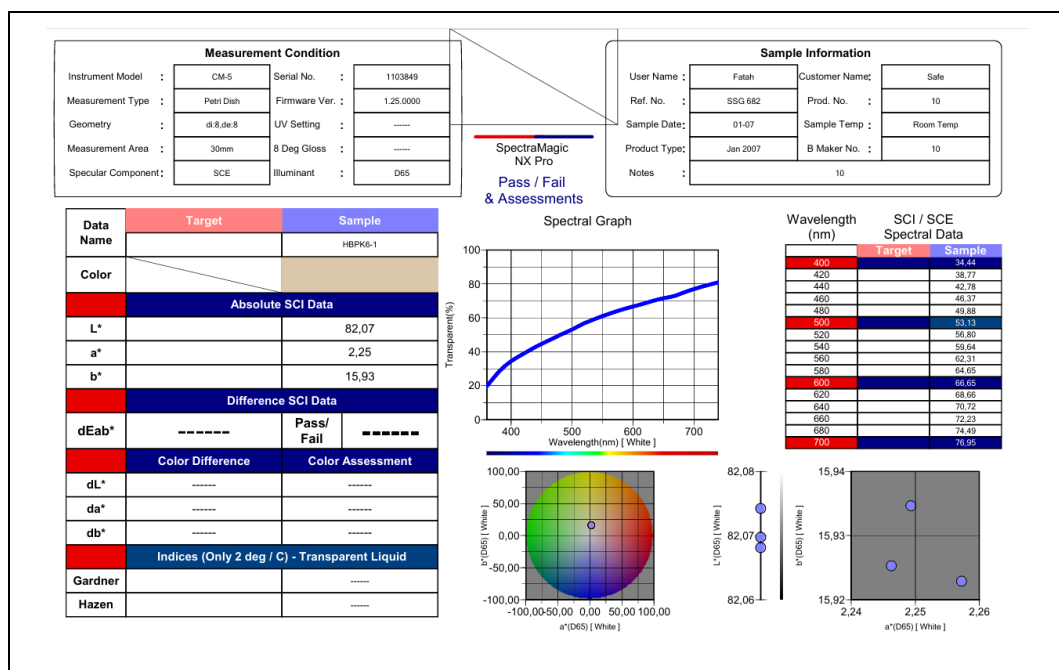
Gambar 5. Hasil Pengukuran Derajat Putih Sampel A2B1 dengan Spektrofotometer



Gambar 6. Hasil Pengukuran Derajat Putih Sampel A2B2 dengan Spektrofotometer



Gambar 7. Hasil Pengukuran Derajat Putih Sampel A2B3 dengan Spektrofotometer



Gambar 8. Hasil Pengukuran Derajat Putih Sampel A2B4 dengan Spektrofotometer

Tabel 24. Data Perhitungan Nilai Derajat Putih Beras Putih Germinasi

Sampel		Ulangan	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	Derajat Putih
A1	B1	1	85,530	1,305	12,775	80,65
		2	85,530	1,295	12,785	80,65
		3	85,590	1,310	12,780	80,69
	B2	1	85,630	1,385	13,080	80,52
		2	85,630	1,390	13,085	80,52
		3	85,650	1,395	13,070	80,54
	B3	1	85,430	1,415	12,765	80,58
		2	85,440	1,425	12,770	80,58
		3	85,440	1,415	12,780	80,58
	B4	1	86,000	1,345	12,885	80,93
		2	85,995	1,340	12,885	80,92
		3	86,010	1,335	12,890	80,93
A2	B1	1	83,295	1,865	15,680	77,01
		2	83,290	1,860	15,665	77,02
		3	83,290	1,865	15,675	77,01
	B2	1	81,930	2,690	16,755	75,21
		2	81,930	2,685	16,760	75,21
		3	81,930	2,695	16,755	75,21
	B3	1	82,110	2,265	15,110	76,47
		2	82,110	2,275	15,095	76,48
		3	82,110	2,275	15,095	76,48
	B4	1	82,070	2,250	15,925	75,91
		2	82,070	2,245	15,935	75,91
		3	82,070	2,260	15,920	75,92

Contoh Perhitungan:

Nilai Derajat Putih Perlakuan a1b1 ulangan 1

Diketahui:

$$L^* (D65) = 85,530$$

$$a^* (D65) = 1,305$$

$$b^* (D65) = 12,775$$

$$\begin{aligned} \text{Whiteness Index} &= 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \\ &= 100 - \sqrt{(100 - 85,530)^2 + 1,305^2 + 12,775^2} = 80,65 \end{aligned}$$

Tabel 25. Data Hasil Analisis Respon Fisik Nilai Derajat Putih Beras Putih
Germinasi

Kondisi Beras (A) sebagai Petak Utama	Ulangan	Konsentrasi Ozon (B) sebagai Anak Petak				Jumlah	Rata- Rata
		0 ppm (b1)	2 ppm (b2)	4 ppm (b3)	6 ppm (b4)		
Gabah (a ₁)	1	80,65	80,52	80,58	80,93	322,68	80,67
	2	80,65	80,52	80,58	80,92	322,67	80,67
	3	80,69	80,54	80,58	80,93	322,74	80,69
Sub Total		241,99	241,58	241,74	242,78	968,09	242,02
Rata-Rata		80,66	80,53	80,58	80,93	322,70	80,67
Beras Pecah Kulit (a ₂)	1	77,01	75,21	76,47	75,91	304,6	76,15
	2	77,02	75,21	76,48	75,91	304,62	76,16
	3	77,01	75,21	76,48	75,92	304,62	76,16
Sub Total		231,04	225,63	229,43	227,74	913,84	228,46
Rata-Rata		77,01	75,21	76,48	75,91	304,61	77,28
Jumlah Total		473,03	467,21	471,17	470,52	1881,93	470,48
Rata-Rata Total		78,84	77,87	78,53	78,42	313,66	78,41

Perhitungan:

Diketahui: $a = 2$, $b = 4$, $r = 3$

1. Faktor Koreksi (FK)

$$\begin{aligned} FK &= \frac{Y_{....}^2}{abr} \\ &= \frac{(1881,93)^2}{2 \times 4 \times 3} = 147569,19 \end{aligned}$$

2. Jumlah Kuadrat Total (JKT)

$$\begin{aligned} JKT &= \sum_{i,j,k} Y_{i,j,k}^2 - FK \\ &= (80,65)^2 + (80,65)^2 + \dots + (75,92)^2 - 147569,19 \\ &= 128,29 \end{aligned}$$

3. Jumlah Kuadrat Petak Utama

$$\begin{aligned} JK (\text{Petak Utama}) &= \frac{\sum_{i,k} Y_{i,k}^2}{b} - FK \\ &= \frac{322,68^2 + 322,67^2 + \dots + 304,62^2}{4} - 147569,19 \\ &= 122,63 \end{aligned}$$

4. Jumlah Kuadrat Kelompok (JKK)

$$\begin{aligned} JKK &= \frac{\sum_k Y_{...k}^2}{ab} - FK \\ &= \frac{627,28^2 + \dots + 627,36^2}{3 \times 4} - 147569,19 \\ &= 0,0005 \end{aligned}$$

5. Jumlah Kuadrat Faktor A

$$\begin{aligned} JK (A) &= \frac{\sum_i Y_i^2}{rb} - FK \\ &= \frac{968,09^2 + 913,84^2}{3 \times 4} - 147569,19 \\ &= 122,628 \end{aligned}$$

6. Jumlah Kuadrat Galat Faktor A

$$\begin{aligned} JK (\text{Galat a}) &= JK (\text{Petak Utama}) - JKK - JK(A) \\ &= 122,63 - 0,0005 - 122,628 \\ &= 0,0003 \end{aligned}$$

7. Jumlah Kuadrat Faktor B

$$\begin{aligned}
 JK(B) &= \frac{\sum_j Y_j^2}{ra} - FK \\
 &= \frac{473,03^2 + 467,21^2 + \dots + 470,52^2}{3 \times 2} - 147569,19 \\
 &= 2,946
 \end{aligned}$$

8. Jumlah Kuadrat Interaksi A x B

$$\begin{aligned}
 JK(AB) &= \frac{\sum_{i,j} Y_{ij}^2}{r} - FK - JK(A) - JK(B) \\
 &= \frac{241,99^2 + 241,58^2 + \dots + 227,74^2}{3} - 147569,19 - 122,628 - 2,946 \\
 &= 2,713
 \end{aligned}$$

9. Jumlah Kuadrat Galat Faktor B

$$\begin{aligned}
 JK(\text{Galat B}) &= JKT - JK(\text{Petak Utama}) - JK(B) - JK(AB) \\
 &= 128,29 - 122,69 - 2,946 - 2,713 \\
 &= 0,0008
 \end{aligned}$$

Tabel 26. Analisis Variasi (ANAVA) Analisis Respon Fisik Nilai Derajat Putih
Germinasi

Sumber Keragaman (SK)	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Total (KT)	Fhitung	Ftabel 5%	Notasi
Petak Utama						
Kelompok (K)	2	0,0005	0,0002	1,541	19,00	tn
Faktor A	1	122,628	122,628	795422,272	18,51	*
Galat (A)	2	0,0003	0,000			
Total	5	122,628	122,628			
Anak Petak						
Faktor B	3	2,946	0,982	14427,000	3,49	*
Interaksi (AB)	3	2,713	0,904	13287,408	3,49	*
Galat (B)	12	0,0008	0,0001			
Total	18	5,659	1,886			

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel analisis variansi (ANAVA) dapat diketahui bahwa kondisi bahan (Faktor A), konsentrasi ozon (Faktor B), dan interaksi AXB berpengaruh terhadap Nilai Derajat Putih beras putih germinasi. Perlakuan spesifik yang mempengaruhi Nilai Derajat Putih Beras Putih Germinasi dapat diketahui dengan menggunakan uji lanjut LSD.

Uji Lanjut LSD Nilai Derajat Putih Faktor AB

$$t_{\text{student } a(0,05; 12)} = 2,179$$

$$S_y = \sqrt{\frac{2 \text{ KT (Galat b)}}{r}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \times 0,0001}{3}} = 0,0081$$

$$\text{LSD} = S_y \times t_{(0,05; 3)}$$

$$= 2,037 \times 2,179 = 0,015$$

Tabel 27. Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Nilai Derajat Putih Beras Putih Germinasi

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	0,015	a1b2	80,53	-				a
		a1b3	80,58	0,05*	-			b
		a1b1	80,66	0,14*	0,08*	-		c
		a1b4	80,93	0,40*	0,35*	0,26*	-	d

Tabel 28. Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Nilai Derajat Putih Beras Putih Germinasi

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	0,015	a2b2	75,21	-				a
		a2b4	75,91	0,70*	-			b
		a2b3	76,48	1,27*	0,56*	-		c
		a2b1	77,01	1,80*	1,10*	0,54*	-	d

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Keterangan: Nilai yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji LSD.

Uji Lanjut LSD Nilai Derajat Putih Interaksi AB

$$t \text{ student } a_{(0,05; 2)} = 4,303$$

$$t \text{ student } a_{(0,05; 12)} = 2,179$$

$$t' = \frac{(b-1)(KT \text{ Galat B})(t_b) + (KT \text{ Galat a})(t_a)}{(b-1)(KT \text{ Galat b}) + (KT \text{ Galat a})}$$

$$= \frac{(3)(0,0001)(2,179) + (0,0003)(4,303)}{(3)(0,0001) + (0,0003)} = 3,093$$

$$Sy = \sqrt{\frac{2(b-1)KT(\text{Galat b}) + KT(\text{Galat a})}{r \times b}}$$

$$= \sqrt{\frac{2(3)(0,0001) + (0,0003)}{3 \times 4}} = 0,008$$

$$LSD = Sy \times t'$$

$$= 0,008 \times 3,093 = 0,024$$

Tabel 29. Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Nilai Derajat Putih Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	0,024	a2b1	77,01	-				A
		a1b1	80,66	3,65*	-			B

Tabel 30. Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Nilai Derajat Putih Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	0,024	a2b2	75,21	-				A
		a1b2	80,53	5,32*	-			B

Tabel 31. Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Nilai Derajat Putih Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	0,024	a2b3	76,48	-				A
		a1b3	80,58	4,10	-			B

Tabel 32. Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Nilai Derajat Putih Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	0,024	a2b4	75,91	-				A
		a1b4	80,93	5,01	-			B

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Keterangan: Nilai yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji LSD.

Tabel 33. Dua Arah untuk Analisis Derajat Putih Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32

Kondisi Beras (A)	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	80,66 ± 0,02	B	80,53 ± 0,01	B	80,58 ± 0,00	B	80,93 ± 0,01	B
	c		a		b		d	
a2 (Beras Pecah Kulit)	77,01 ± 0,01	A	75,21 ± 0,00	A	76,48 ± 0,01	A	75,91 ± 0,01	A
	d		a		c		b	

Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal)

Kesimpulan:

Semakin tinggi konsentrasi ozon pada kondisi bahan gabah (a1), nilai derajat putih mengalami penurunan nyata dari b1 (0 ppm) ke b2 (2 ppm), kemudian meningkat nyata pada b3 (4 ppm) dan meningkat nyata kembali pada b4(ppm), sedangkan pada kondisi bahan beras pecah kulit (a2) juga terjadi perubahan nyata pada seluruh taraf, yaitu penurunan nyata dari b1 ke b2, peningkatan nyata pada b3, dan penurunan nyata kembali pada b4.

Pada konsentrasi ozon yang sama, baik pada 0 ppm, 2 ppm, 4 ppm, maupun 6 ppm, terjadi perbedaan nyata nilai derajat putih antara jenis bahan gabah (a1) dengan beras pecah kulit (a2), di mana gabah (a1) secara konsisten menghasilkan nilai derajat putih yang lebih tinggi dibandingkan beras pecah kulit (a2) pada seluruh taraf konsentrasi ozon yang diuji.

Lampiran R. Data Hasil Analisis Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA)

Tabel 34. Data Hasil Analisis Profil Gelatinisasi *Rapid Visco Analyzer*

Sampel		Ulangan	Peak 1	Through 1	Breakdown	Final Visc	Setback	Peak Time	Pasting Temp
A1	b1	1	1950	1631	319	2707	1076	6,13	51,80
		2	1958	1635	320	2715	1085	6,20	51,90
		3	1942	1628	323	2699	1075	6,07	51,70
	b2	1	1404	1190	214	2217	1027	6,07	83,2
		2	1413	1195	220	2226	1034	6,13	83,3
		3	1395	1185	210	2208	1026	6	83,1
	b3	1	862	491	371	844	353	5,07	83,15
		2	869	495	380	851	357	5,13	83,20
		3	855	488	370	837	353	5	83,10
	b4	1	922	712	210	1319	607	5,53	83,25
		2	930	715	213	1327	607	5,60	83,35
		3	914	711	208	1311	603	5,47	83,15
A2	b1	1	4030	3559	471	5163	1604	7	85
		2	4038	3562	475	5171	1609	7,07	84,75

Sampel		Ulangan	Peak 1	Through 1	Breakdown	Final Visc	Setback	Peak Time	Pasting Temp
		3	4022	3556	465	5155	1601	6,93	84,5
	b2	1	3673	3331	342	4470	1139	6,67	84
		2	3682	3335	345	4479	1143	6,73	84,10
		3	3664	3328	336	4461	1137	6,60	83,90
	b3	1	4075	3591	484	4796	1205	6,73	83,95
		2	4081	3595	490	4802	1206	6,80	84,05
		3	4069	3588	480	4790	1199	6,67	83,30
	b4	1	3984	3591	393	4696	1105	6,47	84,55
		2	3991	3595	395	4703	1108	6,53	84,6
		3	3977	3588	385	4689	1102	6,40	84,45

Tabel 35. Data Hasil Analisis Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Viscosity*

Kondisi Beras (A) sebagai Petak Utama	Kelompok	Konsentrasi Ozon (B) sebagai Anak Petak				Jumlah	Rata-Rata
		0 ppm (b1)	2 ppm (b2)	4 ppm (b3)	6 ppm (b4)		
Gabah (A1)	1	1950,00	1404,00	862,00	922,00	5138,00	1284,50
	2	1958,00	1413,00	869,00	930,00	5170,00	1292,50
	3	1942,00	1395,00	855,00	914,00	5106,00	1276,50
Jumlah		5850,00	4212,00	2586,00	2766,00	15414,00	3853,50
Rata-Rata		1950,00	1404,00	862,00	922,00	5138,00	1284,50
Beras Pecah Kulit (A2)	1	4030,00	3673,00	4075,00	3984,00	15762,00	3940,50
	2	4038,00	3682,00	4081,00	3991,00	15792,00	3948,00
	3	4022,00	3664,00	4069,00	3977,00	15732,00	3933,00
Jumlah		12090,00	11019,00	12225,00	11952,00	47286,00	11821,50
Rata-Rata		4030,00	3673,00	4075,00	3984,00	15762,00	3276,50
Jumlah Total		17940,00	15231,00	14811,00	14718,00	62700,00	15675,00
Rata-Rata Total		2990,00	2538,50	2468,50	2453,00	10450,00	2612,50

Perhitungan:

Diketahui: $a = 2$, $b = 4$, $r = 3$

1. Faktor Koreksi (FK)

$$\begin{aligned} FK &= \frac{Y_{....}^2}{abr} \\ &= \frac{(62700)^2}{2 \times 4 \times 3} = 163803750 \end{aligned}$$

2. Jumlah Kuadrat Total (JKT)

$$\begin{aligned} JKT &= \sum_{i,j,k} Y_{i,j,k}^2 - FK \\ &= (1950)^2 + (1958)^2 + \dots + (3977)^2 - 163803750 \\ &= 44926888 \end{aligned}$$

3. Jumlah Kuadrat Petak Utama

$$\begin{aligned} JK (\text{Petak Utama}) &= \frac{\sum_{i,k} Y_{i,k}^2}{b} - FK \\ &= \frac{5138^2 + 5170^2 + \dots + 15732^2}{4} - 163803750 \\ &= 42326978 \end{aligned}$$

4. Jumlah Kuadrat Kelompok (JKK)

$$\begin{aligned} JKK &= \frac{\sum_k Y_{...k}^2}{ab} - FK \\ &= \frac{20900^2 + \dots + 20838^2}{3 \times 4} - 163803750 \\ &= 961 \end{aligned}$$

5. Jumlah Kuadrat Faktor A

$$\begin{aligned} JK (A) &= \frac{\sum_i Y_i^2}{rb} - FK \\ &= \frac{15414^2 + 47286^2}{3 \times 4} - 163803750 \\ &= 42326016 \end{aligned}$$

6. Jumlah Kuadrat Galat Faktor A

$$\begin{aligned} JK (\text{Galat a}) &= JK (\text{Petak Utama}) - JKK - JK(A) \\ &= 42326978 - 961 - 42326016 \\ &= 1,00 \end{aligned}$$

7. Jumlah Kuadrat Faktor B

$$\begin{aligned}
 JK(B) &= \frac{\sum_j y_j^2}{ra} - FK \\
 &= \frac{17940^2 + 15231^2 + \dots + 14718^2}{3 \times 2} - 163803750 \\
 &= 1164951
 \end{aligned}$$

8. Jumlah Kuadrat Interaksi A x B

$$\begin{aligned}
 JK(AB) &= \frac{\sum_{i,j} y_{ij}^2}{r} - FK - JK(A) - JK(B) \\
 &= \frac{5850^2 + 4212^2 + \dots + 39,59^2}{3} - 163803750 - 42326016 - 1164951 \\
 &= 1434945
 \end{aligned}$$

9. Jumlah Kuadrat Galat Faktor B

$$\begin{aligned}
 JK(\text{Galat B}) &= JKT - JK(\text{Petak Utama}) - JK(B) - JK(AB) \\
 &= 44926888 - 42326978 - 1164951 - 1434945 \\
 &= 14
 \end{aligned}$$

Tabel 36. Analisis Variasi (ANAVA) Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Viscosity*

Sumber Keragaman (SK)	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Total (KT)	Fhitung	Ftabel 5%	Notasi
Petak Utama						
Kelompok (K)	2	961,00	480,50	961,00	19,00	
Faktor A	1	42326016,00	42326016,00	84652032,00	18,51	*
Galat (A)	2	1,00	0,50			
Total	5	42326978,00	42326497,00			
Anak Petak						
Faktor B	3	1164951,00	388317,00	332843,14	3,49	*
Interaksi (AB)	3	1434945,00	478315,00	409984,29	3,49	*
Galat (B)	12	14,00	1,17			
Total	18	2599910,00	866633,17			

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel analisis variansi (ANAVA) dapat diketahui bahwa kondisi bahan (Faktor A), konsentrasi ozon (Faktor B), dan interaksi AXB berpengaruh terhadap Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Viscosity* beras putih germinasi. Perlakuan spesifik yang mempengaruhi Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Viscosity* Beras Putih Germinasi dapat diketahui dengan menggunakan uji lanjut LSD.

Uji Lanjut LSD Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Viscosity* Faktor AB

t student a (0,05 ; 12) = 2,179

$$S_y = \sqrt{\frac{2 \text{ KT (Galat b)}}{r}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \times 1,17}{3}} = 0,883$$

$$\begin{aligned} \text{LSD} &= S_y \times t_{(0,05; 3)} \\ &= 0,883 \times 2,179 = 1,922 \end{aligned}$$

Tabel 37. Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Viscosity*

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	1,922	a1b3	862	-				a
		a1b4	922	60*	-			b
		a1b2	1404	542*	482*	-		c
		a1b1	1950	1088*	1028*	546*	-	d

Tabel 38. Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Viscosity*

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	1,922	a2b2	3673	-				a
		a2b4	3984	311*	-			b
		a2b1	4030	357*	46*	-		c
		a2b3	4075	402*	91*	45*	-	d

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Keterangan: Nilai yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji LSD.

Uji Lanjut LSD Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Viscosity* Interaksi AB

$$t_{\text{student } a_{(0,05; 2)}} = 4,303$$

$$t_{\text{student } a_{(0,05; 12)}} = 2,179$$

$$t' = \frac{(b-1)(KT \text{ Galat B})(t_b) + (KT \text{ Galat a})(t_a)}{(b-1)(KT \text{ Galat b}) + (KT \text{ Galat a})}$$

$$= \frac{(3)(1,17)(2,179) + (0,50)(4,303)}{(3)(1,17) + (0,50)} = 2,363$$

$$Sy = \sqrt{\frac{2(b-1)KT(\text{Galat b}) + KT(\text{Galat a})}{r \times b}}$$

$$= \sqrt{\frac{2(3)(1,17) + (0,50)}{3 \times 4}} = 0,816$$

$$LSD = Sy \times t'$$

$$= 0,816 \times 2,363 = 1,996$$

Tabel 39. Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Viscosity* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
1,996		a1b1	1950	-				A
		a2b1	4030	2080*	-			B

Tabel 40. Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Viscosity* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
1,996		a1b2	1404	-				A
		a2b2	3673	2269	-			B

Tabel 41. Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Viscosity* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	1,996	a1b3	862	-				A
		a2b3	4075	3213*	-			B

Tabel 42. Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Viscosity* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	1,996	a1b4	922	-				A
		a2b4	3984	3062*	-			B

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Keterangan: Nilai yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji LSD.

Tabel 43. Dua Arah untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Viscosity* Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32

Kondisi Beras (A)	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	1950,00 ± 8,00	A	1404,00 ± 9,00	A	862,00 ± 7,00	A	922,00 ± 8,00	A
	d		c		a		b	
a2 (Beras Pecah Kulit)	4030,00 ± 8,00	B	3673,00 ± 9,00	B	4075,00 ± 6,00	B	3984,00 ± 7,00	B
	c		a		d		b	

Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal)

Kesimpulan:

Semakin tinggi konsentrasi ozon pada kondisi bahan gabah (a1), nilai *Peak Viscosity* (PV) mengalami penurunan nyata pada b2 (2 ppm), menurun drastis hingga mencapai nilai terendah pada b3 (4 ppm), kemudian terjadi peningkatan nyata pada b4 (6 ppm). Sementara itu, pada kondisi beras pecah kulit (a2), nilai PV mengalami penurunan nyata pada b2 (2 ppm), meningkat secara signifikan melampaui kontrol pada b3 (4 ppm), dan menurun nyata kembali pada b4 (6 ppm).

Pada setiap konsentrasi ozon yang diberikan (0 ppm, 2 ppm, 4 ppm, dan 6 ppm), terjadi perbedaan nyata nilai *Peak Viscosity* antara kondisi bahan gabah (a1) terhadap beras pecah kulit (a2), di mana beras pecah kulit secara konsisten menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan gabah.

Tabel 44. Data Hasil Analisis Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Through Viscosity*

Kondisi Beras (A) sebagai Petak Utama	Kelompok	Konsentrasi Ozon (B) sebagai Anak Petak				Jumlah	Rata-Rata
		0 ppm (b1)	2 ppm (b2)	4 ppm (b3)	6 ppm (b4)		
Gabah (A1)	1	1631,00	1190,00	491,00	712,00	4024,00	1006,00
	2	1635,00	1195,00	495,00	715,00	4040,00	1010,00
	3	1628,00	1185,00	488,00	711,00	4012,00	1003,00
Jumlah		4894,00	3570,00	1474,00	2138,00	12076,00	3019,00
Rata-Rata		1631,33	1190,00	491,33	712,67	4025,33	1006,33
Beras Pecah Kulit (A2)	1	3559,00	3331,00	3591,00	3591,00	14072,00	3518,00
	2	3562,00	3335,00	3595,00	3595,00	14087,00	3521,75
	3	3556,00	3328,00	3588,00	3588,00	14060,00	3515,00
Jumlah		10677,00	9994,00	10774,00	10774,00	42219,00	10554,75
Rata-Rata		3559,00	3331,33	3591,33	3591,33	14073,00	2890,27
Jumlah Total		15571,00	13564,00	12248,00	12912,00	54295,00	13573,75
Rata-Rata Total		2595,17	2260,67	2041,33	2152,00	9049,17	2262,29

Tabel 45. Analisis Variasi (ANAVA) Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Through Viscosity*

Sumber Keragaman (SK)	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Total (KT)	Fhitung	Ftabel 5%	Notasi
Petak Utama						
Kelompok (K)	2	190,08	95,04	2281,00	19,00	
Faktor A	1	37858352,04	37858352,04	908600503,16	18,51	*
Galat (A)	2	0,08	0,04			
Total	5	37858542,21	37858447,13			
Anak Petak						
Faktor B	3	1030771,46	343590,49	419296,86	3,49	*
Interaksi (AB)	3	1438541,46	479513,82	585169,41	3,49	*
Galat (B)	12	9,83	0,82			
Total	18	2469322,75	823105,12			

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel analisis variansi (ANAVA) dapat diketahui bahwa kondisi bahan (Faktor A), konsentrasi ozon (Faktor B), dan interaksi AXB berpengaruh terhadap Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Viscosity* beras putih germinasi. Perlakuan spesifik yang mempengaruhi Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Viscosity* Beras Putih Germinasi dapat diketahui dengan menggunakan uji lanjut LSD.

Uji Lanjut LSD Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Through Viscosity* Faktor AB

Tabel 46. Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Through Viscosity*

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
A1 yang sama	1,610	a1b3	491,33	-				a
		a1b4	712,67	221,33*	-			b
		a1b2	1190,00	698,67*	477,33*	-		c
		a1b1	1631,33	1140,00*	918,67*	441,33*	-	d

Tabel 47. Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Through Viscosity*

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
A1 yang sama	1,610	a2b2	3331,33	-				a
		a2b1	3559,00	227,67*	-			b
		a2b3	3591,33	260,00*	32,33*	-		c
		a2b4	3591,33	260,00*	32,33*	0,00 ^{tn}	-	c

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Uji Lanjut LSD Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Through Viscosity* Interaksi AB

Tabel 48. Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Through Viscosity* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
1,429		a1b1	1631,33	-				A
		a2b1	3559,00	1927,67*	-			B

Tabel 49. Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Trough Viscosity* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
1,429		a1b2	1190,00	-				A
		a2b2	3331,33	2141,33*	-			B

Tabel 50. Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Through Viscosity* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
1,429		a1b3	491,33	-				A
		a2b3	3591,33	3100,00*	-			B

Tabel 51. Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Trough Viscosity* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
1,429		a1b4	712,67	-				A
		a2b4	3591,33	2878,67*	-			B

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Keterangan: Nilai yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji LSD.

Tabel 52. Dua Arah untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Viscosity* Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32

Kondisi Beras (A)	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	1631,33 ± 3,51	A	1190,00 ± 5,00	A	491,33 ± 3,51	A	712,67 ± 2,08	A
	d		c		a		b	
a2 (Beras Pecah Kulit)	3559,00 ± 3,00	B	3331,33 ± 3,51	B	3591,33 ± 3,51	B	3591,33 ± 3,51	B
	b		a		c		c	

Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal)

Kesimpulan:

Pada gabah (a1), nilai TV menurun signifikan hingga 4 ppm, lalu meningkat pada 6 ppm. Pada beras pecah kulit (a2), TV menurun pada 2 ppm, kemudian stabil (tidak berbeda nyata) antara 4 ppm dan 6 ppm. Secara keseluruhan, TV beras pecah kulit secara konsisten jauh lebih tinggi dan berbeda nyata dibandingkan gabah pada semua taraf konsentrasi ozon.

Tabel 53. Data Hasil Analisis Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Breakdown*

Kondisi Beras (A) sebagai Petak Utama	Kelompok	Konsentrasi Ozon (B) sebagai Anak Petak				Jumlah	Rata-Rata
		0 ppm (b1)	2 ppm (b2)	4 ppm (b3)	6 ppm (b4)		
Gabah (A1)	1	319,00	214,00	371,00	210,00	1114,00	278,50
	2	320,00	220,00	380,00	213,00	1133,00	283,25
	3	323,00	210,00	370,00	208,00	1111,00	277,75
Jumlah		962,00	644,00	1121,00	631,00	3358,00	839,50
Rata-Rata		320,67	214,67	373,67	210,33	1119,33	279,83
Beras Pecah Kulit (A2)	1	471,00	342,00	484,00	393,00	1690,00	422,50
	2	475,00	345,00	490,00	395,00	1705,00	426,25
	3	465,00	336,00	480,00	385,00	1666,00	416,50
Jumlah		1411,00	1023,00	1454,00	1173,00	5061,00	1265,25
Rata-Rata		470,33	341,00	484,67	391,00	1687,00	386,27
Jumlah Total		2373,00	1667,00	2575,00	1804,00	8419,00	2104,75
Rata-Rata Total		395,50	277,83	429,17	300,67	1403,17	350,79

Tabel 54. Analisis Variasi (ANAVA) Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Breakdown*

Sumber Keragaman (SK)	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Total (KT)	Fhitung	Ftabel 5%	Notasi
Petak Utama						
Kelompok (K)	2	233,58	116,79	7,51	19,00	tn
Faktor A	1	120842,04	120842,04	7775,36	18,51	*
Galat (A)	2	31,08	15,54			
Total	5	121106,71	120974,38			
Anak Petak						
Faktor B	3	95861,46	31953,82	5694,74	3,49	*
Interaksi (AB)	3	4140,46	1380,15	245,97	3,49	*
Galat (B)	12	67,33	5,61			
Total	18	100069,25	33339,58			

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel analisis variansi (ANAVA) dapat diketahui bahwa kondisi bahan (Faktor A), konsentrasi ozon (Faktor B), dan interaksi AXB berpengaruh terhadap Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Breakdown* beras putih germinasi. Perlakuan spesifik yang mempengaruhi Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Breakdown* Beras Putih Germinasi dapat diketahui dengan menggunakan uji lanjut LSD.

Uji Lanjut LSD Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Breakdown* Faktor AB

Tabel 55. Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Breakdown*

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
A1 yang sama	4,214	a1b4	210,33	-				a
		a1b2	214,67	4,33*	-			b
		a1b1	320,67	110,33*	106,00*	-		c
		a1b3	373,67	163,33*	159,00*	53,00*	-	d

Tabel 56. Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Breakdown*

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
A1 yang sama	4,214	a2b2	341,00	-				a
		a2b4	391,00	50,00*	-			b
		a2b1	470,33	129,33*	79,33*	-		c
		a2b3	484,67	143,67*	93,67*	14,33*	-	d

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Uji Lanjut LSD Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Breakdown* Interaksi AB

Tabel 57. Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Breakdown* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
7,429		a1b1	320,67	-				A
		a2b1	470,33	149,67*	-			B

Tabel 58. Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Breakdown* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
7,429		a1b2	214,67	-				A
		a2b2	341,00	126,33*	-			B

Tabel 59. Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Breakdown* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
7,429		a1b3	373,67	-				A
		a2b3	484,67	111,00*	-			B

Tabel 60. Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Breakdown* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
7,429		a1b4	210,33	-				A
		a2b4	391,00	180,67*	-			B

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Keterangan: Nilai yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji LSD.

Tabel 61. Dua Arah untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Breakdown* Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32

Kondisi Beras (A)	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	320,67 ± 2,08	A	214,67 ± 5,03	A	373,67 ± 5,51	A	210,33 ± 2,52	A
	c		b		d		a	
a2 (Beras Pecah Kulit)	470,33 ± 5,03	B	341,00 ± 4,58	B	484,67 ± 5,03	B	391,00 ± 5,29	B
	c		a		d		b	

Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal)

Kesimpulan:

BDV pada gabah (a1) dan beras pecah kulit (a2) menunjukkan pola fluktuasi yang identik, dengan nilai tertinggi tercapai pada 4 ppm yang mengindikasikan puncak ketidakstabilan granula pati. Secara statistik, BDV beras pecah kulit secara konsisten lebih tinggi dan berbeda nyata dibanding gabah pada seluruh taraf konsentrasi ozon, mencerminkan kerentanan granula yang lebih besar akibat ketiadaan perlindungan fisik sekam.

Tabel 62. Data Hasil Analisis Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Final Visc*

Kondisi Beras (A) sebagai Petak Utama	Kelompok	Konsentrasi Ozon (B) sebagai Anak Petak				Jumlah	Rata-Rata
		0 ppm (b1)	2 ppm (b2)	4 ppm (b3)	6 ppm (b4)		
Gabah (A1)	1	2707,00	2217,00	844,00	1319,00	7087,00	1771,75
	2	2715,00	2226,00	851,00	1327,00	7119,00	1779,75
	3	2699,00	2208,00	837,00	1311,00	7055,00	1763,75
Jumlah		8121,00	6651,00	2532,00	3957,00	21261,00	5315,25
Rata-Rata		2707,00	2217,00	844,00	1319,00	7087,00	1771,75
Beras Pecah Kulit (A2)	1	5163,00	4470,00	4796,00	4696,00	19125,00	4781,25
	2	5171,00	4479,00	4802,00	4703,00	19155,00	4788,75
	3	5155,00	4461,00	4790,00	4689,00	19095,00	4773,75
Jumlah		15489,00	13410,00	14388,00	14088,00	57375,00	14343,75
Rata-Rata		5163,00	4470,00	4796,00	4696,00	19125,00	4028,88
Jumlah Total		23610,00	20061,00	16920,00	18045,00	78636,00	19659,00
Rata-Rata Total		3935,00	3343,50	2820,00	3007,50	13106,00	3276,50

Tabel 63. Analisis Variasi (ANAVA) Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Final Visc*

Sumber Keragaman (SK)	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Total (KT)	Fhitung	Ftabel 5%	Notasi
Petak Utama						
Kelompok (K)	2	961,00	480,50	961,00	19,00	
Faktor A	1	54342541,50	54342541,50	108685083,00	18,51	*
Galat (A)	2	1,00	0,50			
Total	5	54343503,50	54343022,50			
Anak Petak						
Faktor B	3	4313187,00	1437729,00	1232339,14	3,49	*
Interaksi (AB)	3	2853025,50	951008,50	815150,14	3,49	*
Galat (B)	12	14,00	1,17			
Total	18	7166226,50	2388738,67			

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel analisis variansi (ANAVA) dapat diketahui bahwa kondisi bahan (Faktor A), konsentrasi ozon (Faktor B), dan interaksi AXB berpengaruh terhadap Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Final Visc* beras putih germinasi. Perlakuan spesifik yang mempengaruhi Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Final Visc* Beras Putih Germinasi dapat diketahui dengan menggunakan uji lanjut LSD.

Uji Lanjut LSD Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Final Visc* Faktor AB

Tabel 64. Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Final Visc*

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
A1 yang sama	1,922	a1b3	844,00	-				a
		a1b4	1319,00	475,00*	-			b
		a1b2	2217,00	1373,00*	898,00*	-		c
		a1b1	2707,00	1863,00*	1388,00*	490,00*	-	d

Tabel 65. Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Final Visc*

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
A1 yang sama	1,922	a2b2	4470,00	-				a
		a2b4	4696,00	226,00*	-			b
		a2b3	4796,00	326,00*	100,00*	-		c
		a2b1	5163,00	693,00*	467,00*	367,00*	-	d

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Uji Lanjut LSD Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Final Visc* Interaksi AB

Tabel 66. Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Final Visc* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
1,996		a1b1	2707,00	-				A
		a2b1	5163,00	2456,00	-			B

Tabel 67. Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Final Visc* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
1,996		a1b2	2217,00	-				A
		a2b2	4470,00	2253,00	-			B

Tabel 68. Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Final Visc* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
1,996		a1b3	844,00	-				A
		a2b3	4796,00	3952,00	-			B

Tabel 69. Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Final Visc* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
1,996		a1b4	1319,00	-				A
		a2b4	4696,00	3377,00	-			B

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Keterangan: Nilai yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji LSD.

Tabel 70. Dua Arah untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Final Visc* Beras Putih
Germinasi Varietas Inpari 32

Kondisi Beras (A)	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	2707,00 ± 8,00	A	2217,00 ± 9,00	A	844,00 ± 7,00	A	1319,00 ± 8,00	A
	d		c		a		b	
a2 (Beras Pecah Kulit)	5163,00 ± 8,00	B	4470,00 ± 900	B	4796,00 ± 6,00	B	4696,00 ± 7,00	B
	d		a		c		b	

Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal)

Kesimpulan:

Pemberian konsentrasi ozon berpengaruh nyata terhadap *Final Viscosity* (FV) pada kedua kondisi bahan. Pada gabah (a1), nilai FV menurun signifikan hingga mencapai titik terendah pada 4 ppm, kemudian meningkat nyata pada 6 ppm. Sementara itu, pada beras pecah kulit (a2), nilai FV cenderung menurun pada 2 ppm, namun meningkat kembali dan berfluktuasi pada konsentrasi 4 ppm dan 6 ppm. Secara statistik, notasi huruf kapital (A dan B) menegaskan bahwa nilai FV beras pecah kulit selalu jauh lebih tinggi dan berbeda nyata dibandingkan gabah pada seluruh taraf konsentrasi ozon, yang mencerminkan perbedaan karakteristik struktural dan stabilitas pati selama proses pendinginan pasca-pemasakan.

Tabel 71. Data Hasil Analisis Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Setback*

Kondisi Beras (A) sebagai Petak Utama	Kelompok	Konsentrasi Ozon (B) sebagai Anak Petak				Jumlah	Rata-Rata
		0 ppm (b1)	2 ppm (b2)	4 ppm (b3)	6 ppm (b4)		
Gabah (A1)	1	1076,00	1027,00	353,00	607,00	3063,00	765,75
	2	1085,00	1034,00	357,00	607,00	3083,00	770,75
	3	1075,00	1026,00	353,00	603,00	3057,00	764,25
Jumlah		3236,00	3087,00	1063,00	1817,00	9203,00	2300,75
Rata-Rata		1078,67	1029,00	354,33	605,67	3067,67	766,92
Beras Pecah Kulit (A2)	1	1604,00	1139,00	1205,00	1105,00	5053,00	1263,25
	2	1609,00	1143,00	1206,00	1108,00	5066,00	1266,50
	3	1601,00	1137,00	1199,00	1102,00	5039,00	1259,75
Jumlah		4814,00	3419,00	3610,00	3315,00	15158,00	3789,50
Rata-Rata		1604,67	1139,67	1203,33	1105,00	5052,67	1139,10
Jumlah Total		8050,00	6506,00	4673,00	5132,00	24361,00	6090,25
Rata-Rata Total		1341,67	1084,33	778,83	855,33	4060,17	1015,04

Tabel 72. Analisis Variasi (ANAVA) Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Setback*

Sumber Keragaman (SK)	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Total (KT)	Fhitung	Ftabel 5%	Notasi
Petak Utama						
Kelompok (K)	2	179,08	89,54	37,70	19,00	
Faktor A	1	1477584,38	1477584,38	622140,79	18,51	*
Galat (A)	2	4,75	2,38			
Total	5	1477768,21	1477676,29			
Anak Petak						
Faktor B	3	1156718,13	385572,71	135420,66	3,49	*
Interaksi (AB)	3	411002,46	137000,82	48117,36	3,49	*
Galat (B)	12	34,17	2,85			
Total	18	1567754,75	522576,38			

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel analisis variansi (ANAVA) dapat diketahui bahwa kondisi bahan (Faktor A), konsentrasi ozon (Faktor B), dan interaksi AXB berpengaruh terhadap Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Setback* beras putih germinasi. Perlakuan spesifik yang mempengaruhi Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Setback* Beras Putih Germinasi dapat diketahui dengan menggunakan uji lanjut LSD.

Uji Lanjut LSD Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Setback* Faktor AB

Tabel 73. Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Setback*

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
A1 yang sama	3,002	a1b3	354,33	-				a
		a1b4	605,67	251,33*	-			b
		a1b2	1029,00	674,67*	423,33*	-		c
		a1b1	1078,67	724,33*	473,00*	49,67*	-	d

Tabel 74. Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Setback*

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
A1 yang sama	3,002	a2b4	1105,00	-				a
		a2b2	1139,67	34,67*	-			b
		a2b3	1203,33	98,33*	63,67*	-		c
		a2b1	1604,67	499,67*	465,00*	401,33*	-	d

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Uji Lanjut LSD Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Setback* Interaksi AB

Tabel 75. Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Setback* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
3,562		a1b1	1078,67	-				A
		a2b1	1604,67	526,00*	-			B

Tabel 76. Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Setback* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
3,562		a1b2	1029,00	-				A
		a2b2	1139,67	110,67*	-			B

Tabel 77. Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Setback* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
3,562		a1b3	354,33	-				A
		a2b3	1203,33	849,00*	-			B

Tabel 78. Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Setback* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
3,562		a1b4	605,67	-				A
		a2b4	1105,00	499,33*	-			B

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Keterangan: Nilai yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji LSD.

Tabel 79. Dua Arah untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Setback* Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32

Kondisi Beras (A)	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	1078,67 ± 5,51	A	1029,00 ± 4,36	A	354,33 ± 2,31	A	605,67 ± 2,31	A
	d		c		a		b	
a2 (Beras Pecah Kulit)	1604,67 ± 4,04	B	1139,67 ± 3,06	B	1203,33 ± 3,79	B	1105,00 ± 3,00	B
	d		b		c		a	

Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal)

Kesimpulan:

Nilai *Setback* pada gabah (a1) dan beras pecah kulit (a2) menunjukkan pola fluktuasi yang berbeda akibat pengaruh konsentrasi ozon. Pada gabah, *Setback* terendah tercapai pada 4 ppm, sedangkan pada beras pecah kulit, nilai tertinggi terjadi pada kontrol (0 ppm). Secara statistik, beras pecah kulit secara konsisten menunjukkan nilai *Setback* yang lebih tinggi dan berbeda nyata dibandingkan gabah pada seluruh taraf perlakuan, mengindikasikan kecenderungan retrogradasi pati yang lebih kuat pada beras pecah kulit dibandingkan gabah.

Tabel 80. Data Hasil Analisis Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Time*

Kondisi Beras (A) sebagai Petak Utama	Ulangan	Konsentrasi Ozon (B) sebagai Anak Petak				Jumlah	Rata-Rata
		0 ppm (b1)	2 ppm (b2)	4 ppm (b3)	6 ppm (b4)		
Gabah (a ₁)	1	6,13	6,07	5,07	5,53	22,80	5,70
	2	6,20	6,13	5,13	5,60	23,06	5,77
	3	6,07	6,00	5,00	5,47	22,54	5,64
Sub Total		18,40	18,20	15,20	16,60	68,40	17,10
Rata-Rata		6,13	6,07	5,07	5,53	22,80	5,70
Beras Pecah Kulit (a ₂)	1	7,00	6,67	6,73	6,47	26,87	6,72
	2	7,07	6,73	6,80	6,53	27,13	6,78
	3	6,93	6,60	6,67	6,40	26,60	6,65
Sub Total		21,00	20,00	20,20	19,40	80,60	20,15
Rata-Rata		7,00	6,67	6,73	6,47	26,87	6,46
Jumlah Total		39,40	38,20	35,40	36,00	149,00	37,25
Rata-Rata Total		6,57	6,37	5,90	6,00	24,83	6,21

Tabel 81. Analisis Variasi (ANAVA) Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Time*

Sumber Keragaman (SK)	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Total (KT)	Fhitung	Ftabel 5%	Notasi
Petak Utama						
Kelompok (K)	2	179,08	89,54	37,70	19,00	
Faktor A	1	1477584,38	1477584,38	622140,79	18,51	*
Galat (A)	2	4,75	2,38			
Total	5	1477768,21	1477676,29			
Anak Petak						
Faktor B	3	1156718,13	385572,71	135420,66	3,49	*
Interaksi (AB)	3	411002,46	137000,82	48117,36	3,49	*
Galat (B)	12	34,17	2,85			
Total	18	1567754,75	522576,38			

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel analisis variansi (ANAVA) dapat diketahui bahwa kondisi bahan (Faktor A), konsentrasi ozon (Faktor B), dan interaksi AXB berpengaruh terhadap Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Time* beras putih germinasi. Perlakuan spesifik yang mempengaruhi Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Time* Beras Putih Germinasi dapat diketahui dengan menggunakan uji lanjut LSD.

Uji Lanjut LSD Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Time* Faktor AB

Tabel 82. Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Time*

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	0,006	a1b3	5,07	-				a
		a1b4	5,53	0,47*	-			b
		a1b2	6,07	1,00*	0,53*	-		c
		a1b1	6,13	1,07*	0,60*	0,07*	-	d

Tabel 83. Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Time*

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	0,006	a2b4	6,47	-				a
		a2b2	6,67	0,20*	-			b
		a2b3	6,73	0,27*	0,07*	-		c
		a2b1	7,00	0,53*	0,33*	0,27*	-	d

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Uji Lanjut LSD Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Time* Interaksi AB

Tabel 84. Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Time* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	0,006	a1b1	6,13	-				A
		a2b1	7,00	0,87*	-			B

Tabel 85. Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Time* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	0,006	a1b2	6,07	-				A
		a2b2	6,67	0,60*	-			B

Tabel 86. Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Time* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	0,006	a1b3	5,07	-				A
		a2b3	6,73	1,67*	-			B

Tabel 87. Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Time* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	0,006	a1b4	5,53	-				A
		a2b4	6,47	0,93*	-			B

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Keterangan: Nilai yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji LSD.

Tabel 88. Dua Arah untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Peak Time* Beras Putih
Germinasi Varietas Inpari 32

Kondisi Beras (A)	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	6,13 ± 0,07	A	6,07 ± 0,07	A	5,07 ± 0,07	A	5,53 ± 0,07	A
	d		c		a		b	
a2 (Beras Pecah Kulit)	7,00 ± 0,07	B	6,67 ± 0,07	B	6,73 ± 0,07	B	6,47 ± 0,07	B
	d		b		c		a	

Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal)

Kesimpulan:

Peak Time pada gabah (a1) dan beras pecah kulit (a2) dipengaruhi secara nyata oleh konsentrasi ozon, dengan pola fluktuasi yang berbeda di mana *Peak Time* terendah gabah tercapai pada 4 ppm, sedangkan pada beras pecah kulit terjadi pada 6 ppm. Secara konsisten, beras pecah kulit memerlukan waktu yang lebih lama untuk mencapai puncak gelatinisasi dibandingkan gabah pada seluruh taraf perlakuan, mengindikasikan ketahanan termal yang lebih tinggi pada pati beras pecah kulit.

Tabel 89. Data Hasil Analisis Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA)
Pasting Temp

Kondisi Beras (A) sebagai Petak Utama	Ulangan	Konsentrasi Ozon (B) sebagai Anak Petak				Jumlah	Rata-Rata
		0 ppm (b1)	2 ppm (b2)	4 ppm (b3)	6 ppm (b4)		
Gabah (a₁)	1	51,80	83,20	83,15	83,25	301,40	75,35
	2	51,90	83,30	83,20	83,35	301,75	75,44
	3	51,70	83,10	83,10	83,15	301,05	75,26
Sub Total		155,40	249,60	249,45	249,75	904,20	226,05
Rata-Rata		51,80	83,20	83,15	83,25	301,40	75,35
Beras Pecah Kulit (a₂)	1	85,00	84,00	83,95	84,55	337,50	84,38
	2	84,75	84,10	84,05	84,60	337,50	84,38
	3	84,50	83,90	83,30	84,45	336,15	84,04
Sub Total		254,25	252,00	251,30	253,60	1011,15	252,79
Rata-Rata		84,75	84,00	83,77	84,53	337,05	82,03
Jumlah Total		409,65	501,60	500,75	503,35	1915,35	478,84
Rata-Rata Total		68,28	83,60	83,46	83,89	319,23	79,81

Tabel 90. Analisis Variasi (ANAVA) Respon Fisik Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Pasting Temp*

Sumber Keragaman (SK)	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Total (KT)	Fhitung	Ftabel 5%	Notasi
Petak Utama						
Kelompok (K)	2	0,30	0,15	4,67	19,00	tn
Faktor A	1	476,60	476,60	14806,86	18,51	*
Galat (A)	2	0,06	0,03			
Total	5	476,96	476,78			
Anak Petak						
Faktor B	3	1064,34	354,78	22605,53	3,49	*
Interaksi (AB)	3	1155,96	385,32	24551,33	3,49	*
Galat (B)	12	0,19	0,02			
Total	18	2220,49	740,12			

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel analisis variansi (ANAVA) dapat diketahui bahwa kondisi bahan (Faktor A), konsentrasi ozon (Faktor B), dan interaksi AXB berpengaruh terhadap Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Pasting Temp* beras putih germinasi. Perlakuan spesifik yang mempengaruhi Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Pasting Temp* Beras Putih Germinasi dapat diketahui dengan menggunakan uji lanjut LSD.

Uji Lanjut LSD Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Pasting Temp* Faktor AB

Tabel 91. Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Pasting Temp*

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	0,223	a1b1	51,80	-				a
		a1b3	83,15	31,35*	-			b
		a1b2	83,20	31,40*	0,05	-		b
		a1b4	83,25	31,45*	0,10	0,05	-	b

Tabel 92. Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Paasting Temp*

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	0,223	a2b3	83,77	-				a
		a2b2	84,00	0,23*	-			b
		a2b4	84,53	0,77*	0,53*	-		c
		a2b1	84,75	0,98*	0,75*	0,22	-	c

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Uji Lanjut LSD Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Pasting Temp* Interaksi AB

Tabel 93. Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Pasting Temp* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	0,350	a1b1	51,80	-				A
		a2b1	84,75	32,95*	-			B

Tabel 94. Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi
(RVA) *Pasting Temp* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	0,350	a1b2	83,20	-				A
		a2b2	84,00	0,80*	-			B

Tabel 95. Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi
(RVA) *Pasting Temp* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	0,350	a1b3	83,15	-				A
		a2b3	83,77	0,62*	-			B

Tabel 96. Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Analisis Profil Gelatinisasi
(RVA) *Pasting Temp* Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	0,350	a1b4	83,25	-				A
		a2b4	84,53	1,28*	-			B

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Keterangan: Nilai yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji LSD.

Tabel 97. Dua Arah untuk Analisis Profil Gelatinisasi (RVA) *Pasting Temp* Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32

Kondisi Beras (A)	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	51,80 ± 0,10	A	83,20 ± 0,10	A	83,15 ± 0,05	A	83,25 ± 0,10	A
	d		c		a		b	
a2 (Beras Pecah Kulit)	84,75 ± 0,25	B	84,00 ± 0,10	B	83,77 ± 0,41	B	84,53 ± 0,08	B
	d		b		c		a	

Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal)

Kesimpulan:

Pasting Temperature pada gabah dan beras pecah kulit dipengaruhi nyata oleh konsentrasi ozon. Perlakuan ozon meningkatkan suhu gelatinisasi gabah secara drastis, sedangkan pada beras pecah kulit, ozon justru cenderung menurunkannya. Beras pecah kulit secara konsisten menunjukkan *Pasting Temperature* lebih tinggi dibanding gabah pada semua perlakuan, mengindikasikan bahwa pati beras pecah kulit membutuhkan energi termal lebih besar untuk memulai proses gelatinisasi.

Lampiran S. Data Hasil Analisis Respon Kimia Kadar Air

Tabel 98. Data Perhitungan Kadar Air Beras Putih Germinasi

Sampel		Ulangan	Berat (gram)			Kadar Air (%)
			W1	W2	W3	
A1	B1	1	23,928	25,933	25,669	13,17
		2	24,576	26,568	26,307	13,10
		3	24,621	26,623	26,360	13,14
	B2	1	23,912	25,921	25,655	13,24
		2	23,903	25,904	25,640	13,19
		3	22,420	24,422	24,157	13,24
	B3	1	22,422	24,424	24,161	13,14
		2	22,412	24,403	24,141	13,16
		3	24,284	26,280	26,018	13,13
	B4	1	24,275	26,270	26,007	13,18
		2	24,276	26,272	26,009	13,18
		3	22,468	24,465	24,203	13,12
A2	B1	1	22,452	24,446	24,183	13,19
		2	22,446	24,455	24,189	13,24
		3	31,079	33,081	32,817	13,19
	B2	1	31,05	33,055	32,791	13,17
		2	31,05	33,048	32,784	13,21
		3	23,839	25,842	25,577	13,23
	B3	1	23,813	25,817	25,554	13,12
		2	23,831	25,837	25,572	13,21
		3	22,174	24,165	23,901	13,26
	B4	1	22,179	24,174	23,911	13,18
		2	22,173	24,182	23,917	13,19
		3	24,627	26,624	26,36	13,22

Contoh Perhitungan:

Kadar Air Perlakuan a1b1 ulangan 1

Diketahui:

Berat cawan kosong (W1) = 23,912 gram

Berat cawan + sampel awal (W2) = 25,921 gram

Berat cawan + residu (W3) = 25,655 gram

$$\text{Kadar Air (\%)} = \frac{W_2 - W_3}{W_2 - W_1} \times 100\%$$

$$= \frac{25,655 - 23,912}{25,655 - 23,921} \times 100\% = 13,17\%$$

Tabel 99. Data Hasil Analisis Respon Kimia Kadar Air Beras Putih Germinasi

Kondisi Beras (A) sebagai Petak Utama	Ulangan	Konsentrasi Ozon (B) sebagai Anak Petak				Jumlah	Rata- Rata
		0 ppm (b1)	2 ppm (b2)	4 ppm (b3)	6 ppm (b4)		
Gabah (a₁)	1	13,17	13,24	13,14	13,18	52,73	13,18
	2	13,10	13,19	13,16	13,18	52,63	13,16
	3	13,14	13,24	13,13	13,12	52,63	13,16
Sub Total		39,41	39,67	39,43	39,48	157,99	39,50
Rata-Rata		13,14	13,22	13,14	13,16	52,66	13,17
Beras Pecah Kulit (a₂)	1	13,19	13,17	13,12	13,18	52,66	13,17
	2	13,24	13,21	13,21	13,19	52,85	13,21
	3	13,19	13,23	13,26	13,22	52,90	13,23
Sub Total		39,62	39,61	39,59	39,59	158,41	39,60
Rata-Rata		13,21	13,20	13,20	13,20	52,80	13,19
Jumlah Total		79,03	79,28	79,02	79,07	316,4	79,10
Rata-Rata Total		13,17	13,21	13,17	13,18	52,73	13,18

Perhitungan:

Diketahui: $a = 2$, $b = 4$, $r = 3$

10. Faktor Koreksi (FK)

$$\begin{aligned} FK &= \frac{Y_{....}^2}{abr} \\ &= \frac{(316,4)^2}{2 \times 4 \times 3} = 4171,21 \end{aligned}$$

11. Jumlah Kuadrat Total (JKT)

$$\begin{aligned} JKT &= \sum_{i,j,k} Y_{i,j,k}^2 - FK \\ &= (13,17)^2 + (13,10)^2 + \dots + (13,22)^2 - 4171,21 \\ &= 0,043 \end{aligned}$$

12. Jumlah Kuadrat Petak Utama

$$\begin{aligned} JK (\text{Petak Utama}) &= \frac{\sum_{i,k} Y_{i,k}^2}{b} - FK \\ &= \frac{52,73^2 + 52,63^2 + \dots + 52,90^2}{4} - 4171,21 \\ &= 0,017 \end{aligned}$$

13. Jumlah Kuadrat Kelompok (JKK)

$$\begin{aligned} JKK &= \frac{\sum_k Y_{...k}^2}{ab} - FK \\ &= \frac{105,39^2 + \dots + 105,53^2}{3 \times 4} - 4171,21 \\ &= 0,001 \end{aligned}$$

14. Jumlah Kuadrat Faktor A

$$\begin{aligned} JK (A) &= \frac{\sum_i Y_i^2}{rb} - FK \\ &= \frac{157,99^2 + 158,41^2}{3 \times 4} - 4171,21 \\ &= 0,007 \end{aligned}$$

15. Jumlah Kuadrat Galat Faktor A

$$\begin{aligned} JK (\text{Galat a}) &= JK (\text{Petak Utama}) - JKK - JK(A) \\ &= 0,017 - 0,001 - 0,007 \\ &= 0,008 \end{aligned}$$

16. Jumlah Kuadrat Faktor B

$$\begin{aligned}
 JK(B) &= \frac{\sum_j y_j^2}{ra} - FK \\
 &= \frac{79,03^2 + 79,28^2 + \dots + 79,07^2}{3 \times 2} - 4171,21 \\
 &= 0,007
 \end{aligned}$$

17. Jumlah Kuadrat Interaksi A x B

$$\begin{aligned}
 JK(AB) &= \frac{\sum_{i,j} y_{ij}^2}{r} - FK - JK(A) - JK(B) \\
 &= \frac{39,41^2 + 39,67^2 + \dots + 39,59^2}{3} - 4171,21 - 0,007 - 0,007 \\
 &= 0,007
 \end{aligned}$$

18. Jumlah Kuadrat Galat Faktor B

$$\begin{aligned}
 JK(\text{Galat B}) &= JKT - JK(\text{Petak Utama}) - JK(B) - JK(AB) \\
 &= 0,043 - 0,017 - 0,007 - 0,007 \\
 &= 0,012
 \end{aligned}$$

Tabel 100. Analisis Variasi (ANAVA) Analisis Respon Kimia Kadar Air Beras Putih
Germinasi

Sumber Keragaman (SK)	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Total (KT)	Fhitung	Ftabel 5%	Notasi
Petak Utama						
Kelompok (K)	2	0,001	0,001	0,15	19,00	tn
Faktor A	1	0,007	0,007	1,74	18,51	tn
Galat (A)	2	0,008	0,004			
Total	5	0,017	0,012			
Anak Petak						
Faktor B	3	0,007	0,002	2,523	3,49	tn
Interaksi (AB)	3	0,007	0,002	2,337	3,49	tn
Galat (B)	12	0,012	0,001			
Total	18	0,026	0,006			

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel analisis variansi (ANAVA) dapat diketahui bahwa kondisi bahan, konsentrasi ozon dan interaksi keduanya tidak berpengaruh terhadap kadar air beras putih germinasi, sehingga tidak dilakukan uji lanjut LSD.

Lampiran T. Data Hasil Analisis Respon Kimia Kadar Pati

Tabel 101. Data Perhitungan Kadar Pati Beras Putih Germinasi

Sampel		Ulangan	W Sampel (gram)	Vol. Blanko (ml)	Vol. Titration (ml)	Vol Tio 0,1 N (ml)	G Invert (mg)	Pati (%)	Rata- Rata Pati
A1	B1	1	1,001	12,30	6,23	6,01	14,720	66,17	65,21
		2	1,005	12,30	6,30	5,93	14,535	65,08	
		3	1,003	12,30	6,38	5,86	14,350	64,38	
	B2	1	1,004	12,30	6,50	5,74	14,041	62,93	64,08
		2	1,000	12,30	6,40	5,84	14,288	64,30	
		3	1,002	12,30	6,33	5,91	14,473	65,00	
	B3	1	1,001	12,30	6,53	5,71	13,979	62,84	61,84
		2	1,005	12,30	6,68	5,56	13,608	60,93	
		3	1,005	12,30	6,60	5,64	13,793	61,76	
	B4	1	1,005	12,30	6,00	6,23	15,277	68,40	67,59
		2	1,001	12,30	6,18	6,06	14,844	66,73	
		3	1,000	12,30	6,10	6,13	15,030	67,64	
A2	B1	1	1,000	12,30	6,45	5,79	14,164	63,74	63,70
		2	1,004	12,30	6,48	5,76	14,102	63,21	
		3	1,002	12,30	6,40	5,84	14,288	64,17	
	B2	1	1,002	12,30	6,43	5,81	14,226	63,89	63,78
		2	1,005	12,30	6,43	5,81	14,226	63,70	
		3	1,000	12,30	6,45	5,79	14,164	63,74	
	B3	1	1,008	12,30	6,33	5,91	14,473	64,61	64,63
		2	1,006	12,30	6,35	5,88	14,411	64,46	
		3	1,005	12,30	6,33	5,91	14,473	64,80	
	B4	1	1,000	12,30	6,50	5,74	14,041	63,18	62,90
		2	1,006	12,30	6,50	5,74	14,041	62,81	
		3	1,003	12,30	6,53	5,71	13,979	62,72	

Contoh Perhitungan:

Kadar Pati Perlakuan a1b1 ulangan 1

1. Perhitungan Pembakuan KIO_3

Diketahui:

$$\text{Berat } \text{KIO}_3 = 0,043 \text{ gram}$$

$$\text{BE } \text{KIO}_3 = 35,667$$

$$\text{Vol } \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 12,30 \text{ ml}$$

$$\begin{aligned}\text{Normalitas } \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 &= \frac{mg}{BE \times V} \\ &= \frac{0,043 \times 1000}{35,667 \times 12,30} = 0,0989 \text{ N}\end{aligned}$$

2. Perhitungan % Kadar Pati

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

$$= \frac{25,655 - 23,912}{25,655 - 25,921} \times 100\% = 13,17\%$$

$$\begin{aligned}\text{mg Glukosa} &= \left[\left(\frac{mg_2 - mg_1}{V_2 - V_1} \right) \times (\Delta V_{\text{tio}} - V_1) \right] + mg_1 \\ &= \left[\left(\frac{17,2 - 14,7}{7 - 6} \right) \times (6,01 - 6) \right] + 14,7 = 14,720 \text{ mg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\% \text{ Pati} &= \frac{\text{mg Glukosa} \times FP \times 0,9}{\text{mg Sampel}} \times 100\% \\ &= \frac{14,720 \text{ mg} \times 50 \times 0,9}{1,001 \text{ gram}} \times 100\% = 66,17\%\end{aligned}$$

Tabel 102. Data Hasil Analisis Respon Kimia Kadar Pati Beras Putih Germinasi

Kondisi Beras (A) sebagai Petak Utama	Ulangan	Konsentrasi Ozon (B) sebagai Anak Petak				Jumlah	Rata-Rata
		0 ppm (b1)	2 ppm (b2)	4 ppm (b3)	6 ppm (b4)		
Gabah (a ₁)	1	66,17	62,93	62,84	68,40	260,34	65,09
	2	65,08	64,30	60,93	66,73	257,04	64,26
	3	64,38	65,00	61,76	67,64	258,78	64,70
Sub Total		195,63	192,23	185,53	202,77	776,16	194,04
Rata-Rata		65,21	64,08	61,84	67,59	258,72	64,68
Beras Pecah Kulit (a ₂)	1	63,74	63,89	64,61	63,18	255,42	63,86
	2	63,21	63,70	64,46	62,81	254,18	63,55
	3	64,17	63,74	64,80	62,72	255,43	63,86
Sub Total		191,12	191,33	193,87	188,71	765,03	191,26
Rata-Rata		63,71	63,78	64,62	62,90	255,01	63,98
Jumlah Total		386,75	383,56	379,4	391,48	1541,19	385,30
Rata-Rata Total		64,46	63,93	63,23	65,25	256,87	64,22

Perhitungan:

Diketahui: a = 2, b = 4, r = 3

1. Faktor Koreksi (FK)

$$FK = \frac{Y_{...}^2}{abr}$$

$$= \frac{(1541,19)^2}{2 \times 4 \times 3} = 98969,44$$

2. Jumlah Kuadrat Total (JKT)

$$JKT = \sum_{i,j,k} Y_{i,j,k}^2 - FK$$

$$= (66,17)^2 + (65,08)^2 + \dots + (62,72)^2 - 98969,44$$

$$68,824$$

3. Jumlah Kuadrat Petak Utama

$$\begin{aligned}
 \text{JK (Petak Utama)} &= \frac{\sum_{i,k} Y_{i.k}^2}{b} - \text{FK} \\
 &= \frac{260,34^2 + 257,04^2 + \dots + 255,43^2}{4} - 98969,44 \\
 &= 6,782
 \end{aligned}$$

4. Jumlah Kuadrat Kelompok (JKK)

$$\begin{aligned}
 \text{JKK} &= \frac{\sum_k Y^2 \dots k}{ab} - \text{FK} \\
 &= \frac{515,76^2 + \dots + 514,21^2}{3 \times 4} - 98969,44 \\
 &= 1,331
 \end{aligned}$$

5. Jumlah Kuadrat Faktor A

$$\begin{aligned}
 \text{JK (A)} &= \frac{\sum_i Y_i^2}{rb} - \text{FK} \\
 &= \frac{776,16^2 + 765,03^2}{3 \times 4} - 98969,44 \\
 &= 5,162
 \end{aligned}$$

6. Jumlah Kuadrat Galat Faktor A

$$\begin{aligned}
 \text{JK (Galat a)} &= \text{JK (Petak Utama)} - \text{JKK} - \text{JK(A)} \\
 &= 6,782 - 1,331 - 5,162 \\
 &= 0,290
 \end{aligned}$$

7. Jumlah Kuadrat Faktor B

$$\begin{aligned}
 \text{JK (B)} &= \frac{\sum_j Y_j^2}{ra} - \text{FK} \\
 &= \frac{386,75^2 + 383,56^2 + \dots + 391,48^2}{3 \times 2} - 98969,44 \\
 &= 13,022
 \end{aligned}$$

8. Jumlah Kuadrat Interaksi A x B

$$\begin{aligned}
 \text{JK (AB)} &= \frac{\sum_{i,j} Y_{ij}^2}{r} - \text{FK} - \text{JK (A)} - \text{JK (B)} \\
 &= \frac{195,63^2 + 192,23^2 + \dots + 188,71^2}{3} - 98969,44 - 5,162 - 13,022 \\
 &= 42,903
 \end{aligned}$$

9. Jumlah Kuadrat Galat Faktor B

$$\begin{aligned}
 \text{JK (Galat B)} &= \text{JKT} - \text{JK (Petak Utama)} - \text{JK (B)} - \text{JK (AB)} \\
 &= 68,824 - 6,782 - 13,022 - 42,903
 \end{aligned}$$

$$= 6,116$$

Tabel 103. Analisis Variasi (ANAVA) Analisis Respon Kimia Kadar Pati Beras Putih Germinasi

Sumber Keragaman (SK)	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Total (KT)	Fhitung	Ftabel 5%	Notasi
Petak Utama						
Kelompok (K)	2	1,331	0,666	4,60	19,00	tn
Faktor A	1	5,162	5,162	35,66	18,51	*
Galat (A)	2	0,290	0,145			
Total	5	6,782	5,972			
Anak Petak						
Faktor B	3	13,022	4,341	8,517	3,49	*
Interaksi (AB)	3	42,903	14,301	28,060	3,49	*
Galat (B)	12	6,116	0,510			
Total	18	62,041	19,151			

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel analisis variansi (ANAVA) dapat diketahui bahwa kondisi bahan (Faktor A), konsentrasi ozon (Faktor B), dan interaksi AXB berpengaruh terhadap Kadar Pati beras putih germinasi. Perlakuan spesifik yang mempengaruhi Kadar Pati Beras Putih Germinasi dapat diketahui dengan menggunakan uji lanjut LSD.

Uji Lanjut LSD Kadar Pati Faktor AB

$$t_{\text{student } a(0,05; 12)} = 2,179$$

$$S_y = \sqrt{\frac{2 \text{ KT (Galat b)}}{r}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \times 0,510}{3}} = 0,583$$

$$\begin{aligned} \text{LSD} &= S_y \times t_{(0,05; 3)} \\ &= 0,583 \times 2,179 = 1,270 \end{aligned}$$

Tabel 104. Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Kadar Pati Beras Putih
Germinasi

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	1,270	a1b3	61,84	-				a
		a1b2	64,08	2,23*	-			b
		a1b1	65,21	3,37*	1,13 ^{tn}	-		b
		a1b4	67,59	5,75*	3,51*	2,38*	-	c

Tabel 105. Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Kadar Pati Beras Putih
Germinasi

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	1,270	a2b4	62,90	-				a
		a2b1	63,71	0,80 ^{tn}	-			ab
		a2b2	63,78	0,87 ^{tn}	0,07 ^{tn}	-		ab
		a2b3	64,62	1,72*	0,92 ^{tn}	0,85 ^{tn}	-	b

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Keterangan: Nilai yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji LSD.

Uji Lanjut LSD Kadar Pati Interaksi AB

$$t_{\text{student a}} (0,05 ; 2) = 4,303$$

$$t_{\text{student a}} (0,05 ; 12) = 2,179$$

$$t' = \frac{(b-1)(KT \text{ Galat B})(t_b) + (KT \text{ Galat a})(t_a)}{(b-1)(KT \text{ Galat b}) + (KT \text{ Galat a})}$$

$$= \frac{(3)(0,510)(2,179) + (0,145)(4,303)}{(3)(0,510) + (0,145)} = 2,363$$

$$Sy = \sqrt{\frac{2(b-1)KT(\text{Galat b}) + KT(\text{Galat a})}{r \times b}}$$

$$= \sqrt{\frac{2(3)(0,510) + (0,145)}{3 \times 4}} = 0,528$$

$$LSD = Sy \times t'$$

$$= 0,528 \times 3,093 = 1,248$$

Tabel 106. Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Kadar Pati Beras Putih
Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
1,248		a2b1	63,71	-				A
		a1b1	65,21	1,50*	-			B

Tabel 107. Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Kadar Pati Beras Putih
Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
1,248		a2b2	63,78	-				A
		a1b2	64,08	0,30 ^{tn}	-			A

Tabel 108. Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Kadar Pati Beras Putih
Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	1,248	a1b3	61,84	-				A
		a2b3	64,62	2,78*	-			B

Tabel 109. Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Kadar Pati Beras Putih
Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	1,248	a2b4	62,90	-				A
		a1b4	67,59	4,69*	-			B

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Keterangan: Nilai yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji LSD.

Tabel 110. Dua Arah untuk Analisis Kadar Pati Beras Putih Germinasi Varietas
Inpari 32

Kondisi Beras (A)	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	65,21 ± 0,90	B	64,08 ± 1,05	A	61,84 ± 0,96	A	67,59 ± 0,84	B
	b		b		a		c	
a2 (Beras Pecah Kulit)	63,71 ± 0,48	A	63,78 ± 0,10	A	64,62 ± 0,17	B	62,90 ± 0,24	A
	ab		ab		b		a	

Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal).

Kesimpulan:

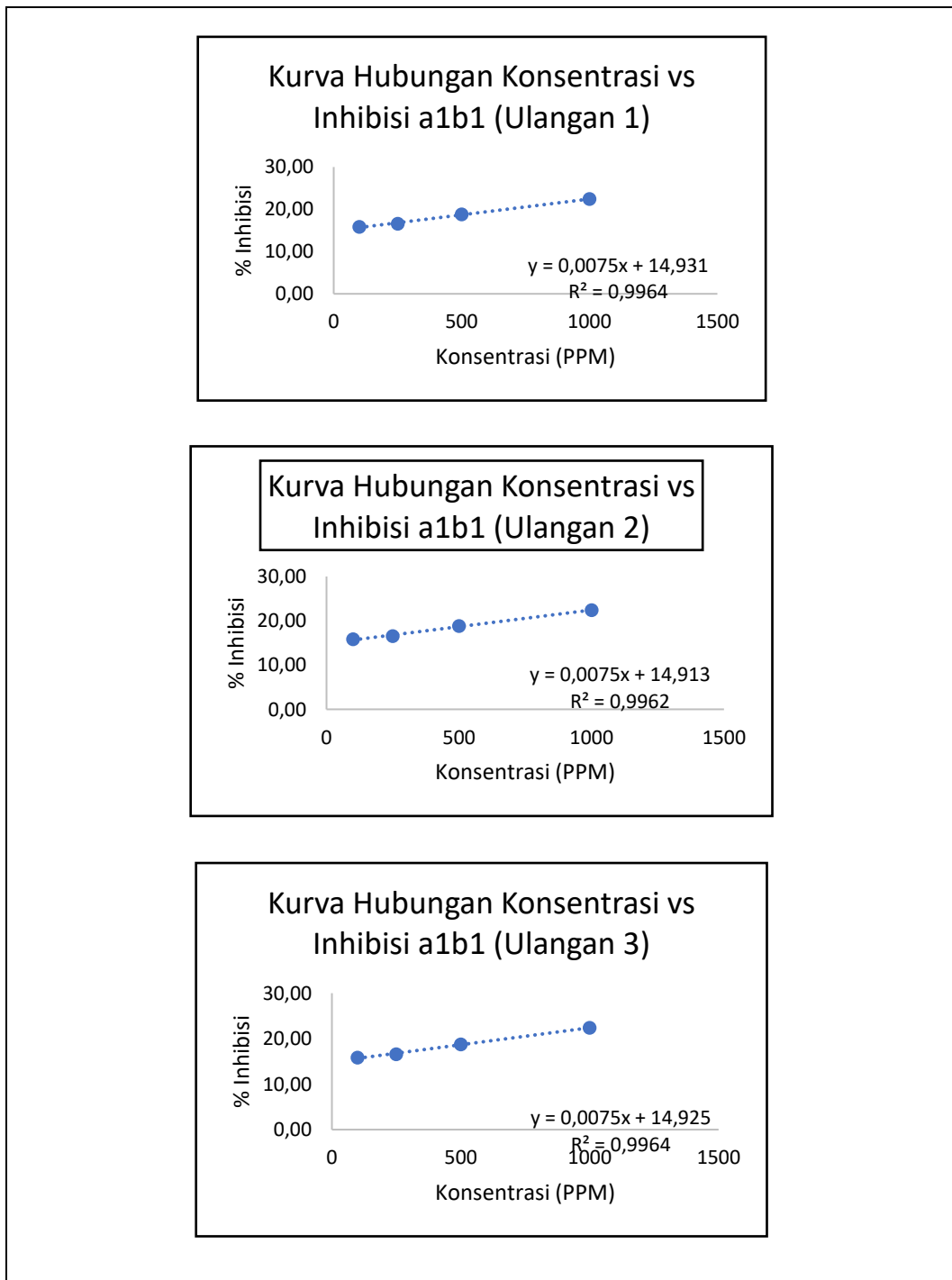
Semakin tinggi konsentrasi ozon pada kondisi bahan gabah (a1), kadar pati tidak berbeda nyata antara b1 (0 ppm) terhadap b2 (2 ppm), namun terjadi penurunan nyata pada b3 (4 ppm) dan peningkatan nyata pada b4 (6 ppm), sedangkan pada kondisi bahan beras pecah kulit (a2) kadar pati tidak berbeda nyata antara b1, b2, b3, namun terjadi penurunan nyata pada b4 (6 ppm) terhadap b3 (4 ppm).

Pada konsentrasi ozon yang sama yaitu 0 ppm, 4 ppm, dan 6 ppm terjadi perbedaan nyata kadar pati antara jenis bahan gabah (a1) terhadap beras pecah kulit (a2), sedangkan pada konsentrasi ozon 2 ppm tidak terjadi perbedaan nyata antara kedua jenis bahan tersebut.

Lampiran U. Data Hasil Analisis Respon Kimia Aktivitas Antioksidan

Tabel 111. Data Perhitungan Aktivitas Antioksidan (% Inhibisi) Beras Putih
Germinasi (a1b1)

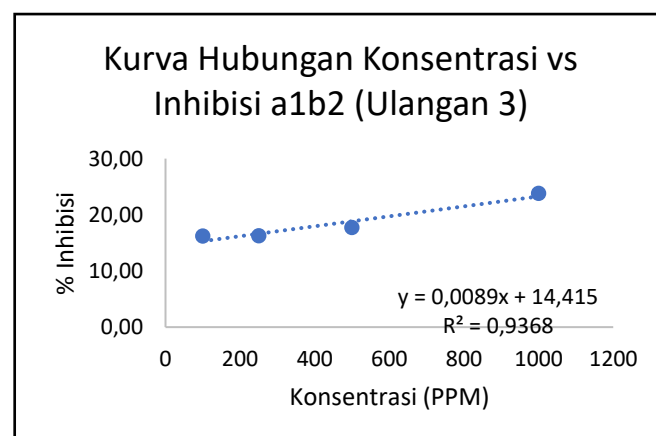
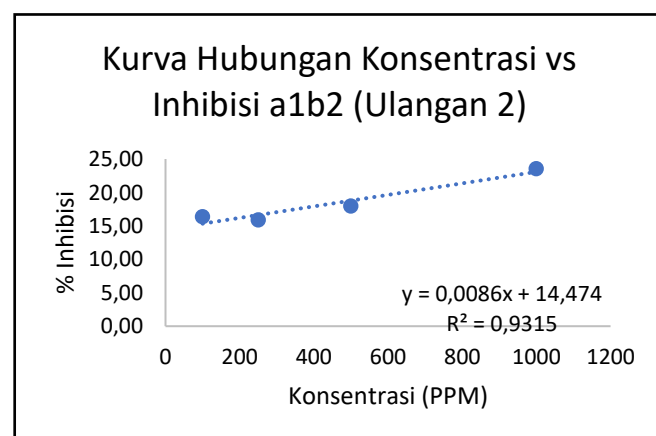
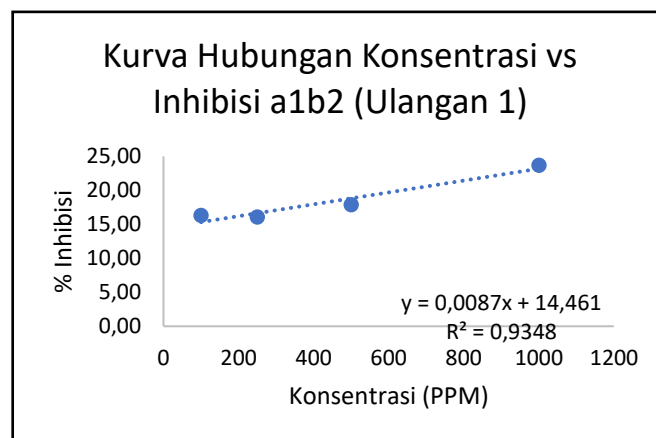
Konsentrasi (ppm)	Absorbansi				% Inhibisi 1	% Inhibisi 2	% Inhibisi 3
	Blan ko	U1	U2	U3			
100	0,9766	0,8219	0,8222	0,8220	15,84	15,81	15,83
250	0,9766	0,8149	0,8151	0,8150	16,56	16,54	16,55
500	0,9766	0,7933	0,7931	0,7935	18,77	18,79	18,75
1000	0,9766	0,7575	0,7577	0,7578	22,43	22,41	22,40
IC50		4675, 87	4678, 27	4676, 67	IC 50 = 4676,93 ± 1,22		
Rata-rata		4676,93					
Stdev		1,22					



Gambar 9. Kurva Hubungan Konsentrasi Ozon vs Inhibisi a1b1

Tabel 112. Data Perhitungan Aktivitas Antioksidan (% Inhibisi) Beras Putih
Germinasi (a1b2)

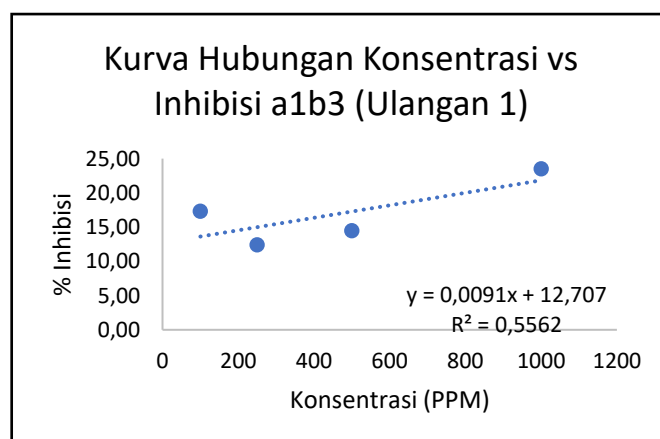
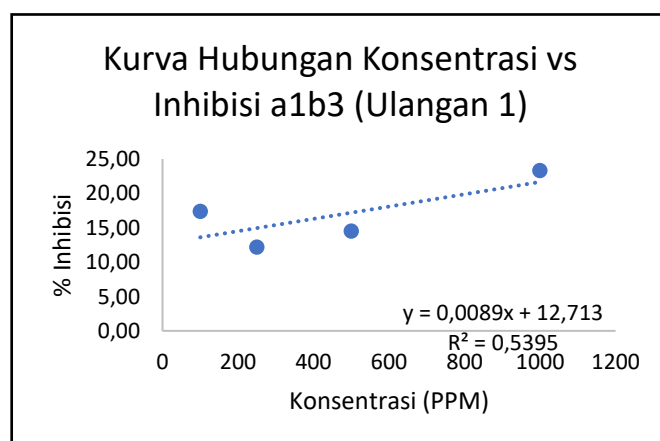
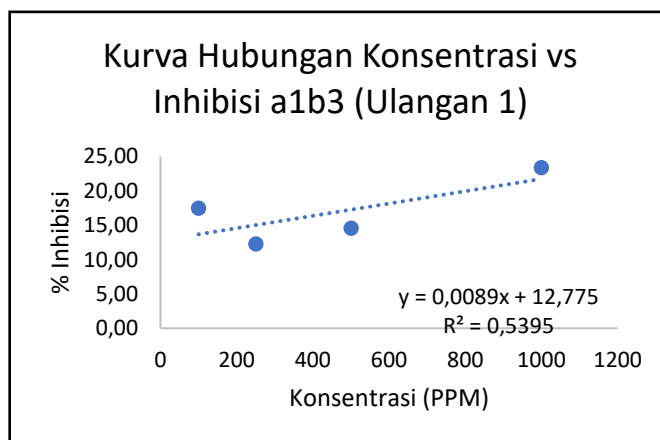
Konsentrasi (ppm)	Absorbansi				% Inhibisi 1	% Inhibisi 2	% Inhibisi 3
	Blan ko	U1	U2	U3			
100	0,9766	0,8171	0,8165	0,8182	16,33	16,39	16,22
250	0,9766	0,8196	0,8214	0,8179	16,08	15,89	16,25
500	0,9766	0,8020	0,8011	0,8032	17,88	17,97	17,76
1000	0,9766	0,7451	0,7465	0,7440	23,70	23,56	23,82
IC50		4084, 94	4130, 93	3998, 31	IC 50 = 4071,40 ± 67,34		
Rata-rata		4071,40					
Stdev		67,34					



Gambar 10. Kurva Hubungan Konsentrasi Ozon vs Inhibisi a1b2

Tabel 113. Data Perhitungan Aktivitas Antioksidan (% Inhibisi) Beras Putih
Germinasi (a1b3)

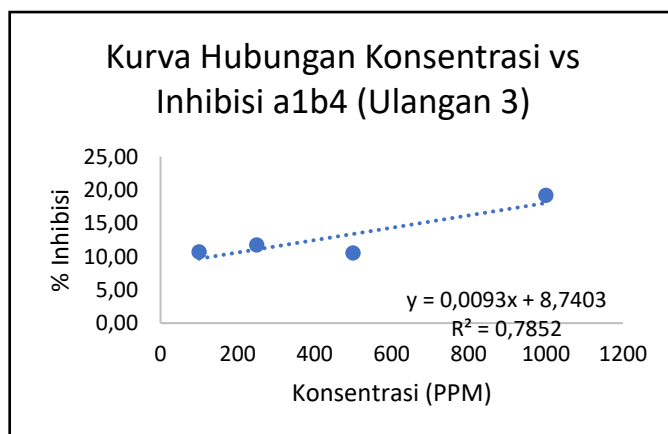
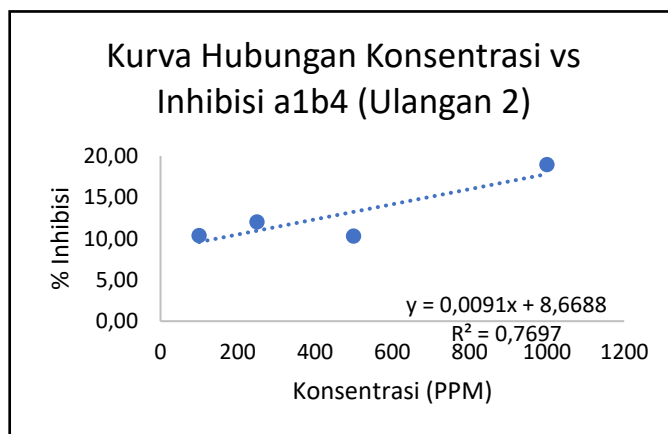
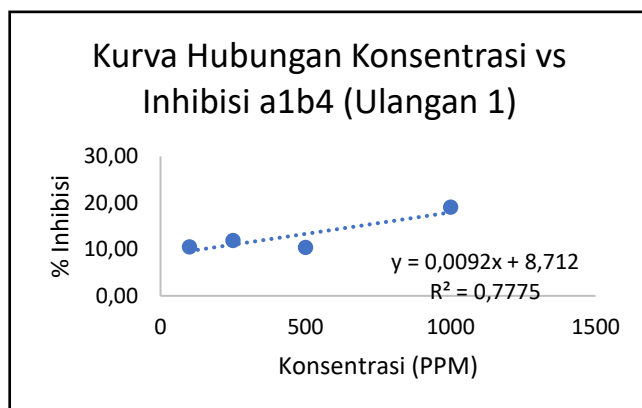
Konsentrasi (ppm)	Absorbansi				% Inhibisi 1	% Inhibisi 2	% Inhibisi 3
	Blan ko	U1	U2	U3			
100	0,9766	0,8061	0,8067	0,8074	17,46	17,40	17,33
250	0,9766	0,8569	0,8575	0,8555	12,26	12,20	12,40
500	0,9766	0,8344	0,835	0,8352	14,56	14,50	14,48
1000	0,9766	0,7483	0,7489	0,7471	23,38	23,32	23,50
IC50		4182, 58	4189, 55	4098, 13	IC 50 = 4156,76 ± 50,89		
Rata-rata		4156,76					
Stdev		50,89					



Gambar 11. Kurva Hubungan Konsentrasi Ozon vs Inhibisi a1b3

Tabel 114. Data Perhitungan Aktivitas Antioksidan (% Inhibisi) Beras Putih
Germinasi (a1b4)

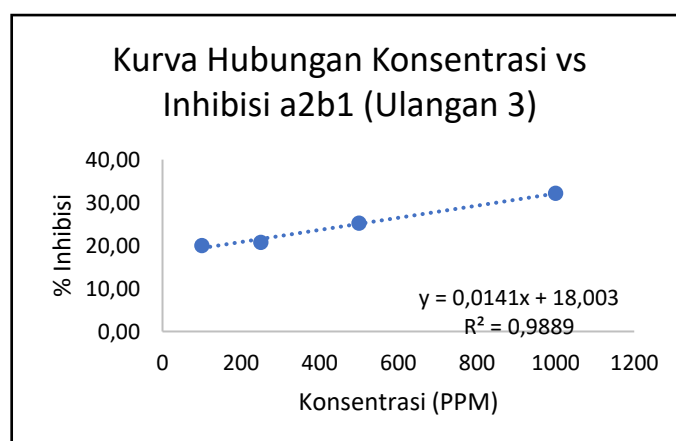
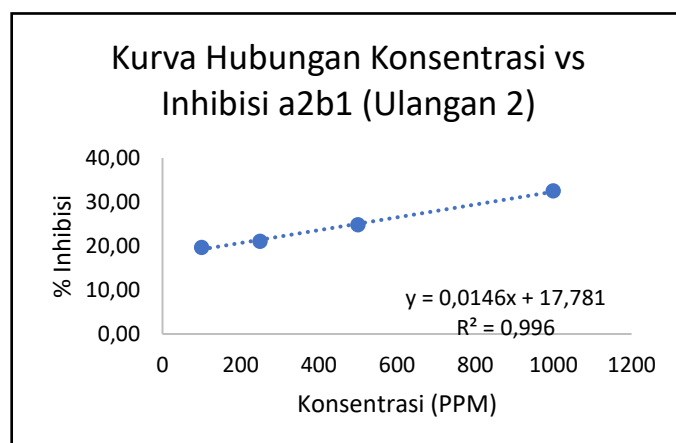
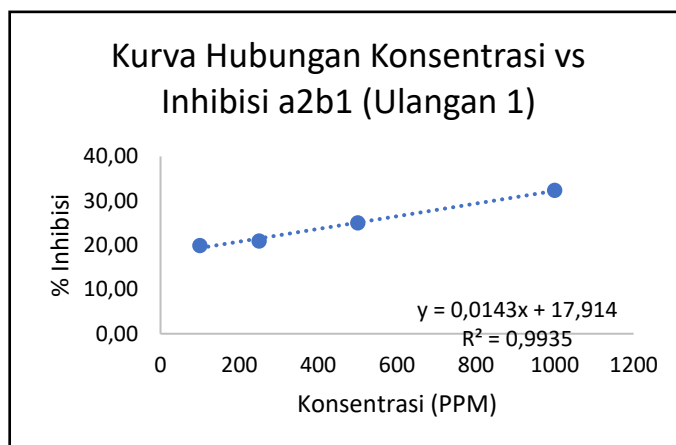
Konsentrasi (ppm)	Absorbansi				% Inhibisi 1	% Inhibisi 2	% Inhibisi 3
	Blan ko	U1	U2	U3			
100	0,9766	0,8737	0,8755	0,8722	10,54	10,35	10,69
250	0,9766	0,8605	0,8594	0,8619	11,89	12,00	11,74
500	0,9766	0,8749	0,8761	0,8738	10,41	10,29	10,53
1000	0,9766	0,790	0,7915	0,7892	19,11	18,95	19,19
IC50		4487, 83	4541, 89	4436, 53	IC 50 = 4488,75 ± 52,69		
Rata-rata		4488,75					
Stdev		52,69					



Gambar 12. Kurva Hubungan Konsentrasi Ozon vs Inhibisi a1b4

Tabel 115. Data Perhitungan Aktivitas Antioksidan (% Inhibisi) Beras Putih
Germinasi (a2b1)

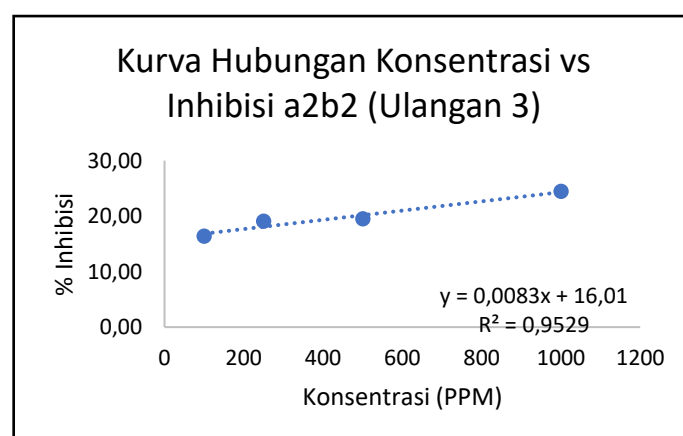
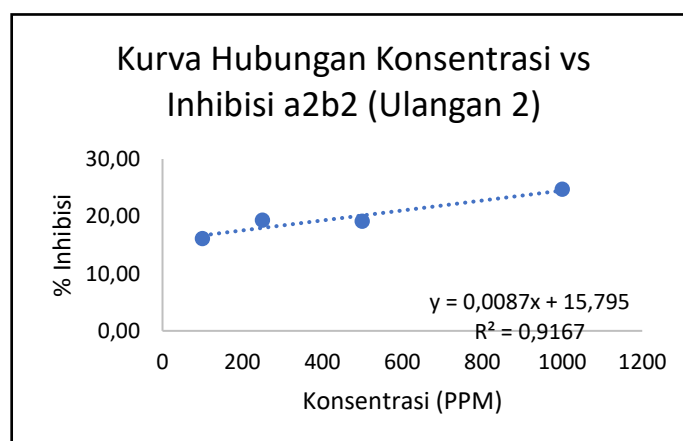
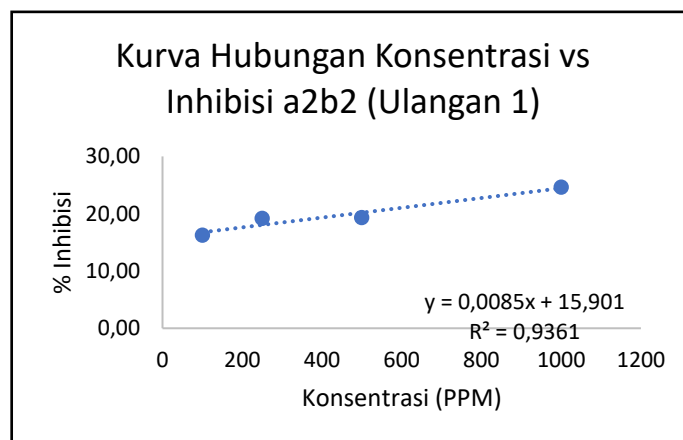
Konsentrasi (ppm)	Absorbansi				% Inhibisi 1	% Inhibisi 2	% Inhibisi 3
	Blan ko	U1	U2	U3			
100	0,9766	0,7826	0,7845	0,7812	19,86	19,67	20,01
250	0,9766	0,7724	0,7710	0,7743	20,91	21,05	20,71
500	0,9766	0,7324	0,7341	0,7305	25,01	24,83	25,20
1000	0,9766	0,6607	0,6592	0,6624	32,35	32,50	32,17
IC50		2243, 78	2206, 78	2269, 29	IC 50 = 2239,95 ± 31,43		
Rata-rata		2239,95					
Stdev		31,43					



Gambar 13. Kurva Hubungan Konsentrasi Ozon vs Inhibisi a2b1

Tabel 116. Data Perhitungan Aktivitas Antioksidan (% Inhibisi) Beras Putih
Germinasi (a2b2)

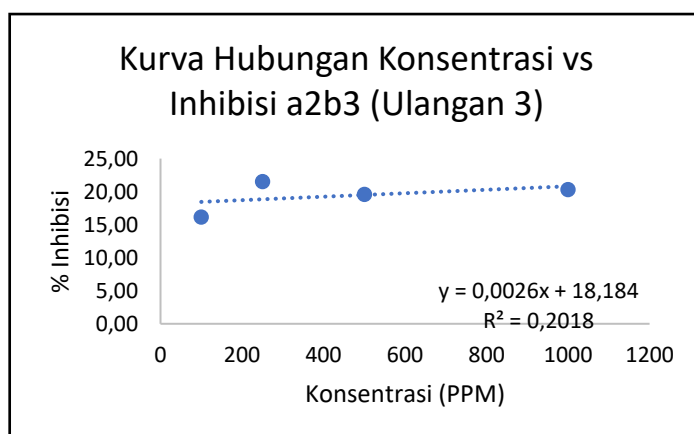
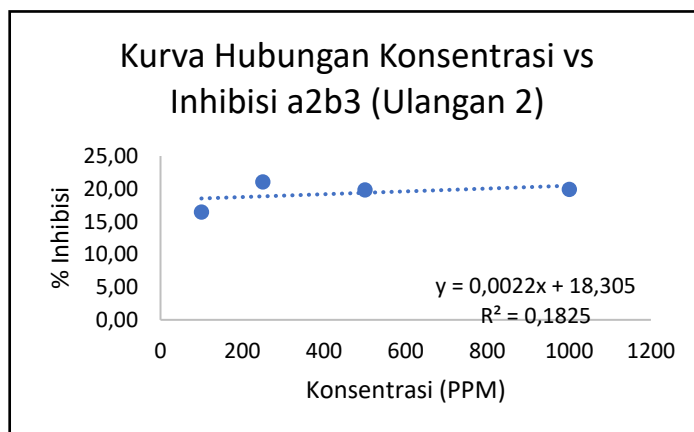
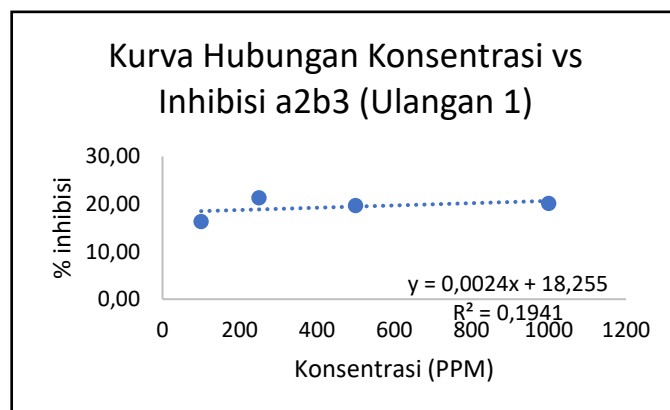
Konsentrasi (ppm)	Absorbansi				% Inhibisi 1	% Inhibisi 2	% Inhibisi 3
	Blanko	U1	U2	U3			
100	0,9766	0,8179	0,8192	0,8164	16,25	16,12	16,40
250	0,9766	0,7891	0,7880	0,7905	19,20	19,31	19,06
500	0,9766	0,7877	0,7899	0,7862	19,34	19,12	19,50
1000	0,9766	0,7361	0,7351	0,7378	24,63	24,73	24,45
IC50		4011,65	3931,61	4095,18	IC 50 = 4012,81 ± 81,79		
Rata-rata		4012,81					
Stdev		81,79					



Gambar 14. Kurva Hubungan Konsentrasi Ozon vs Inhibisi a2b2

Tabel 117. Data Perhitungan Aktivitas Antioksidan (% Inhibisi) Beras Putih
Germinasi (a2b3)

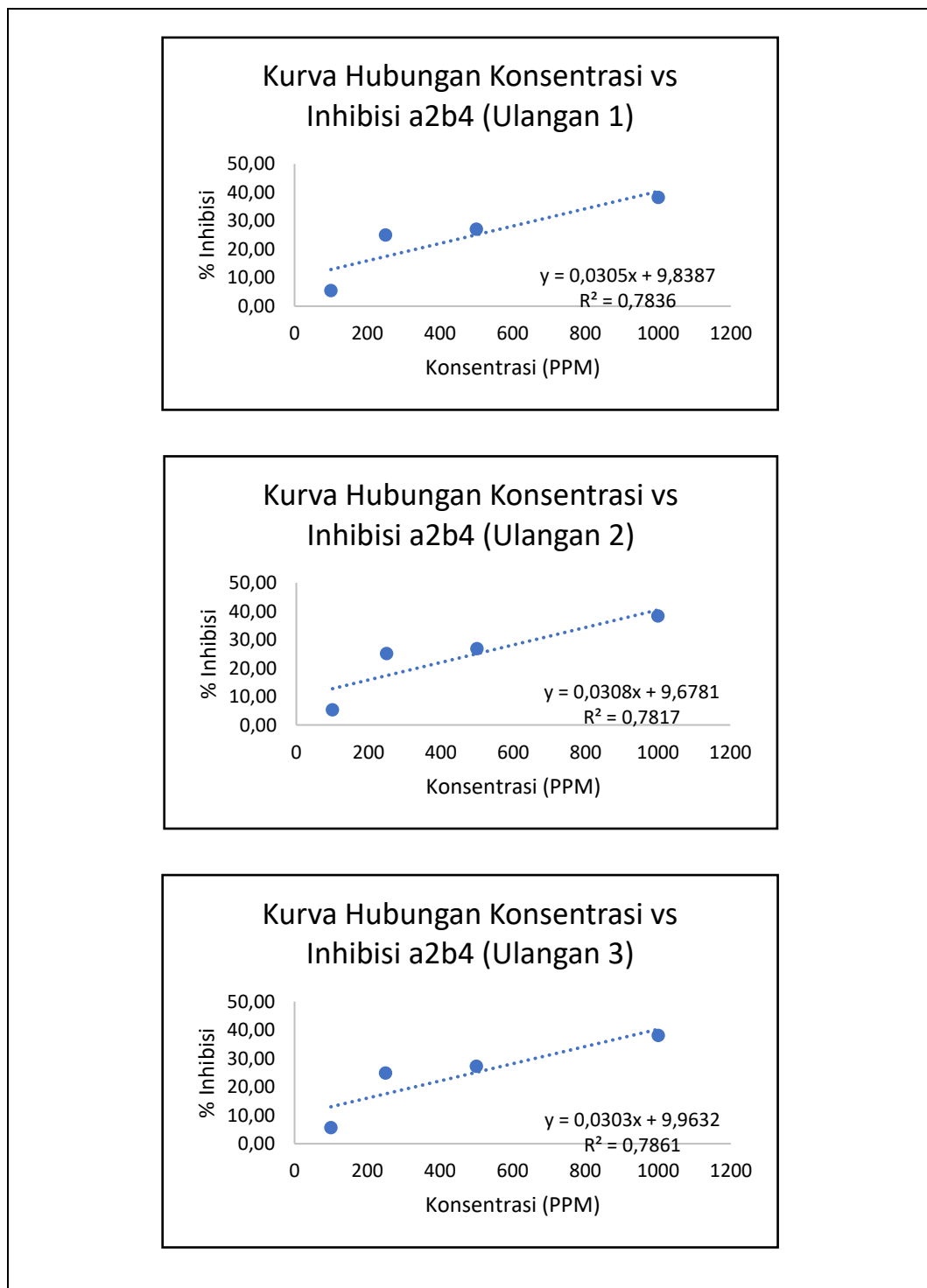
Konsentrasi (ppm)	Absorbansi				%	%	%
	Blanko	U1	U2	U3	Inhibisi 1	Inhibisi 2	Inhibisi 3
100	0,9766	0,8173	0,8161	0,8188	16,31	16,43	16,16
250	0,9766	0,7685	0,7709	0,7663	21,31	21,06	21,53
500	0,9766	0,7842	0,7831	0,7854	19,70	19,81	19,58
1000	0,9766	0,7800	0,7822	0,7781	20,13	19,91	20,33
IC50		13227,08	14406,82	12236,92	IC 50 = 13290,27 ± 1086,33		
Rata-rata		13290,27					
Stdev		1086,33					



Gambar 15. Kurva Hubungan Konsentrasi Ozon vs Inhibisi a2b3

Tabel 118. Data Perhitungan Aktivitas Antioksidan (% Inhibisi) Beras Putih
Germinasi (a2b4)

Konsentrasi (ppm)	Absorbansi				% Inhibisi 1	% Inhibisi 2	% Inhibisi 3
	Blan ko	U1	U2	U3			
100	0,9766	0,9229	0,9249	0,9211	5,50	5,29	5,68
250	0,9766	0,7322	0,7311	0,7338	25,03	25,14	24,86
500	0,9766	0,7121	0,7144	0,7102	27,08	26,85	27,28
1000	0,9766	0,6032	0,6019	0,6048	38,23	38,37	38,07
IC50		1316, 76	1309, 15	1321, 35	IC 50 = 1315,75 ± 6,16		
Rata-rata		1315,75					
Stdev		6,16					



Gambar 16. Kurva Hubungan Konsentrasi Ozon vs Inhibisi a2b4

Contoh Perhitungan:

% Inhibisi Perlakuan a1b1 ulangan 1 Konsentrasi 100 ppm

Diketahui:

Absorbansi Blanko = 0,9766

Absorbansi Sampel = 0,7575

$$\begin{aligned}\% \text{ Inhibisi} &= \frac{\text{Abs. blanko} - \text{Abs. sampel}}{\text{Abs. Blanko}} \times 100\% \\ &= \frac{0,9766 - 0,7575}{0,9766} \times 100\% = 15,84\%\end{aligned}$$

Aktivitas Antioksidan (IC₅₀) a1b1

Diketahui:

Persamaan regresi linear: $y = 0,0081x + 14,905$

IC₅₀ = a + bx

50 = 0,0081x + 14,905

50 – 14,905 = 0,0081x

x = 4332,72

Tabel 119. Data Hasil Analisis Respon Kimia Aktivitas Antioksidan Beras Putih Germinasi

Kondisi Beras (A) sebagai Petak Utama	Ulangan	Konsentrasi Ozon (B) sebagai Anak Petak				Jumlah	Rata-Rata
		0 ppm (b1)	2 ppm (b2)	4 ppm (b3)	6 ppm (b4)		
Gabah (a ₁)	1	4332,72	4084,94	4182,58	4487,83	17088,07	4272,02
	2	4058,41	4130,93	4189,55	4541,89	16920,78	4230,19
	3	4424,94	3998,31	4098,13	4436,53	16957,91	4239,48
Sub Total		12816,06	12214,19	12470,27	13466,24	50966,76	12741,69
Rata-Rata		4272,02	4071,40	4156,76	4488,75	16988,92	4247,23
Beras Pecah Kulit (a ₂)	1	2243,78	4011,65	13227,08	1316,76	20799,27	5199,82
	2	2206,78	3931,61	14406,82	1309,15	21854,36	5463,59
	3	2269,29	4095,18	12236,92	1321,35	19922,74	4980,69
Sub Total		6719,85	12038,44	39870,82	3947,26	62576,37	15644,09
Rata-Rata		2239,95	4012,81	13290,27	1315,75	20858,79	4972,83
Jumlah Total		19535,91	24252,62	52341,09	17413,51	113543,13	28385,78
Rata-Rata Total		3255,98	4042,10	8723,52	2902,25	18923,86	4730,96

Perhitungan:

Diketahui: a = 2, b = 4, r = 3

10. Faktor Koreksi (FK)

$$\begin{aligned} FK &= \frac{Y_{....}^2}{abr} \\ &= \frac{(113543,13)^2}{2 \times 4 \times 3} = 537168445,88 \end{aligned}$$

11. Jumlah Kuadrat Total (JKT)

$$\begin{aligned} JKT &= \sum_{i,j,k} Y_{i,j,k}^2 - FK \\ &= (4332,72)^2 + (4058,41)^2 + \dots + (1321,35)^2 - 537168445,88 \\ &= 280509337,47 \end{aligned}$$

12. Jumlah Kuadrat Petak Utama

$$\begin{aligned} JK (\text{Petak Utama}) &= \frac{\sum_{i,k} Y_{i,k}^2}{b} - FK \\ &= \frac{17088,07^2 + 16920,78^2 + \dots + 4980,69^2}{4} - 537168445,88 \\ &= 6087545,15 \end{aligned}$$

Jumlah Kuadrat Kelompok (JKK)

$$\begin{aligned} JKK &= \frac{\sum_k Y_{...k}^2}{ab} - FK \\ &= \frac{37887,34^2 + \dots + 36880,65^2}{3 \times 4} - 537168445,88 \\ &= 224612,64 \end{aligned}$$

13. Jumlah Kuadrat Faktor A

$$\begin{aligned} JK (A) &= \frac{\sum_i Y_{i1}^2}{rb} - FK \\ &= \frac{50966,76^2 + 62576,37^2}{3 \times 4} - 537168445,88 \\ &= 5615963,53 \end{aligned}$$

14. Jumlah Kuadrat Galat Faktor A

$$\begin{aligned} JK (\text{Galat a}) &= JK (\text{Petak Utama}) - JKK - JK(A) \\ &= 6087545,15 - 224612,64 - 5615963,53 \\ &= 246968,98 \end{aligned}$$

15. Jumlah Kuadrat Faktor B

$$\begin{aligned} JK (B) &= \frac{\sum_j Y_j^2}{ra} - FK \\ &= \frac{19535,91^2 + 24252,63^2 + \dots + 17413,50^2}{3 \times 2} - 537168445,88 \\ &= 131608485,5 \end{aligned}$$

16. Jumlah Kuadrat Interaksi A x B

$$\begin{aligned} JK (AB) &= \frac{\sum_{i,j} Y_{ij}^2}{r} - FK - JK (A) - JK (B) \\ &= \frac{12816,06^2 + 12214,19^2 + \dots + 3947,26^2}{3} - 537168445,88 - 5615963,53 - 131608485,5 \\ &= 140816747,6 \end{aligned}$$

17. Jumlah Kuadrat Galat Faktor B

$$\begin{aligned} JK (\text{Galat B}) &= JKT - JK (\text{Petak Utama}) - JK (B) - JK (AB) \\ &= 280509337,47 - 6087545,15 - 131608485,5 - 140816747,6 \\ &= 1996559,19 \end{aligned}$$

Tabel 120. Analisis Variasi (ANAVA) Analisis Respon Kimia Aktivitas Antioksidan Beras Putih Germinasi

Sumber Keragaman (SK)	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Total (KT)	Fhitung	Ftabel 5%	Notasi
Petak Utama						
Kelompok (K)	2	224612,64	112306,32	0,91	19,00	tn
Faktor A	1	5615963,53	5615963,53	45,48	18,51	*
Galat (A)	2	246968,98	123484,49			
Total	5	6087545,15	5851754,34			
Anak Petak						
Faktor B	3	131608485,50	43869495,2	263,67	3,49	*
Interaksi (AB)	3	140816747,60	46938915,9	282,12	3,49	*
Galat (B)	12	1996559,190	166379,93			
Total	18	274421792,30	90974791,0			

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel analisis variansi (ANAVA) dapat diketahui bahwa kondisi bahan (Faktor A), konsentrasi ozon (Faktor B), dan interaksi AXB berpengaruh terhadap Aktivitas Antioksidan beras putih germinasi. Perlakuan spesifik yang mempengaruhi Aktivitas Antioksidan Beras Putih Germinasi dapat diketahui dengan menggunakan uji lanjut LSD.

Uji Lanjut LSD Aktivitas Antioksidan Faktor AB

$$t_{\text{student } a(0,05; 12)} = 2,179$$

$$S_y = \sqrt{\frac{2 \text{ KT (Galat b)}}{r}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \times 166379,93}{3}} = 192,28$$

$$\text{LSD} = S_y \times t_{(0,05; 3)}$$

$$= 192,28 \times 2,179 = 725,646$$

Tabel 121. Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Aktivitas Antioksidan Beras Putih Germinasi

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	725,646	a1b2	4071,40	-				a
		a1b3	4156,76	85,36 ^{tn}	-			a
		a1b1	4272,02	200,62 ^{tn}	115,27 ^{tn}	-		a
		a1b4	4488,75	417,35 ^{tn}	331,99 ^{tn}	216,73 ^{tn}	-	a

Tabel 122. Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Aktivitas Antioksidan Beras Putih Germinasi

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	725,646	a2b4	1315,75	-				a
		a2b1	2239,95	924,19*	-			b
		a2b2	4012,81	2697,06*	1772,86*	-		c
		a2b3	13290,27	11974,52*	11050,33*	9277,46*	-	d

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Keterangan: Nilai yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji LSD.

Uji Lanjut LSD Kadar Pati Interaksi AB

$$t_{\text{student } a_{(0,05; 2)}} = 4,303$$

$$t_{\text{student } a_{(0,05; 12)}} = 2,179$$

$$\begin{aligned}
 t' &= \frac{(b-1)(KT \text{ Galat B})(t_b) + (KT \text{ Galat a})(t_a)}{(b-1)(KT \text{ Galat b}) + (KT \text{ Galat a})} \\
 &= \frac{(3)(166379,93)(2,179) + (123484,49)(4,303)}{(3)(166379,93) + (123484,49)} = 2,600
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_y &= \sqrt{\frac{2(b-1)KT(\text{Galat } b) + KT(\text{Galat } a)}{r \times b}} \\
 &= \sqrt{\frac{2(3)(166379,93) + (123484,49)}{3 \times 4}} = 322,135 \\
 \text{LSD} &= S_y \times t' \\
 &= 322,135 \times 2,600 = 837,560
 \end{aligned}$$

Tabel 123. Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Aktivitas Antioksidan Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
837,560		a2b1	2239,95	-				A
		a1b1	4272,02	2032,07*	-			B

Tabel 124. Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Aktivitas Antioksidan Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
837,560		a2b2	4012,81	-				A
		a1b2	4071,40	58,58 ^{tn}	-			A

Tabel 125. Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Aktivitas Antioksidan Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
837,560		a1b3	4156,76	-				A
		a2b3	13290,27	9133,52*	-			B

Tabel 126. Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Aktivitas Antioksidan Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	837,560	a2b4	1315,75	-				A
		a1b4	4488,75	3172,99	-			B

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Keterangan: Nilai yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji LSD.

Tabel 127. Dua Arah untuk Analisis Aktivitas Antioksidan Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32

Kondisi Beras (A)	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	4272,02 ± 190,65	B	4071,40 ± 67,34	A	4156,76 ± 50,89	A	4488,75 ± 52,69	B
	a		a		a		a	
a2 (Beras Pecah Kulit)	2239,95 ± 31,43	A	4012,81 ± 81,79	A	13290,27 ± 1086,33	B	1315,75 ± 6,16	A
	b		c		d		a	

Keterangan:

Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal).

Kesimpulan:

Pemberian berbagai konsentrasi ozon pada kondisi bahan gabah (a1) menghasilkan nilai aktivitas antioksidan yang tidak berbeda nyata di semua tingkat perlakuan dari b1 (0 ppm) hingga b4 (6 ppm). Sebaliknya, pada kondisi bahan beras pecah kulit (a2), aktivitas antioksidan meningkat nyata dari b1 (0 ppm) ke b2(2 ppm) dan melonjak meningkat nyata secara tajam pada b3 (4 ppm), namun kemudian mengalami penurunan nyata secara drastis pada perlakuan b4 (6 ppm). Pada konsentrasi ozon yang sama yaitu 0 ppm, 4 ppm, dan 6 ppm terjadi perbedaan nyata aktivitas antioksidan antara jenis bahan gabah (a1) terhadap beras pecah kulit (a2), sedangkan pada konsentrasi ozon 2 ppm tidak terjadi perbedaan nyata antara kedua jenis bahan tersebut.

Lampiran V. Data Hasil Analisis Respon Kimia Kadar Gula Pereduksi

Tabel 128. Data Perhitungan Kadar Gula Pereduksi Beras Putih Germinasi

Sampel	Ulangan	W Sampel (gram)	Vol. Blanko (ml)	Vol. Titration (ml)	Vol Tio 0,1 N (ml)	G Invert (mg)	Gula Reduksi (%)	Rata-Rata Gula Pereduksi
A1	B1	1	1,001	12,30	6,23	6,01	14,720	72,46
		2	1,005	12,30	6,30	5,93	14,535	
		3	1,003	12,30	6,38	5,86	14,350	
	B2	1	1,004	12,30	6,50	5,74	14,041	71,20
		2	1,000	12,30	6,40	5,84	14,288	
		3	1,002	12,30	6,33	5,91	14,473	
	B3	1	1,001	12,30	6,53	5,71	13,979	68,72
		2	1,005	12,30	6,68	5,56	13,608	
		3	1,005	12,30	6,60	5,64	13,793	
	B4	1	1,005	12,30	6,00	6,23	15,277	75,10
		2	1,001	12,30	6,18	6,06	14,844	
		3	1,000	12,30	6,10	6,13	15,030	
A2	B1	1	1,000	12,30	6,45	5,79	14,164	70,82

Sampel		Ulangan	W Sampel (gram)	Vol. Blanko (ml)	Vol. Titrasi (ml)	Vol Tio 0,1 N (ml)	G Invert (mg)	Gula Reduksi (%)	Rata-Rata Gula Pereduksi
		2	1,004	12,30	6,48	5,76	14,102	70,23	
		3	1,002	12,30	6,40	5,84	14,288	71,30	
	B2	1	1,002	12,30	6,43	5,81	14,226	70,99	70,86
		2	1,005	12,30	6,43	5,81	14,226	70,78	
		3	1,000	12,30	6,45	5,79	14,164	70,82	
	B3	1	1,008	12,30	6,33	5,91	14,473	71,79	71,81
		2	1,006	12,30	6,35	5,88	14,411	71,63	
		3	1,005	12,30	6,33	5,91	14,473	72,00	
	B4	1	1,000	12,30	6,50	5,74	14,041	70,21	69,89
		2	1,006	12,30	6,50	5,74	14,041	69,79	
		3	1,003	12,30	6,53	5,71	13,979	69,69	

Contoh Perhitungan:

Kadar Pati Perlakuan a1b1 ulangan 1

1. Perhitungan Pembakuan KIO_3

Diketahui:

$$\text{Berat } \text{KIO}_3 = 0,043 \text{ gram}$$

$$\text{BE } \text{KIO}_3 = 35,667$$

$$\text{Vol } \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 12,30 \text{ ml}$$

$$\begin{aligned}\text{Normalitas } \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 &= \frac{mg}{BE \times V} \\ &= \frac{0,043 \times 1000}{35,667 \times 12,30} = 0,0989 \text{ N}\end{aligned}$$

2. Perhitungan % Kadar Gula Pereduksi

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

$$= \frac{25,655 - 23,912}{25,655 - 25,921} \times 100\% = 13,17\%$$

$$\begin{aligned}\text{mg Glukosa} &= \left[\left(\frac{mg_2 - mg_1}{V_2 - V_1} \right) \times (\Delta V_{\text{tio}} - V_1) \right] + mg_1 \\ &= \left[\left(\frac{17,2 - 14,7}{7 - 6} \right) \times (6,01 - 6) \right] + 14,7 = 14,720 \text{ mg}\end{aligned}$$

$$\% \text{ Gula Pereduksi} = \frac{\text{mg Glukosa} \times FP}{\text{mg Sampel}} \times 100\%$$

$$= \frac{14,720 \text{ mg} \times 50}{1,001 \text{ gram}} \times 100\% = 73,53\%$$

Tabel 129. Data Hasil Analisis Respon Kimia Kadar Gula Pereduksi Beras Putih
Germinasi

Kondisi Beras (A) sebagai Petak Utama	Ulangan	Konsentrasi Ozon (B) sebagai Anak Petak				Jumlah	Rata- Rata
		0 ppm (b1)	2 ppm (b2)	4 ppm (b3)	6 ppm (b4)		
Gabah (a₁)	1	73,53	69,93	69,83	76,00	289,29	72,32
	2	72,31	71,44	67,7	74,15	285,6	71,40
	3	71,54	72,22	68,62	75,15	287,53	71,88
Sub Total		217,38	213,59	206,15	225,3	862,42	215,61
Rata-Rata		72,46	71,20	68,72	75,1	287,47	71,87
Beras Pecah Kulit (a₂)	1	70,82	70,99	71,79	70,21	283,81	70,95
	2	70,23	70,78	71,63	69,79	282,43	70,61
	3	71,3	70,82	72,00	69,69	283,81	70,95
Sub Total		212,35	212,59	215,42	209,69	850,05	212,51
Rata-Rata		70,78	70,86	71,81	69,90	283,35	71,10
Jumlah Total		429,73	426,18	421,57	434,99	1712,47	428,12
Rata-Rata Total		71,62	71,03	70,26	72,50	285,41	71,35

Perhitungan:

Diketahui: a = 2, b = 4, r = 3

1. Faktor Koreksi (FK)

$$\begin{aligned}
 FK &= \frac{Y_{....}^2}{abr} \\
 &= \frac{(1712,47)^2}{2 \times 4 \times 3} = 122189,73
 \end{aligned}$$

2. Jumlah Kuadrat Total (JKT)

$$JKT = \sum_{i,j,k} Y_{i,j,k}^2 - FK$$

$$= (75,53)^2 + (72,31)^2 + \dots + (69,69)^2 - 122189,73$$

$$= 84,936$$

3. Jumlah Kuadrat Petak Utama

$$\text{JK (Petak Utama)} = \frac{\sum_{i,k} Y_{i,k}^2}{b} - \text{FK}$$

$$= \frac{289,29^2 + 285,60^2 + \dots + 283,81^2}{4} - 122189,73$$

$$= 8,396$$

4. Jumlah Kuadrat Kelompok (JKK)

$$\text{JKK} = \frac{\sum_k Y_{\dots k}^2}{ab} - \text{FK}$$

$$= \frac{537,10^2 + \dots + 571,34^2}{3 \times 4} - 122189,73$$

$$= 1,657$$

5. Jumlah Kuadrat Faktor A

$$\text{JK (A)} = \frac{\sum_i Y_i^2}{rb} - \text{FK}$$

$$= \frac{862,42^2 + 850,05^2}{3 \times 4} - 122189,73$$

$$= 6,376$$

6. Jumlah Kuadrat Galat Faktor A

$$\text{JK (Galat a)} = \text{JK (Petak Utama)} - \text{JKK} - \text{JK(A)}$$

$$= 8,396 - 1,657 - 6,376$$

$$= 0,364$$

7. Jumlah Kuadrat Faktor B

$$\text{JK (B)} = \frac{\sum_j Y_j^2}{ra} - \text{FK}$$

$$= \frac{429,73^2 + 426,18^2 + \dots + 434,99^2}{3 \times 2} - 122189,73$$

$$= 16,076$$

8. Jumlah Kuadrat Interaksi A x B

$$\text{JK (AB)} = \frac{\sum_{i,j} Y_{ij}^2}{r} - \text{FK} - \text{JK (A)} - \text{JK (B)}$$

$$= \frac{217,38^2 + 213,59^2 + \dots + 209,69^2}{3} - 122189,73 - 6,376 - 16,076$$

$$= 52,942$$

9. Jumlah Kuadrat Galat Faktor B

$$\begin{aligned} \text{JK (Galat B)} &= \text{JKT} - \text{JK (Petak Utama)} - \text{JK (B)} - \text{JK (AB)} \\ &= 84,936 - 8,936 - 16,076 - 52,942 \\ &= 7,522 \end{aligned}$$

Tabel 130. Analisis Variasi (ANAVA) Analisis Respon Kimia Kadar Gula Pereduksi Beras Putih Germinasi

Sumber Keragaman (SK)	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Total (KT)	Fhitung	Ftabel 5%	Notasi
Petak Utama						
Kelompok (K)	2	1,657	0,828	4,55	19,00	tn
Faktor A	1	6,376	6,376	35,03	18,51	*
Galat (A)	2	0,364	0,182			
Total	5	8,396	7,386			
Anak Petak						
Faktor B	3	16,076	5,359	8,549	3,49	*
Interaksi (AB)	3	52,942	17,647	28,153	3,49	*
Galat (B)	12	7,522	0,627			
Total	18	76,540	23,633			

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Kesimpulan:

Berdasarkan tabel analisis variansi (ANAVA) dapat diketahui bahwa kondisi bahan (Faktor A), konsentrasi ozon (Faktor B), dan interaksi AXB berpengaruh terhadap Kadar Gula Pereduksi beras putih germinasi. Perlakuan spesifik yang mempengaruhi Kadar Pati Beras Putih Germinasi dapat diketahui dengan menggunakan uji lanjut LSD.

Uji Lanjut LSD Kadar Gula Pereduksi Faktor AB

$$t_{\text{student } a(0,05; 12)} = 2,179$$

$$S_y = \sqrt{\frac{2 \text{ KT (Galat b)}}{r}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \times 0,627}{3}} = 0,646$$

$$\text{LSD} = S_y \times t_{(0,05; 3)}$$

$$= 0,646 \times 2,179 = 1,408$$

Tabel 131. Uji Lanjut LSD A1 sama dengan B beda untuk Kadar Gula Pereduksi Beras Putih Germinasi

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	1,408	a1b3	68,72	-				a
		a1b2	71,20	2,48	-			b
		a1b1	72,46	3,74	1,26	-		b
		a1b4	75,1	6,38	3,90	2,64	-	c

Tabel 132. Uji Lanjut LSD A2 sama dengan B beda untuk Kadar Gula Pereduksi Beras Putih Germinasi

A1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	1,408	a2b4	69,90	-				a
		a2b1	70,78	0,89	-			ab
		a2b2	70,86	0,97	0,08	-		ab
		a2b3	71,81	1,91	1,02	0,94	-	b

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Keterangan: Nilai yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji LSD.

Uji Lanjut LSD Kadar Gula Pereduksi Interaksi AB

$$t_{\text{student a}} (0,05 ; 2) = 4,303$$

$$t_{\text{student a}} (0,05 ; 12) = 2,179$$

$$t' = \frac{(b-1)(KT \text{ Galat B})(t_b) + (KT \text{ Galat a})(t_a)}{(b-1)(KT \text{ Galat b}) + (KT \text{ Galat a})}$$

$$= \frac{(3)(0,627)(2,179) + (0,183)(4,303)}{(3)(0,627) + (0,183)} = 2,366$$

$$S_y = \sqrt{\frac{2(b-1)KT(\text{Galat b}) + KT(\text{Galat a})}{r \times b}}$$

$$= \sqrt{\frac{2(3)(0,627) + (0,83)}{3 \times 4}} = 0,586$$

$$LSD = S_y \times t'$$

$$= 0,586 \times 2,366 = 1,387$$

Tabel 133. Uji Lanjut LSD B1 sama dengan A beda untuk Kadar Gula Pereduksi Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
1,387		a2b1	70,78	-				A
		a1b1	72,46	1,68*	-			B

Tabel 134. Uji Lanjut LSD B2 sama dengan A beda untuk Kadar Gula Pereduksi Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
1,387		a2b2	70,86	-				A
		a1b2	71,20	0,33 ^{tn}	-			A

Tabel 135. Uji Lanjut LSD B3 sama dengan A beda untuk Kadar Gula Pereduksi Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	1,387	a1b3	68,72	-				A
		a2b3	71,81	3,09*	-			B

Tabel 136. Uji Lanjut LSD B4 sama dengan A beda untuk Kadar Gula Pereduksi Beras Putih Germinasi

B1 yang sama	LSD	Perlakuan	Rata-Rata Perlakuan	Perlakuan				Notasi
				1	2	3	4	
	1,387	a2b4	69,90	-				A
		a1b4	75,10	5,20*	-			B

Keterangan: * = Berpengaruh

tn = Tidak Berpengaruh

Keterangan: Nilai yang ditandai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji LSD.

Tabel 137. Dua Arah untuk Analisis Kadar Gula Pereduksi Beras Putih Germinasi Varietas Inpari 32

Kondisi Beras (A)	Konsentrasi Ozon (B) (ppm)							
	b1 (0 ppm)		b2 (2ppm)		b3 (4 ppm)		b4 (6 ppm)	
a1 (Gabah)	72,46 ± 1,00	B	71,20 ± 1,16	A	68,72 ± 1,07	A	75,10 ± 0,93	B
	b		b		a		c	
a2 (Beras Pecah Kulit)	70,78 ± 0,54	A	70,86 ± 0,11	A	71,81 ± 0,19	B	69,90 ± 0,28	A
	ab		ab		b		a	

Keterangan: Setiap nilai rata-rata yang diikuti huruf berbeda menyatakan perbedaan nyata menurut uji LSD pada taraf nyata 5% (huruf kecil dibaca horizontal, sedangkan huruf besar dibaca vertikal).

Kesimpulan:

Semakin tinggi konsentrasi ozon pada kondisi bahan gabah (a1), kadar gula pereduksi tidak berbeda nyata antara b1 (0 ppm) terhadap b2 (2 ppm), namun terjadi penurunan nyata pada b3 (4 ppm) dan peningkatan nyata pada b4 (6 ppm), sedangkan pada kondisi bahan beras pecah kulit (a2) kadar gula pereduksi tidak berbeda nyata antara b1, b2, b3, namun terjadi penurunan nyata pada b4 (6 ppm) terhadap b3 (4 ppm).

Pada konsentrasi ozon yang sama yaitu 0 ppm, 4 ppm, dan 6 ppm terjadi perbedaan nyata kadar gula pereduksi antara jenis bahan gabah (a1) terhadap beras pecah kulit (a2), sedangkan pada konsentrasi ozon 2 ppm tidak terjadi perbedaan nyata antara kedua jenis bahan tersebut.

Lampiran W. Dokumentasi Pembuatan Produk

Proses Pengozonan Sampel Beras	
	
Penimbangan serta Perendaman Sampel Beras	
	
Proses Germinasi Sampel Beras	
	

Proses Pengeringan Sampel Beras



Penyosohan Sampel Gabah (a1)

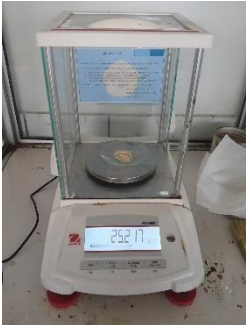


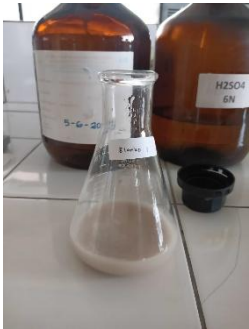
Penghalusan dan Pengayakan Sampel Beras



Lampiran X. Dokumentasi Analisis Produk

Uji Densitas Kamba		
		
Uji % Rendemen		
		
Uji % Germinasi		
		

Uji Kadar Air		
		
Uji Kadar Pati		
		
		
		

	
	
Uji Aktivitas Antioksidan	
