

**KARAKTERISTIK SORPSI AIR BERAS SOSOH VAR IETAS
INPARI 32 PADA ZONA AKTIVITAS AIR PENYIMPANAN
DAN IMPLIKASINYA TERHADAP ESTIMASI KADAR AIR
KESETIMBANGAN UNTUK PENYIMPANAN DI GUDANG
BULOG**

TUGAS AKHIR

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

**Oleh
Muhammad Virgie Ambiya Munajat
223020005**



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

ABSTRAK

KARAKTERISTIK SORPSI AIR BERAS SOSOH VARIETAS INPARI 32 PADA ZONA AKTIVITAS AIR PENYIMPANAN DAN IMPLIKASINYA TERHADAP ESTIMASI KADAR AIR KESETIMBANGAN UNTUK PENYIMPANAN DI GUDANG BULOG

Oleh
Muhammad Virgie Ambiya Munajat
NPM: 223020005
(Program Studi Teknologi Pangan)

Beras merupakan bahan pangan higroskopis yang dapat mengalami perubahan kadar air selama penyimpanan akibat interaksi dengan kelembapan udara di sekitarnya. Perubahan tersebut memengaruhi mutu fisik, kimia, dan mikrobiologis sehingga diperlukan informasi mengenai karakteristik sorpsi air untuk mendukung pengelolaan penyimpanan. Hubungan antara aktivitas air (*water activity*/aw) dan kadar air kesetimbangan (*Equilibrium Moisture Content*/EMC) dijelaskan melalui kurva *Moisture Sorption Isotherm* (MSI). Penelitian ini bertujuan memodelkan kurva Absorpsi dan desorpsi sorpsi air beras sosoh varietas Inpari 32 pada zona aktivitas air penyimpanan (aw 0,50–0,80) suhu 30°C menggunakan metode langsung berbasis *aw meter*, menentukan model matematika terbaik antara *Guggenheim–Anderson–de Boer* (GAB) dan Oswin berdasarkan nilai koefisien determinasi (R^2) dan *Mean Relative Deviation* (MRD), mengestimasi EMC pada rentang kelembapan relatif (RH) aktual gudang BULOG, serta mengevaluasi karakteristik histeresis. Data hasil pengukuran dimodelkan menggunakan persamaan GAB dan Oswin, kemudian dievaluasi berdasarkan nilai R^2 dan MRD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kurva Absorpsi dan desorpsi mengikuti pola isotherm sorpsi sigmoid tipe II dengan fenomena histeresis. Model Oswin dipilih sebagai model terbaik berdasarkan evaluasi nilai R^2 , MRD, dan kewajaran parameter fisik, dengan nilai R^2 sebesar 0,9504 dan MRD sebesar 6,24% pada Absorpsi, serta R^2 sebesar 0,9707 dan MRD sebesar 6,55% pada desorpsi. Estimasi EMC menunjukkan bahwa RH 70% masih berada pada zona aman penyimpanan, RH 75% merupakan ambang kewaspadaan, sedangkan RH 80% telah melampaui batas aman kadar air menurut SNI 6128:2020 sehingga berpotensi meningkatkan risiko penurunan mutu beras selama penyimpanan. Nilai EMC lintasan desorpsi lebih tinggi dibandingkan Absorpsi dengan Δ EMC sebesar 0,60–3,45% bk, menunjukkan pengaruh riwayat kadar air terhadap kadar air kesetimbangan.

Kata kunci: *Moisture Sorption Isotherm*, beras sosoh Inpari 32, aktivitas air, *Equilibrium Moisture Content*, Oswin, histeresis.

ABSTRACT

Moisture Sorption Characteristics of Inpari 32 Milled Rice within the Storage Water Activity Range and Their Implications for Equilibrium Moisture Content Estimation in BULOG Warehouse Storage

By

Muhammad Virgie Ambiya Munajat

NIM: 223020005

(Department of Food Technology)

Rice is a hygroscopic food material that undergoes changes in moisture content during storage due to its interaction with the surrounding air humidity. These changes affect its physical, chemical, and microbiological quality, making information on moisture sorption characteristics essential for proper storage management. The relationship between water activity (a_w) and equilibrium moisture content (EMC) is described by the Moisture Sorption Isotherm (MSI). This study aimed to model the absorption and desorption moisture sorption isotherms of milled Inpari 32 rice within the storage water activity range (a_w 0.50–0.80) at 30°C using a direct a_w meter-based method, determine the best mathematical model between the Guggenheim–Anderson–de Boer (GAB) and Oswin models based on the coefficient of determination (R^2) and Mean Relative Deviation (MRD), estimate EMC under the actual relative humidity (RH) conditions of BULOG warehouses, and evaluate the hysteresis characteristics. Experimental data were fitted using the GAB and Oswin equations and evaluated based on R^2 and MRD values. The results showed that both absorption and desorption isotherms exhibited a Type II sigmoid pattern with a distinct hysteresis phenomenon. The Oswin model was identified as the most suitable model based on R^2 , MRD, and the physical plausibility of its parameters, yielding an R^2 of 0.9504 and an MRD of 6.24% for absorption, and an R^2 of 0.9707 and an MRD of 6.55% for desorption. The estimated EMC indicated that RH 70% remained within the safe storage zone, RH 75% represented a cautionary threshold, whereas RH 80% exceeded the safe moisture limit specified in SNI 6128:2020, thereby increasing the risk of rice quality deterioration during storage. The EMC values along the desorption path were consistently higher than those along the absorption path, with Δ EMC ranging from 0.60 to 3.45% dry basis, indicating that the moisture history of the material influences its equilibrium moisture content.

Keywords: moisture sorption isotherm, milled rice Inpari 32, activity water, equilibrium moisture content, Oswin model, Histeresis.

**KARAKTERISTIK SORPSI AIR BERAS SOSOH VARIETAS
INPARI 32 PADA ZONA AKTIVITAS AIR PENYIMPANAN
DAN IMPLIKASINYA TERHADAP ESTIMASI KADAR AIR
KESETIMBANGAN UNTUK PENYIMPANAN DI GUDANG
BULOG**

Oleh:

Muhammad Virgie Ambiya Munajat

NPM: 223020005

(Program Studi Teknologi Pangan)

Fakultas Teknik

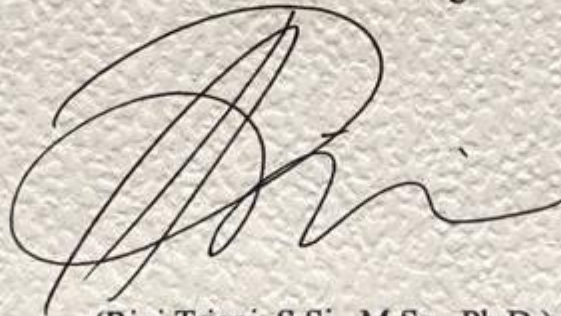
Universitas Pasundan

Menyetujui

Tim Pembimbing

Tanggal 13 - 09 - 2026

Dosen Pembimbing

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Rini Triani', written in a cursive style.

(Rini Triani, S.Si., M.Sc., Ph.D.)

**KARAKTERISTIK SORPSI AIR BERAS SOSOH VARIETAS
INPARI 32 PADA ZONA AKTIVITAS AIR PENYIMPANAN
DAN IMPLIKASINYA TERHADAP ESTIMASI KADAR AIR
KESETIMBANGAN UNTUK PENYIMPANAN DI GUDANG
BULOG**

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

**Oleh:
Muhammad Virgie Ambiya Munajat
NPM: 223020005
(Program Studi Teknologi Pangan)**

**Fakultas Teknik
Universitas Pasundan**

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



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

PEDOMAN PENGGUNAAN TUGAS AKHIR

Tugas Akhir yang tidak dipublikasikan terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Fakultas dan Universitas, dan terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada penulisan 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 di tulis dalam Bahasa Indonesia sebagai berikut:

Munajat, M. V. A. (2026). Karakteristik Sorpsi Air Beras Sosoh Varietas Inpari 32 Pada Zona Aktivitas Air Penyimpanan dan Implikasinya Terhadap Estimasi Kadar Air Kesetimbangan Untuk Penyimpanan di Gudang BULOG, Tugas Akhir Program Sarjana, Universitas Pasundan.

Dan dalam Bahasa Inggris sebagai berikut:

Munajat, M. V. A. (2026). *Moisture Sorption Characteristics of Inpari 32 Milled Rice within the Storage Water Activity Range and Their Implications for Equilibrium Moisture Content Estimation in BULOG Warehouse Storage*, Bachelor's Thesis, Universitas Pasundan.

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

“Untuk Ayah dan Ibuku, Terima kasih atas segala doa, kasih sayang, pengorbanan, dukungan, dan kepercayaan yang selalu mengiringi setiap langkah penulis. Semoga karya ini menjadi salah satu bentuk bakti dan kebanggaan untuk Ayah dan Ibu.”

"Kepada Dosen Pembimbing Utama saya, Rini Triani, S.Si., M.Sc., Ph.D. yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan arahan, bimbingan, motivasi, serta ilmu yang sangat berharga selama proses penelitian dan penyusunan skripsi ini. Terima kasih atas kesabaran dalam membimbing, memberikan masukan, serta kepercayaan yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik."

"Untuk teman-teman seperjuangan, Terima kasih atas kebersamaan, bantuan, dukungan, serta semangat yang telah diberikan selama masa perkuliahan hingga penyelesaian skripsi ini."

"Untuk Diri Saya Sendiri, Terima kasih karena telah mampu bertahan, berjuang, dan tidak menyerah hingga akhirnya mampu menyelesaikan perjalanan ini. Semoga pencapaian ini menjadi awal dari langkah-langkah baik berikutnya."

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah S.W.T karena berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“KARAKTERISTIK SORPSI AIR BERAS SOSOH VARIETAS INPARI 32 PADA ZONA AKTIVITAS AIR PENYIMPANAN DAN IMPLIKASINYA TERHADAP ESTIMASI KADAR AIR KESETIMBANGAN UNTUK PENYIMPANAN DI GUDANG BULOG”** dengan sebaik-baiknya.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Program Studi Teknologi Pangan, Universitas Pasundan Bandung.

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

1. Rini Triani, S.Si., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah membimbing dan memberikan ilmu yang bermanfaat bagi penulis selama penulisan Tugas Akhir.
2. Dr. Ira Endah Rohima, S.T., M.Si. dan Dr. Ir. Dian Risdianto, M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran, masukan, dan ilmu yang bermanfaat bagi penulis selama penulisan Tugas Akhir.
3. Jaka Rukmana, S.T., M.T. selaku ketua Program Studi Teknologi Pangan Fakultas Teknik Universitas Pasundan.
4. Rizal Maulana Ghaffar, S.T., M.T. selaku koordinator tugas akhir Program Studi Teknologi Pangan Fakultas Teknik Universitas Pasundan.
5. Seluruh staf dosen pengajar prodi Teknologi Pangan Universitas Pasundan yang telah banyak memberikan ilmu pengetahuan kepada penulis.
6. Kedua orang tua Ikhwan Munajat, S.E. dan Imas Masliah serta Adik Khalfani Radinka Aulia Munajat yang selalu memberi dukungan kepada

penulis, baik berupa doa, materi, dan motivasi selama penulisan Tugas Akhir ini.

7. Sahabat Kost Berkah Muhammad Pandu Munaadiyullah Asy-Syauqi, Azriel David Budiman, Leonardus Calvin Wicaksana, Dandy Tiara Putra, Dani Muhamad Sagala, Renata Rifa Danisworo, Gilang Ramadhan Saputra, dan Ismail Ahmad Danial Nur Anbiya yang telah kebersamai penulis dalam berbagai keadaan di perkuliahan.
8. Olivia Yulie Damayanti yang telah kebersamai penulis dan memberikan semangat selama penulisan Tugas Akhir.
9. Teman-teman ‘Remaja Cibenda’ Nawwal, Rival, Yusef, Yuda, Wildan, Ivan, Nadhif, Robi, Ikhsan, dan Raja yang selalu mendukung penulis.

Akhir kata, penulis menyadari masih terdapat kekurangan dalam Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, penulis berharap kritik dan saran yang membangun dari para pembaca guna perbaikan di masa yang akan datang. Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat khususnya bagi penulis dan umumnya bagi semua pihak yang membacanya.

Penulis

(Muhammad Virgie Ambiya Munajat)

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
<i>ABSTRACT</i>	ii
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG	xv
Bab I Pendahuluan.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	4
1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Manfaat Penelitian	6
1.5 Kerangka Pemikiran.....	6
1.6 Hipotesis Penelitian	13
1.7 Waktu dan Tempat Penelitian.....	13
Bab II Tinjauan Pustaka	14
2.1 Beras Inpari 32 HDB	14
2.2 Sifat Higroskopis Bahan Pangan Berbasis Pati	18
2.3 Aktivitas Air	20
2.4 <i>Equilibrium Moisture Content</i> (EMC).....	21
2.5 Proses Sorpsi Air.....	22
2.5.1 Absorpsi	23
2.5.2 Desorpsi	24
2.6 <i>Moisture Sorption Isotherm</i> (MSI)	25
2.7 Fenomena Histeresis	27
2.8 Model Matematika MSI.....	29
2.8.1 Model GAB (<i>Guggenheim-Anderson-de Boer</i>).....	29
2.8.2 Model Oswin.....	30

2.8.3 Evaluasi Kesesuaian Model	30
2.9 Standar Mutu dan Kondisi Penyimpanan Beras di Gudang BULOG31	
Bab III Metodologi Penelitian.....	33
3.1 Bahan dan Alat.....	33
3.1.1 Bahan – Bahan Penelitian	33
3.1.2 Alat Penelitian.....	33
3.2 Metode Penelitian	33
3.2.1 Rancangan Perlakuan.....	33
3.2.2 Rancangan Percobaan	34
3.2.3 Rancangan Analisis.....	34
3.2.4 Rancangan Respon.....	34
3.3 Prosedur Penelitian	35
3.3.1 Analisis Kimia Beras Inpari 32	35
3.3.1.1 Analisis Kadar Air	35
3.3.1.2 Analisis Aktivitas Air.....	37
3.3.2 Pengkondisian Kadar Air Beras Inpari 32	39
3.3.2.1 Pengkondisian Sampel Absorpsi	39
3.3.2.2 Pengkondisian Sampel Desorpsi	41
3.4 Analisis Data	43
3.4.1 Perhitungan <i>Equilibrium Moisture Content</i> (EMC).....	43
3.4.2 Penyusunan Kurva <i>Moisture Sorption Isotherm</i> (MSI)	43
3.4.3 Pemodelan <i>Moisture Sorption Isotherm</i> (MSI).....	44
3.4.3.1 Model Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB)	45
3.4.3.2 Model Oswin	45
3.4.4 Evaluasi Model <i>Moisture Sorption Isotherm</i> (MSI)	46
3.4.4.1 Koefisien Determinasi (R^2)	46
3.4.4.2 Mean Relative Deviation (MRD)	47
3.4.5 Analisis Histeresis Sorpsi Air	47
3.5 Jadwal Pelaksanaan Penelitian.....	49
Bab IV Hasil dan Pembahasan	50
4.1 Karakteristik Kimia Beras Inpari 32	50
4.1.1 Kadar Air Beras Inpari 32	50
4.1.2 Aktivitas Air Beras Inpari 32	51

4.2 Pengkondisian Kadar Air Beras Inpari 32	52
4.2.1 Pengkondisian Sampel Absorpsi.....	52
4.2.2 Pengkondisian Sampel Desorpsi.....	54
4.3 Penentuan <i>Equilibrium Moisture Content</i> (EMC)	56
4.3.1 Penentuan <i>Equilibrium Moisture Content</i> (EMC) Absorpsi...	56
4.3.2 Penentuan <i>Equilibrium Moisture Content</i> (EMC) Desorpsi...	58
4.4 Karakteristik Kurva Sorpsi Air Beras Inpari 32.....	59
4.4.1 Karakteristik Sorpsi Air pada Proses Absorpsi	59
4.4.2 Karakteristik Sorpsi Air Pada Proses Desorpsi.....	61
4.5 Pemodelan <i>Moisture Sorption Isotherm</i> (MSI).....	63
4.5.1 Hasil Pemodelan GAB.....	63
4.5.2 Hasil Pemodelan Oswin.....	65
4.6 Evaluasi Model Matematis <i>Moisture Sorption Isotherm</i>	67
4.6.1 Evaluasi Model Berdasarkan Nilai R^2 dan MRD.....	67
4.6.2 Pemilihan Model Matematis Terbaik.....	69
4.6.3 Estimasi <i>Equilibrium Moisture Content</i> (EMC) Menggunakan Model Terbaik	72
4.7 Histeresis Kurva <i>Moisture Sorption Isotherm</i> (MSI).....	75
4.8 Implikasi <i>Moisture Sorption Isotherm</i> terhadap Kondisi Penyimpanan Beras	79
4.8.1 Analisis EMC pada RH 70%	80
4.8.2 Analisis EMC pada RH 75%	81
4.8.3 Analisis EMC pada RH 80%	82
4.8.4 Implikasi terhadap Sistem Penyimpanan Beras di Gudang BULOG	83
Bab V Kesimpulan dan Saran.....	85
5.1 Kesimpulan	85
5.2 Saran	86
DAFTAR PUSTAKA.....	87
LAMPIRAN.....	92

DAFTAR TABEL

Tabel II.1 Karakteristik Beras Inpari 32 HDB	15
Tabel III.1. Jadwal Penelitian.....	49
Tabel IV.1. Karakteristik Utama Beras Inpari 32	50
Tabel IV.2 Hasil Pengkondisian Sampel Absorpsi	53
Tabel IV.3 Hasil Pengkondisian Sampel Desorpsi	55
Tabel IV.4 Hasil Perhitungan EMC Sampel Absorpsi.....	56
Tabel IV.5 Hasil Perhitungan EMC Sampel Desorpsi.....	58
Tabel IV.6 Parameter Model GAB Pada Proses Absorpsi dan Desorpsi.....	63
Tabel IV.7 Parameter Model Oswin Pada Proses Absorpsi dan Desorpsi.....	65
Tabel IV.8 Hasil evaluasi model GAB dan Oswin	67
Tabel IV.9 Estimasi <i>Equilibrium Moisture Content</i> (EMC) Menggunakan Model Oswin	72
Tabel IV.10 Hasil Perhitungan Histeresis Beras Sosoh Varietas Inpari 32	76
Tabel IV.11 Estimasi EMC kritis beras Inpari 32 pada rentang RH/a _w aktual gudang BULOG berdasarkan model isoterm Oswin.	79

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1 Beras Sosoh Inpari 32.....	18
Gambar II.2 Contoh Kurva Absorpsi pada Isoterm Sorpsi Air	24
Gambar II.3 Contoh Kurva Desorpsi pada Isoterm Sorpsi Air	25
Gambar II.4 Contoh Kurva Histeresis pada Isoterm Sorpsi Air.....	28
Gambar III.1. Prosedur Analisis Kimia Kadar Air Beras.....	36
Gambar III.2. Prosedur Analisis Kimia Aktivitas Air Beras	38
Gambar III.3 Prosedur Pengkondisian Sampel Absorpsi	40
Gambar III.4 Prosedur Pengkondisian Sampel Desorpsi	42
Gambar IV.1 Kurva Sorpsi Air Inpari 32 pada Proses Absorpsi	60
Gambar IV.2 Kurva Sorpsi Air Inpari 32 pada Proses Desorpsi	62
Gambar IV.3 Kurva Absorpsi Hasil Model Oswin.....	73
Gambar IV.4. Kurva Desorpsi Hasil Model Oswin.....	74
Gambar IV.5 Kurva Histeresis MSI Beras Inpari 32.....	77

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A. Perhitungan Pengkondisian Sampel.....	92
Lampiran B. Data Hasil Perhitungan EMC Aktual.....	93
Lampiran C. Hasil Pemodelan Matematis MSI pada aplikasi OriginPro	101
Lampiran D. Perhitungan Nilai MRD	102
Lampiran E. Perhitungan Estimasi EMC Menggunakan Model Terbaik.....	104
Lampiran F. Hasil Pemodelan Oswin pada aplikasi OriginPro untuk data a_w yang ditentukan.....	107
Lampiran G. Perhitungan Histeresis	107
Lampiran H. Dokumentasi Analisis Kimia Beras Inpari 32	111
Lampiran I. Dokumentasi Pengkondisian Beras Inpari 32 (Absorpsi)	112
Lampiran J. Dokumentasi Pengkondisian Beras Inpari 32 (Desorpsi)	114
Lampiran K. Dokumentasi Hasil Sampel Absorpsi	115
Lampiran L. Dokumentasi Hasil Sampel Desorpsi	119
Lampiran M. SNI 6128:2020 Beras.	122

DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

SINGKATAN	Nama	Pemakaian pertama kali pada halaman
BULOG	Badan Urusan Logistik	1
EMC	<i>Equilibrium Moisture Content</i> (Kadar Air Kesetimbangan)	2
ERH	<i>Equilibrium Relative Humidity</i> (Kelembapan Relatif Kesetimbangan)	7
EWS	<i>Early Warning System</i>	6
GAB	<i>Guggenheim-Anderson-de Boer</i>	5
GMT	<i>Grain Moisture Tester</i>	35
HDB	Hawar Daun Bakteri	3
MC	<i>Moisture Content</i> (Kadar Air)	1
MRD	<i>Mean Relative Deviation</i>	5
MSI	<i>Moisture Sorption Isotherm</i>	2
RH	<i>Relative Humidity</i> (Kelembapan Relatif)	3
SSE	<i>Sum of Squared Error</i>	45

LAMBANG

a	Konstanta Model Oswin (pertama)	45
b	Konstanta Model Oswin (kedua)	45
C	Konstanta <i>Guggenheim-Anderson-de Boer</i>	45
ΔEMC	Selisih EMC Desorpsi dan Absorpsi pada a_w yang sama (%)	48
K	Konstanta Multilayer pada model GAB	45
$^{\circ}C$	Derajat Celcius	3
M	Kadar Air Kesetimbangan hasil prediksi model	45
M_0/X_m	Kadar air monolayer pada model GAB	45
n	Jumlah data pengamatan	46
%	Persen	1
<	Kurang dari	20
>	Lebih dari	7
$\pm$	Kurang lebih	1

Bab I Pendahuluan

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

1.1 Latar Belakang

Beras merupakan komoditas pangan strategis yang memiliki peran krusial dalam sistem ketahanan pangan nasional Indonesia. Data Badan Pusat Statistik (BPS, 2023) menunjukkan bahwa konsumsi beras per kapita mencapai sekitar 94,9 kg per tahun atau setara dengan ± 260 g per orang per hari, menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara dengan tingkat konsumsi beras per kapita tertinggi secara global. Dengan populasi lebih dari 278 juta jiwa pada tahun 2023 (BPS, 2023), total kebutuhan beras nasional diperkirakan melebihi 30 juta ton per tahun. Kondisi ini menuntut tersedianya cadangan beras yang tidak hanya memadai secara kuantitatif, tetapi juga terjaga kualitasnya hingga tahap distribusi akhir.

Dalam konteks pengelolaan cadangan pangan pemerintah, Perum Bulog berperan sebagai institusi utama dalam penyimpanan dan distribusi beras skala besar melalui jaringan gudang nasional. Salah satu tantangan teknis utama dalam sistem penyimpanan tersebut adalah pengendalian kadar air (MC) beras selama periode penyimpanan.

Kadar air merupakan parameter mutu kritis karena sebagian besar mekanisme degradasi fisik, kimia, dan biologis pada beras berkorelasi langsung dengan kandungan air dalam bahan (Syarief & Halid, 1993). Kadar air yang melebihi batas aman meningkatkan fraksi air bebas yang mendukung aktivitas biologis, termasuk pertumbuhan kapang dan perkembangan hama gudang. Sebagai contoh, *Sitophilus zeamais* menunjukkan laju perkembangan yang lebih tinggi dan tingkat kerusakan yang lebih besar pada beras dengan kadar air 14% dibandingkan 12% (Pramahsari Putri dkk., 2023). Sebaliknya, kadar air yang terlalu rendah dapat menyebabkan

peningkatan kerapuhan butir dan penurunan rendemen beras kepala akibat retakan selama penanganan (Cnossen & Siebenmorgen, 2000). Standar Nasional Indonesia SNI 6128:2020 menetapkan kadar air maksimum beras sebesar 14% (basis basah) sebagai batas mutu yang diterima dalam sistem penyimpanan Bulog (BSN, 2020). Sebagai salah satu persyaratan mutu beras yang diterima di gudang BULOG. Akan tetapi, nilai kadar air tersebut pada dasarnya merupakan batas praktis yang bersifat umum dan belum mempertimbangkan kondisi kesetimbangan antara beras dengan lingkungan penyimpanan maupun karakteristik higroskopis masing-masing varietas beras.

Kadar air merupakan salah satu parameter yang umum digunakan untuk menilai mutu beras selama penyimpanan. Namun, parameter tersebut hanya mencerminkan kandungan air bahan pada saat pengukuran dan belum menggambarkan perubahan yang dapat terjadi selama penyimpanan. Sebagai bahan yang bersifat higroskopis, beras akan terus berinteraksi dengan udara di sekitarnya melalui proses penyerapan dan pelepasan uap air hingga mencapai kondisi kesetimbangan. Oleh karena itu, *Equilibrium Moisture Content* (EMC) lebih representatif dalam menggambarkan kondisi penyimpanan karena menunjukkan kadar air kesetimbangan yang dicapai pada suhu dan kelembapan relatif tertentu. Nilai EMC memberikan informasi mengenai kecenderungan perubahan kadar air beras selama penyimpanan, sehingga dapat dijadikan dasar dalam menetapkan kadar air penyimpanan yang aman sesuai dengan kondisi lingkungan gudang.

Hubungan antara aktivitas air (a_w) dan *Equilibrium Moisture Content* (EMC) pada suhu tertentu dapat dijelaskan melalui konsep *Moisture Sorption Isotherm* (MSI). Kurva MSI merepresentasikan hubungan antara aktivitas air dengan kadar air kesetimbangan suatu bahan pangan, sehingga mampu menggambarkan karakteristik higroskopis bahan terhadap perubahan kondisi lingkungan (Van den Berg & Bruin, 1981). Melalui kurva tersebut, nilai EMC pada berbagai tingkat aktivitas air dapat diestimasi untuk memprediksi perilaku bahan selama penyimpanan. Dalam penelitian ini, MSI digunakan sebagai pendekatan ilmiah

untuk mengkarakterisasi perilaku sorpsi air pada beras sosoh varietas Inpari 32 dalam rentang aktivitas air yang relevan dengan kondisi penyimpanan, bukan sebagai tujuan utama penelitian (Van Den Berg & Bruin, 1981).

Dalam sistem penyimpanan beras di gudang Bulog, suhu lingkungan umumnya berkisar antara 28–34°C dengan kelembapan relatif (RH) sekitar 65–85%, yang setara dengan rentang aktivitas air (a_w) menengah hingga tinggi, yaitu sekitar 0,40–0,95. Rentang kondisi tersebut merupakan zona kritis karena perilaku sorpsi air beras sangat memengaruhi stabilitas mutu selama penyimpanan. Oleh karena itu, karakterisasi hubungan antara aktivitas air dan kadar air kesetimbangan pada zona tersebut memiliki nilai praktis yang tinggi sebagai dasar pengelolaan penyimpanan beras.

Pada kelembapan relatif di atas 70%, kapang gudang seperti *Aspergillus* spp. dan *Penicillium* spp. mulai dapat tumbuh serta berpotensi menghasilkan mikotoksin yang membahayakan keamanan pangan. Risiko pertumbuhan kapang dan pembentukan mikotoksin akan semakin meningkat ketika kelembapan relatif melebihi 80% (Magan & Aldred, 2007). Dengan demikian, informasi mengenai *Equilibrium Moisture Content* (EMC) beras pada kondisi suhu penyimpanan yang nyata menjadi parameter penting dalam menentukan batas kadar air (MC) yang aman dan mendukung pengelolaan gudang Bulog secara lebih efektif.

Varietas Inpari 32 HDB (Inbrida Padi Irigasi nomor 32 Hawar Daun Bakteri) merupakan varietas unggul inbrida hasil persilangan antara Ciherang (tetua betina) dan IRBB64 (tetua jantan) yang dikembangkan oleh Balai Besar Penelitian Tanaman Padi (BB Padi). Varietas ini dilepas pada tahun 2013 dan memiliki keunggulan utama berupa ketahanan terhadap penyakit Hawar Daun Bakteri (HDB) patotipe III, agak tahan terhadap patotipe IV dan VIII, dengan rata-rata hasil 6,30 ton/ha dan potensi hasil hingga 8,42 ton/ha, bobot 1.000 butir 27,1 gram, dan teksturnasi sedang dengan kadar amilosa $\pm 23,46\%$ (BBPSI Padi, 2016). Saat ini Inpari 32 HDB telah menggantikan posisi Ciherang sebagai varietas paling dominan di Jawa

Barat, sehingga merupakan varietas utama dalam suplai beras ke gudang Bulog wilayah Jawa Barat.

Berdasarkan kajian pustaka yang telah dilakukan, karakteristik sorpsi air beras sosoh varietas Inpari 32 HDB pada suhu yang sesuai dengan kondisi gudang Bulog Jawa Barat, yaitu 30°C, belum tersedia secara spesifik. Hingga saat ini, belum ditemukan publikasi ilmiah yang secara langsung membangun karakteristik sorpsi air untuk varietas Inpari 32 HDB, sehingga terdapat celah penelitian yang sangat signifikan. Sementara itu, penelitian-penelitian MSI yang telah ada pada beras umumnya dilakukan pada varietas lain atau kondisi suhu yang berbeda, sehingga parameter sorpsi yang diperoleh kurang representatif untuk kondisi gudang tropis yang lebih panas.

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian mengenai pengembangan sistem peringatan dini (*Early Warning System*) kualitas beras di gudang BULOG. Dalam penelitian ini diarahkan untuk mengkarakterisasi perilaku sorpsi air beras sosoh varietas Inpari 32 pada zona aktivitas air penyimpanan melalui pendekatan *Moisture Sorption Isotherm* (MSI). Hasil penelitian diharapkan menghasilkan informasi mengenai kurva Absorpsi, kurva desorpsi, histeresis, model isotherm terbaik, serta estimasi *Equilibrium Moisture Content* (EMC) yang dapat dimanfaatkan sebagai dasar ilmiah dalam penyusunan rekomendasi penyimpanan beras dan mendukung penelitian lanjutan mengenai sistem monitoring kualitas penyimpanan di Gudang BULOG.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka identifikasi masalah yang didapat yaitu:

1. Belum diketahui karakteristik kurva sorpsi air untuk beras sosoh varietas Inpari 32 pada zona aktivitas air penyimpanan dengan suhu 30°C yang relevan terhadap kondisi gudang Bulog Jawa Barat.

2. Belum diketahuinya model matematika yang paling tepat untuk mendeskripsikan kurva sorpsi air beras sosoh Inpari 32 pada zona penyimpanan.
3. Belum diketahui nilai *Equilibrium Moisture Content* (EMC) dan karakteristik histeresis beras sosoh varietas Inpari 32 pada rentang RH aktual gudang BULOG yang dapat digunakan sebagai acuan dasar dalam penyimpanan beras sosoh varietas Inpari 32 di gudang BULOG.

1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud penelitian ini adalah mengkarakterisasi perilaku sorpsi air beras sosoh varietas Inpari 32 pada zona aktivitas air penyimpanan sebagai data awal dalam pengelolaan mutu beras selama penyimpanan di gudang Bulog Jawa Barat.

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Memodelkan kurva Absorpsi dan desorpsi sorpsi air beras sosoh varietas Inpari 32 pada zona aktivitas air penyimpanan (a_w 0,50–0,80) suhu 30°C menggunakan metode langsung berbasis a_w meter.
2. Menentukan model matematika terbaik antara GAB dan Oswin yang mendeskripsikan kurva sorpsi air beras sosoh Inpari 32 pada zona penyimpanan berdasarkan nilai koefisien determinasi (R^2), *Mean Relative Deviation* (MRD), dan kewajaran nilai parameter secara fisik.
3. Mengestimasi nilai *Equilibrium Moisture Content* (EMC) pada rentang RH aktual gudang BULOG berdasarkan model isoterm terbaik serta mengevaluasi karakteristik histeresis sebagai dasar interpretasi keamanan penyimpanan beras sosoh varietas Inpari 32.
4. Menyediakan informasi mengenai karakteristik histeresis sorpsi air beras sosoh varietas Inpari 32 yang dapat digunakan sebagai dasar dalam memahami perubahan kadar air selama penyimpanan.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Manfaat bagi Akademik

Mengisi celah data sorpsi air beras sosoh varietas Inpari 32 pada zona penyimpanan yang belum tersedia dalam literatur, sehingga berkontribusi pada ilmu teknologi pangan pascapanen Indonesia.

2. Manfaat bagi Industri BULOG

Memberikan data referensi ambang kadar air berbasis varietas untuk mendukung pengembangan sistem peringatan dini (EWS) kualitas beras di gudang Bulog.

3. Manfaat bagi Masyarakat

Menyediakan informasi ilmiah mengenai hubungan antara aktivitas air dan kadar air kesetimbangan (EMC) beras sosoh varietas Inpari 32 yang dapat digunakan sebagai dasar dalam penyusunan strategi pengelolaan penyimpanan beras, sehingga mendukung terjaganya mutu beras yang didistribusikan kepada masyarakat.

1.5 Kerangka Pemikiran

Beras sosoh (*milled rice*) merupakan hasil penggilingan gabah yang telah mengalami proses penyosohan sehingga lapisan perikarp, tegmen, dan aleuron sebagian besar terbuang. Proses tersebut menyebabkan perubahan komposisi kimia pada permukaan butir beras, ditandai dengan meningkatnya proporsi pati, terutama amilosa dan amilopektin, serta menurunnya kandungan protein dan lemak. Perubahan komposisi tersebut memengaruhi sifat higroskopis beras sosoh sehingga karakteristik penyerapan dan pelepasan uap airnya berbeda dibandingkan dengan gabah utuh (Sasmitaloka dkk., 2022).

Sebagai bahan pangan yang bersifat higroskopis, beras sosoh akan terus berinteraksi dengan udara di sekitarnya melalui proses pertukaran uap air selama

penyimpanan. Perpindahan uap air tersebut dipengaruhi oleh perbedaan tekanan uap air antara permukaan butir beras yang direpresentasikan oleh aktivitas air (a_w) dengan tekanan uap air lingkungan yang dinyatakan sebagai kelembapan relatif (*Relative Humidity*/RH). Selama masih terdapat perbedaan tekanan uap air antara bahan dan lingkungan, molekul air akan bergerak secara spontan hingga tercapai kondisi kesetimbangan (Van Den Berg & Bruin, 1981; Rahman, 2009).

Ketika kelembapan relatif udara lebih tinggi dibandingkan aktivitas air beras ($RH > a_w \times 100\%$), beras akan menyerap uap air dari lingkungan melalui proses Absorpsi sehingga kadar airnya meningkat. Sebaliknya, apabila kelembapan relatif udara lebih rendah daripada aktivitas air beras, beras akan melepaskan uap air ke lingkungan melalui proses desorpsi yang menyebabkan kadar airnya menurun. Kondisi tersebut umum terjadi pada gudang penyimpanan Perum BULOG, yang memiliki kelembapan relatif berkisar antara 65–80% bergantung pada musim. Fluktuasi kelembapan tersebut menyebabkan proses Absorpsi dan desorpsi berlangsung secara terus-menerus sehingga berpotensi meningkatkan kadar air beras hingga melampaui batas maksimum yang ditetapkan dalam SNI 6128:2020, yaitu sebesar 14% (bb) (BSN, 2020).

Proses Absorpsi maupun desorpsi akan berlangsung hingga tercapai keseimbangan tekanan uap air antara bahan dan lingkungan. Pada kondisi tersebut, aktivitas air bahan sama dengan *Equilibrium Relative Humidity* (ERH/100), sedangkan kadar air yang dimiliki bahan pada saat kesetimbangan disebut sebagai *Equilibrium Moisture Content* (EMC) (Labuza, 1984; Van Den Berg & Bruin, 1981). Dibandingkan dengan kadar air sesaat, EMC merupakan parameter yang lebih representatif dalam menggambarkan kondisi penyimpanan karena menunjukkan kadar air yang secara teoritis akan dicapai bahan apabila disimpan pada suhu dan kelembapan relatif tertentu hingga mencapai keadaan setimbang (Adawiyah & Soekarto, 2010).

Nilai EMC memberikan informasi mengenai kecenderungan perubahan kadar air beras selama penyimpanan. Apabila kadar air aktual beras lebih rendah daripada nilai EMC pada kondisi RH tertentu, beras akan cenderung menyerap uap air hingga kadar airnya mendekati nilai EMC. Sebaliknya, apabila kadar air aktual lebih tinggi daripada EMC, beras akan melepaskan uap air ke lingkungan hingga tercapai kondisi kesetimbangan (Labuza, 1984; Rahman, 2009). Dalam konteks pengelolaan gudang Perum BULOG, informasi mengenai EMC pada berbagai kondisi kelembapan relatif sangat penting untuk memprediksi perubahan kadar air selama penyimpanan, mengevaluasi stabilitas mutu produk, serta memperkirakan tingkat keamanan penyimpanan sebelum terjadi kerusakan fisik maupun mikrobiologis.

Hubungan antara aktivitas air dan kadar air kesetimbangan pada suhu konstan dapat dijelaskan melalui konsep *Moisture Sorption Isotherm* (MSI). Kurva MSI menggambarkan hubungan kuantitatif antara aktivitas air (a_w) dan *Equilibrium Moisture Content* (EMC), sehingga mampu merepresentasikan karakteristik higroskopis suatu bahan pangan terhadap perubahan kondisi lingkungan (Van Den Berg & Bruin, 1981). Bentuk kurva MSI bersifat spesifik untuk setiap jenis bahan karena dipengaruhi oleh komposisi kimia, struktur fisik, serta suhu pengukuran (Mousa dkk., 2014).

Pada bahan pangan berbasis pati seperti beras, kurva MSI umumnya berbentuk sigmoid tipe II yang terdiri atas tiga zona sorpsi. Zona pertama berada pada aktivitas air rendah, ketika molekul air terikat kuat pada situs aktif permukaan bahan sebagai lapisan monolayer. Zona kedua terjadi pada aktivitas air menengah yang ditandai dengan terbentuknya lapisan multilayer. Sementara itu, zona ketiga berada pada aktivitas air tinggi, ketika air mulai berperilaku menyerupai air bebas sehingga dapat mendukung pertumbuhan mikroorganisme penyebab kerusakan pangan (Sun, 1999). Dalam penelitian ini, MSI digunakan sebagai pendekatan ilmiah untuk mengkarakterisasi hubungan antara aktivitas air dan kadar air kesetimbangan pada beras sosoh varietas Inpari 32, bukan sebagai tujuan akhir penelitian. Persamaan isotherm yang diperoleh diharapkan mampu mengestimasi nilai EMC pada berbagai

kondisi kelembapan relatif yang umum dijumpai di gudang penyimpanan Perum BULOG, sehingga dapat menjadi dasar dalam mengevaluasi stabilitas penyimpanan dan menentukan batas kadar air yang aman sesuai kondisi lingkungan penyimpanan (Van Den Berg & Bruin, 1981).

Salah satu karakteristik penting dari kurva *Moisture Sorption Isotherm* (MSI) pada bahan pangan adalah adanya fenomena histeresis, yaitu perbedaan nilai *Equilibrium Moisture Content* (EMC) antara kurva Absorpsi dan kurva desorpsi pada nilai aktivitas air (a_w) yang sama. Fenomena ini menunjukkan bahwa kadar air kesetimbangan yang dicapai bahan bergantung pada riwayat perubahan kadar air sebelumnya, sehingga lintasan Absorpsi dan desorpsi tidak berhimpit meskipun berada pada kondisi aktivitas air yang identik. Perbedaan tersebut disebabkan oleh mekanisme fisik yang berbeda antara proses penyerapan air ke dalam matriks bahan selama Absorpsi dan pelepasan air dari pori-pori serta struktur kapiler selama desorpsi (Mousa dkk., 2014).

Fenomena histeresis telah banyak dilaporkan pada berbagai bahan pangan berbasis pati, termasuk gabah dan beras, serta pada komponen penyusunnya seperti amilosa, amilopektin, protein, dan selulosa. Besarnya area histeresis mencerminkan kemampuan suatu bahan dalam mempertahankan kandungan air ketika terjadi perubahan kelembapan lingkungan. Semakin besar area histeresis, semakin lambat respons bahan terhadap perubahan kelembapan relatif, sehingga perubahan kadar air selama penyimpanan berlangsung lebih bertahap (Zeymer dkk., 2019).

Dalam konteks penyimpanan beras di gudang Perum BULOG, karakterisasi kurva Absorpsi dan desorpsi sama-sama diperlukan karena kedua proses tersebut merepresentasikan kondisi penyimpanan yang berbeda. Beras yang disimpan dengan kadar air awal relatif rendah dan kemudian terpapar kelembapan udara yang tinggi akan mengalami proses Absorpsi. Sebaliknya, beras dengan kadar air awal yang tinggi akan cenderung mengalami proses desorpsi apabila ditempatkan pada lingkungan dengan kelembapan relatif yang lebih rendah. Perbedaan kedua lintasan

tersebut akan memengaruhi perubahan kadar air selama penyimpanan serta tingkat risiko penurunan mutu produk.

Untuk mendeskripsikan hubungan kuantitatif antara aktivitas air (a_w) dan *Equilibrium Moisture Content* (EMC), kurva MSI umumnya dinyatakan dalam bentuk model matematika isoterm sorpsi. Model tersebut berfungsi menghasilkan persamaan yang dapat digunakan untuk memperkirakan nilai EMC pada berbagai kondisi aktivitas air, sehingga perilaku perubahan kadar air selama penyimpanan dapat diprediksi secara kuantitatif.

Penelitian ini menggunakan dua model isoterm sorpsi, yaitu *Guggenheim–Anderson–de Boer* (GAB) dan Oswin. Model GAB merupakan pengembangan dari model BET melalui penambahan konstanta koreksi sorpsi *multilayer* (K), sehingga mampu menggambarkan hubungan a_w –EMC pada rentang aktivitas air yang lebih luas, yaitu sekitar 0,05–0,90. Berbagai penelitian melaporkan bahwa model GAB memberikan tingkat kesesuaian yang baik pada bahan pangan berbasis pati dan sereal, termasuk beras dan jagung (Sun, 1999).

Selain model GAB, penelitian ini juga menggunakan model Oswin yang merupakan model empiris dengan dua parameter. Model ini telah banyak digunakan karena mampu memberikan kecocokan yang baik terhadap kurva isoterm sorpsi bahan pangan berbentuk sigmoid. Mousa dkk., (2014) melaporkan bahwa model Oswin menghasilkan tingkat ketelitian yang lebih baik dibandingkan beberapa model isoterm lainnya pada gabah varietas MR219 di Malaysia. Selain itu, model ini juga telah diaplikasikan pada penelitian isoterm sorpsi gabah varietas lokal Indonesia (Rahmawati dkk., 2025).

Model *Brunauer–Emmett–Teller* (BET) tidak digunakan dalam penelitian ini karena model tersebut hanya memberikan hasil yang baik pada rentang aktivitas air rendah, yaitu sekitar 0,05–0,45 (Van Den Berg & Bruin, 1981; Lomauro dkk., 1984). Sementara itu, penelitian ini difokuskan pada rentang aktivitas air 0,50–0,80 yang lebih sesuai dengan kondisi penyimpanan beras di gudang tropis. Oleh karena

itu, penggunaan model GAB dan Oswin dinilai lebih relevan untuk menggambarkan hubungan antara aktivitas air dan kadar air kesetimbangan pada kondisi penelitian.

Model isoterm terbaik selanjutnya dipilih berdasarkan kemampuan dalam menggambarkan data hasil pengamatan. Evaluasi dilakukan menggunakan nilai koefisien determinasi (R^2) dan *Mean Relative Deviation* (MRD). Model dengan nilai R^2 tertinggi dan MRD terendah dipilih sebagai model yang paling representatif, dengan nilai MRD kurang dari 10% menunjukkan bahwa model memiliki tingkat kesesuaian yang baik terhadap data eksperimen (Adawiyah & Soekarto, 2010).

Penelitian ini difokuskan pada rentang aktivitas air (a_w) 0,50–0,80 karena rentang tersebut paling merepresentasikan kondisi penyimpanan beras di gudang tropis, termasuk gudang Perum BULOG. Pada wilayah tropis seperti Indonesia, kelembapan relatif (RH) gudang umumnya berfluktuasi antara 65–85% bergantung pada musim, yang setara dengan aktivitas air kesetimbangan pada kisaran 0,65–0,80. Rentang tersebut merupakan kondisi yang paling sering dijumpai selama penyimpanan dan berpengaruh langsung terhadap perubahan kadar air serta stabilitas mutu beras.

FAO (2011) merekomendasikan agar kelembapan relatif ruang penyimpanan beras dipertahankan di bawah 70%, sedangkan (IRRI, 2013) merekomendasikan kadar air aman untuk penyimpanan jangka panjang sebesar 13–14% (bb) pada suhu 25–30°C. Rekomendasi tersebut menunjukkan bahwa rentang aktivitas air sekitar 0,65–0,75 merupakan zona kritis yang perlu dipahami karena berkaitan erat dengan perubahan kadar air dan stabilitas mutu beras selama penyimpanan.

Dari aspek keamanan pangan, peningkatan aktivitas air juga berpengaruh terhadap pertumbuhan kapang gudang. Pada aktivitas air sekitar 0,65–0,70, kapang xerofilik seperti *Aspergillus flavus* dan *Aspergillus parasiticus* mulai mampu tumbuh serta

berpotensi menghasilkan aflatoksin, sedangkan pada aktivitas air di atas 0,75 sebagian besar kapang gudang dapat berkembang secara optimal (Magan & Aldred, 2007). Sebaliknya, aktivitas air di bawah 0,50 relatif tidak dijumpai pada gudang penyimpanan beras konvensional di wilayah tropis yang tidak dilengkapi sistem pendingin maupun pengering aktif. Oleh karena itu, data *Equilibrium Moisture Content* (EMC) pada rentang aktivitas air tersebut memiliki relevansi operasional yang rendah.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, penelitian ini secara khusus difokuskan pada rentang aktivitas air 0,50–0,80 agar hasil yang diperoleh memiliki relevansi yang tinggi terhadap kondisi penyimpanan aktual di gudang Perum BULOG Jawa Barat.

Model isoterm sorpsi terbaik yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk mengestimasi nilai *Equilibrium Moisture Content* (EMC) beras sosoh varietas Inpari 32 pada kondisi kelembapan relatif yang umum dijumpai di gudang Perum BULOG. Estimasi dilakukan pada tiga tingkat kelembapan relatif yang dianggap kritis, yaitu 65% sebagai batas bawah zona waspada pertumbuhan kapang, 70% sebagai ambang peringatan berdasarkan (FAO, 2011) sekaligus mendekati batas kadar air aman menurut BSN 6128:2020, serta 75–80% sebagai kondisi yang mendukung pertumbuhan optimal kapang gudang (Magan & Aldred, 2007).

Nilai EMC hasil estimasi kemudian dikonversi menjadi ambang batas kadar air kritis (*critical moisture threshold*) berbasis varietas, yaitu kadar air maksimum beras sosoh varietas Inpari 32 yang tidak boleh dilampaui pada setiap kondisi kelembapan relatif gudang agar aktivitas air bahan tetap berada di bawah batas yang mendukung pertumbuhan kapang. Informasi tersebut diharapkan dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan batas kadar air penyimpanan yang lebih sesuai dengan kondisi lingkungan gudang.

Dengan demikian, model MSI yang dihasilkan dalam penelitian ini tidak hanya memberikan informasi mengenai karakteristik higroskopis beras sosoh varietas

Inpari 32, tetapi juga menghasilkan persamaan prediktif yang dapat digunakan untuk mengestimasi nilai EMC pada berbagai kondisi penyimpanan. Informasi tersebut diharapkan menjadi landasan ilmiah bagi Perum BULOG dalam menetapkan ambang batas kadar air yang lebih akurat untuk sistem pemantauan mutu penyimpanan sebagai pelengkap standar SNI 6128:2020 yang masih menggunakan batas kadar air umum dan belum mempertimbangkan karakteristik higroskopis spesifik setiap varietas beras (BSN, 2020).

1.6 Hipotesis Penelitian

1. Diduga kurva Absorpsi dan desorpsi beras sosoh varietas Inpari 32 memiliki karakteristik sorpsi air yang berbeda sehingga membentuk fenomena histeresis pada zona aktivitas air penyimpanan.
2. Diduga model Oswin merupakan model yang paling sesuai dalam mendeskripsikan kurva tersebut dibandingkan model GAB.
3. Diduga nilai *Equilibrium Moisture Content* (EMC) meningkat seiring dengan meningkatnya aktivitas air (a_w) pada beras sosoh varietas Inpari 32.

1.7 Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu pelaksanaan penelitian dimulai pada bulan Juni sampai Juli 2026 dan tempat penelitian dilaksanakan di Laboratorium Penelitian Beras Eksternal, Jalan Pasir Impun barat No.58, Kota Bandung.

Bab II Tinjauan Pustaka

Bab ini menguraikan mengenai: (2.1) Beras Inpari 32 HDB, (2.2) Sifat Higroskopis Bahan Pangan Berbasis Pati, (2.3) Aktivitas Air, (2.4) *Equilibrium Moisture Content* (EMC), (2.5) Proses Sorpsi Air, (2.6) *Moisture Sorption Isotherm* (MSI), (2.7) Fenomena Histeresis, (2.8) Model Matematika MSI, dan (2.9) Standar Mutu dan Kondisi Penyimpanan Beras di Gudang BULOG.

2.1 Beras Inpari 32 HDB

Padi (*Oryza sativa* L.) merupakan salah satu komoditas pangan yang memiliki peranan penting secara global, khususnya di wilayah Asia, karena menjadi sumber energi utama bagi sebagian besar masyarakat. Tanaman semusim ini mempunyai kemampuan adaptasi yang tinggi sehingga dapat dibudidayakan pada berbagai kondisi lingkungan, baik di lahan sawah beririgasi maupun pada sistem pertanian lahan kering (Adzigbe dkk., 2025). Secara klasifikasi, padi termasuk ke dalam famili Poaceae dan kelompok sereal (*cereal grain*) yang menghasilkan gabah sebagai produk reproduksi sekaligus bahan pangan pokok bagi manusia (Fathoni dkk., 2025). Preferensi konsumen terhadap beras umumnya dipengaruhi oleh karakteristik fisik butirannya, terutama tingkat warna putih dan kejernihan beras yang sering digunakan sebagai indikator mutu komersial. Penampilan visual tersebut menjadi faktor penting dalam menentukan daya tarik serta nilai ekonomi beras di pasaran.

Dari segi kandungan gizi, beras putih didominasi oleh pati yang tersusun atas amilosa dan amilopektin dengan proporsi sekitar 80–90% dari bobot keringnya. Proses penggilingan yang bertujuan menghilangkan sekam dan lapisan aleuron dapat meningkatkan kemudahan pengolahan serta memperpanjang masa simpan beras. Namun, proses tersebut juga menyebabkan berkurangnya kandungan serat, vitamin B kompleks, dan mineral yang sebagian besar terdapat pada lapisan kulit ari (Kaur dkk., 2023). Oleh sebab itu, kegiatan pemuliaan padi di Indonesia terus dikembangkan untuk menghasilkan varietas unggul baru yang memiliki

produktivitas tinggi, tahan terhadap serangan hama maupun penyakit, serta mampu mempertahankan kualitas sensori nasi yang sesuai dengan preferensi konsumen (BBPSI Padi, 2016).

Sejarah pelepasan varietas Inpari 32 HDB diawali melalui serangkaian kegiatan penelitian dan seleksi yang dilakukan oleh pemulia padi di Indonesia. Varietas ini kemudian secara resmi dilepas oleh Kementerian Pertanian pada tahun 2013 dengan nomor seleksi BP10620F-BB4-15-BB8 sebagai salah satu varietas unggul yang dikembangkan dalam rangka mendukung program diversifikasi varietas padi dan ketahanan pangan nasional. Sejak dilepas, Inpari 32 HDB telah banyak dibudidayakan oleh petani di berbagai wilayah karena memiliki produktivitas yang tinggi, karakter agronomis yang baik, serta ketahanan terhadap penyakit Hawar Daun Bakteri (HDB), yang merupakan salah satu penyakit utama pada tanaman padi di lahan sawah beririgasi (BBPSI Padi, 2016).

Varietas Inpari 32 HDB merupakan hasil pemuliaan yang diperoleh melalui persilangan antara varietas Ciherang dan IRBB64. Persilangan tersebut dilakukan dengan tujuan menghasilkan varietas yang memiliki hasil panen tinggi sekaligus tahan terhadap serangan penyakit hawar daun bakteri. Varietas ini memiliki umur panen sekitar 120 hari setelah persemaian. Tanaman Inpari 32 HDB memiliki postur dan daun yang tumbuh tegak, sehingga memberikan keuntungan agronomis berupa ketahanan yang lebih baik terhadap rebah (*lodging*). Selain itu, posisi daun bendera yang tegak memungkinkan penyerapan cahaya matahari berlangsung lebih optimal sehingga mendukung proses fotosintesis dan pengisian gabah secara lebih efisien. Adapun karakteristik lengkap varietas Inpari 32 HDB sebagai salah satu varietas padi sawah irigasi dapat dilihat pada deskripsi varietas yang diterbitkan oleh BBPSI Padi (2023) sebagai berikut :

Tabel II.1 Karakteristik Beras Inpari 32 HDB

Tahun dilepas	2013
Nomor seleksi	BP10620F-BB4-15-BB8

Asal seleksi	Ciherang/IRBB64
Umur tanaman	120 hari setelah sebar
Bentuk tanaman	Tegak
Tinggi tanaman	97 cm
Daun bendera	Tegak
Jumlah gabah per malai	± 118 butir
Bentuk gabah	Medium
Warna gabah	Kuning bersih
Kerontokan	Sedang
Kerebahan	Agak tahan
Tekstur nasi	Sedang
Kadar amilosa	$\pm 23,46$ %
Berat 1000 butir	27,1 gram
Rata-rata hasil	6,30 t/ha GKG
Potensi hasil	8,42 t/ha GKG
Ketahanan terhadap hama	Agak rentan terhadap wareng batang coklat biotipe 1, 2, dan 3
Ketahanan terhadap penyakit	Tahan terhadap hawar daun bakteri patotipe III, agak tahan patotipe IV dan VIII. Tahan blas ras 033, agak tahan ras 073, rentan terhadap ras 133 dan 173 serta agak tahan tungro ras Lanrang

Anjuran tanam	Cocok ditanam diekosistem sawah dataran rendah sampai ketinggian 600 mdpl
Pemulia	Aan A. Daradjat, Cucu Gunarsih, Trias Sitaresmi, Nafisah

Varietas Inpari 32 HDB memiliki karakteristik fisik berupa bentuk butiran beras yang ramping, memanjang, serta menunjukkan tingkat keseragaman yang tinggi. Keseragaman morfologi tersebut, yang didukung oleh kemampuan adaptasi agronomis pada berbagai kondisi lingkungan, menjadikan varietas ini sangat sesuai untuk budidaya dan produksi komersial dalam skala besar (Suparto & Widyawati, 2024). Dari segi fisik, Inpari 32 HDB memiliki endosperma yang padat dan keras dengan bobot 1.000 butir gabah berkisar antara 27–29 gram. Selain memiliki ketahanan mekanik yang baik, beras yang dihasilkan juga berwarna putih cerah, yang mengindikasikan proses penggilingan berlangsung optimal serta menunjukkan rendahnya keberadaan lapisan aleuron pada permukaan beras (BBPSI Padi, 2016).

Mutu varietas Inpari 32 HDB dipengaruhi oleh komposisi kimianya, terutama kandungan makromolekul penyusun beras. Varietas ini memiliki kadar amilosa sekitar 23,2%, yang berkontribusi terhadap tekstur nasi yang pulen dan tidak keras setelah dimasak (Suarti dkk., 2023). Kandungan gizinya didominasi oleh pati sebesar 75–80% dan protein sekitar 6–8%, serta mengandung sejumlah kecil lemak dan mineral yang turut berperan dalam pembentukan cita rasa dan aroma khas beras (Pradipta dkk., 2020) Untuk menjaga kualitas tersebut selama penyimpanan, kadar air beras perlu dipertahankan di bawah 14% agar pertumbuhan mikroorganisme dan kerusakan mutu dapat diminimalkan.



Gambar II.1 Beras Sosoh Inpari 32

Karakteristik fisik dan kimia Inpari 32 HDB sangat dipengaruhi oleh penanganan pascapanen. Beberapa faktor seperti tingkat kematangan saat panen, jenis kemasan yang digunakan, serta durasi penyimpanan berperan penting dalam mempertahankan kualitas beras. Penyimpanan dalam jangka waktu yang terlalu lama dapat menyebabkan terjadinya reaksi degradasi enzimatis dan oksidasi yang berdampak pada penurunan kandungan air maupun protein (Fathoni dkk., 2025). Oleh karena itu, penerapan penanganan pascapanen yang tepat sangat diperlukan agar mutu fisik dan kimia beras Inpari 32 HDB tetap terjaga, sehingga dapat dimanfaatkan secara optimal baik untuk kebutuhan rumah tangga maupun sebagai bahan baku industri pangan.

2.2 Sifat Higroskopis Bahan Pangan Berbasis Pati

Beras termasuk kelompok bahan pangan higroskopis, yaitu bahan yang memiliki kemampuan menyerap maupun melepaskan uap air secara dinamis hingga mencapai kesetimbangan dengan lingkungan di sekitarnya (Aviara, 2020). Sifat higroskopis ini bukan bersifat konstan, melainkan dipengaruhi oleh komposisi kimia bahan, struktur internal, dan kondisi lingkungan terutama suhu serta kelembapan relatif (Lomauro dkk., 1984). Akibatnya, kadar air beras tidak statis

selama penyimpanan, melainkan berubah secara terus-menerus mengikuti fluktuasi kondisi lingkungan gudang.

Kemampuan mengikat air pada bahan pangan berbasis pati seperti beras ditentukan oleh ketersediaan gugus hidrofilik pada komponen penyusunnya. Gugus hidroksil (-OH) pada pati, gugus amino (-NH₂) dan karboksil (-COOH) pada protein, serta senyawa polisakarida lainnya mampu membentuk ikatan hidrogen dengan molekul air (Rahman, 2009). Semakin banyak gugus aktif yang tersedia, semakin besar kapasitas bahan dalam menyerap uap air dari lingkungan. Sebaliknya, perubahan struktur bahan akibat proses pengeringan, pemanasan, atau penyimpanan berkepanjangan dapat mengurangi aksesibilitas gugus-gugus tersebut sehingga mengubah karakteristik higroskopis secara keseluruhan.

Perpindahan uap air antara beras dan lingkungannya berlangsung akibat perbedaan tekanan parsial uap air. Apabila tekanan uap air lingkungan lebih tinggi dari permukaan bahan, molekul air akan bergerak masuk ke dalam bahan melalui proses Absorpsi, sehingga kadar air beras meningkat. Sebaliknya, apabila tekanan uap lingkungan lebih rendah, air akan keluar melalui proses desorpsi. Proses ini berjalan terus hingga tercapai kondisi kesetimbangan higroskopis, di mana tekanan uap pada permukaan bahan sama dengan tekanan uap lingkungan (Labuza, 1984). Pada kondisi kesetimbangan ini, kadar air yang dicapai dikenal sebagai *Equilibrium Moisture Content* (EMC).

Pada beras yang disimpan di gudang tropis, siklus Absorpsi dan desorpsi terjadi berulang seiring fluktuasi harian maupun musiman kelembapan relatif gudang. Siklus yang berulang ini tidak hanya berdampak pada perubahan kadar air, tetapi juga dapat memicu tegangan mekanik di dalam butir yang pada akhirnya menyebabkan *micro-fissuring* atau retakan halus pada permukaan butir beras (Cnossen & Siebenmorgen, 2000). Lebih jauh, peningkatan kadar air yang melampaui batas kritis berkorelasi langsung dengan peningkatan aktivitas enzim,

respirasi aerobik beras, pertumbuhan kapang, dan perkembangan serangga gudang yang pada akhirnya mempercepat penurunan mutu (Labuza & Altunakar, 2020).

2.3 Aktivitas Air

Aktivitas air (a_w) merupakan parameter yang mencerminkan tingkat ketersediaan air bebas di dalam suatu bahan pangan yang dapat berpartisipasi dalam reaksi fisik, kimia, maupun biologis (Labuza, 1984). Secara termodinamika, aktivitas air didefinisikan sebagai rasio tekanan uap air pada permukaan bahan (p) terhadap tekanan uap air murni (p_0) pada suhu yang sama, dengan nilai berkisar antara 0 hingga 1. Berbeda dengan kadar air yang hanya mengukur total kandungan air, nilai a_w menunjukkan seberapa besar energi bebas air sehingga tersedia untuk menunjang pertumbuhan mikroorganisme dan berbagai proses deteriorasi (Labuza & Altunakar, 2020).

Pada kondisi kesetimbangan, aktivitas air memiliki hubungan langsung dengan kelembapan relatif kesetimbangan/*Equilibrium Relative Humidity* (ERH), yaitu:

$$\text{ERH}\% = a_w \times 100$$

Hubungan ini bermakna bahwa bahan dengan $a_w = 0,70$ akan berada dalam kesetimbangan dengan udara berkelembapan relatif 70%. Bila RH lingkungan melebihi nilai ERH bahan, beras akan mengalami Absorpsi. Sebaliknya, bila RH lebih rendah, beras akan mengalami desorpsi (Van Den Berg & Bruin, 1981). Oleh karena itu, parameter a_w dinilai lebih representatif daripada kadar air dalam menggambarkan interaksi antara bahan pangan dan kondisi lingkungan penyimpanannya.

Dalam kajian stabilitas penyimpanan sereal, nilai a_w memiliki ambang-ambang kritik yang telah ditetapkan berdasarkan penelitian ekologi fungi. Pada Zona I ($a_w < 0,25$), molekul air terikat kuat pada gugus hidrofilik sehingga hampir semua reaksi deteriorasi berlangsung sangat lambat (Labuza, 1984). Pada Zona II ($a_w 0,25-0,70$), terbentuk lapisan air multilayer yang mulai meningkatkan laju beberapa

reaksi kimia dan enzimatis (Rahman, 2009). Zona III ($a_w > 0,70$) ditandai dengan meningkatnya jumlah air bebas yang mendukung pertumbuhan mikroorganisme kapang gudang seperti *Aspergillus* spp. mulai tumbuh pada kisaran a_w 0,70–0,75, sementara pertumbuhan optimalnya terjadi di atas a_w 0,80 (Magan & Aldred, 2007). Nilai a_w 0,70 dengan demikian ditetapkan sebagai ambang peringatan kritis (*critical warning threshold*) dalam sistem pemantauan mutu beras simpan (FAO, 2011).

Nilai a_w beras dipengaruhi langsung oleh suhu dan kadar air aktualnya. Peningkatan kadar air akibat kondisi RH gudang yang tinggi akan secara otomatis meningkatkan nilai a_w beras. Pemantauan a_w secara berkala selama penyimpanan dapat memberikan gambaran yang lebih sensitif terhadap perubahan mutu dibandingkan pengukuran kadar air saja, karena a_w secara langsung mencerminkan ketersediaan air bebas untuk reaksi-reaksi deterioratif seperti oksidasi lipid dan pencoklatan non-enzimatis (Ozbekova & Kulmyrzaev, 2019).

2.4 Equilibrium Moisture Content (EMC)

Equilibrium Moisture Content (EMC) merupakan kadar air suatu bahan pangan pada saat tercapai kondisi kesetimbangan higroskopis dengan lingkungannya, yaitu ketika tidak lagi terjadi perpindahan bersih uap air antara bahan dan udara pada suhu serta kelembapan relatif (Van Den Berg & Bruin, 1981). Pada kondisi ini, tekanan uap air pada permukaan bahan setara dengan tekanan uap air lingkungan sehingga laju Absorpsi dan desorpsi berlangsung seimbang (Labuza & Altunakar, 2020). EMC bukan menggambarkan kadar air awal bahan, melainkan kadar air yang secara alami akan dicapai apabila bahan disimpan cukup lama pada kondisi lingkungan tertentu.

Nilai EMC tidak bersifat konstan dan dipengaruhi oleh jenis bahan, komposisi kimia, struktur internal, suhu, serta aktivitas air lingkungan (Aviara, 2020). Pada komoditas sereal termasuk beras, variasi kandungan amilosa, amilopektin, dan protein antarvarietas dapat menyebabkan perbedaan karakteristik sorpsi air dan nilai EMC yang dihasilkan (Mousa dkk., 2014). Penelitian terhadap berbagai jenis

gabah di Asia Tenggara menunjukkan bahwa pada aktivitas air yang sama, beras varietas dengan kandungan amilosa yang lebih tinggi cenderung menghasilkan EMC yang lebih rendah, karena struktur kristalin pati yang lebih kuat mengurangi aksesibilitas gugus hidrofilik (Taveesuvun dkk., 2022).

Suhu penyimpanan juga mempengaruhi nilai EMC secara signifikan. Pada aktivitas air yang sama, peningkatan suhu umumnya menurunkan nilai EMC karena meningkatnya energi kinetik molekul air sehingga ikatan antara air dan komponen bahan menjadi lebih lemah (Van Den Berg & Bruin, 1981). Studi pada beras yang disimpan di gudang berventilasi alami menunjukkan bahwa fluktuasi suhu dan RH lingkungan luar secara langsung memengaruhi nilai EMC di dalam ruang simpan, dan bahwa kondisi penyimpanan optimal untuk beras di iklim sedang berada pada suhu 20–28,5°C dengan RH 15–25% (Maftoon Azad dkk., 2023).

Dalam praktik penyimpanan, EMC lebih representatif daripada kadar air aktual karena menggambarkan kondisi kesetimbangan yang akan dicapai bahan pada suatu kondisi lingkungan tertentu (Rahman, 2009). Dua sampel beras dengan kadar air awal yang sama dapat memiliki lintasan perubahan mutu yang berbeda apabila disimpan pada kondisi RH berbeda, karena EMC yang akan dicapainya pun berbeda. Oleh karena itu, EMC dinilai sebagai dasar yang lebih ilmiah dalam mengevaluasi keamanan penyimpanan dibandingkan hanya mengacu pada kadar air actual (Labuza & Altunakar, 2020). Hubungan antara a_w dan EMC tidak linier, melainkan mengikuti pola khas yang direpresentasikan oleh kurva *Moisture Sorption Isotherm* (MSI).

2.5 Proses Sorpsi Air

Sorpsi air merupakan proses perpindahan molekul air antara bahan pangan dan lingkungan hingga tercapai kondisi kesetimbangan. Proses ini dipengaruhi oleh perbedaan tekanan uap air antara bahan dan udara sekitarnya, sehingga bahan dapat menyerap maupun melepaskan uap air sesuai dengan kondisi kelembapan relatif lingkungan. Pada bahan pangan higroskopis seperti beras, proses sorpsi air berperan

penting dalam menentukan kadar air kesetimbangan, stabilitas penyimpanan, umur simpan, serta perubahan mutu fisik, kimia, dan mikrobiologis selama penyimpanan (Labuza & Altunakar, 2020).

Secara umum, sorpsi air terdiri atas dua proses utama, yaitu Absorpsi dan desorpsi. Kedua proses tersebut menghasilkan lintasan yang berbeda meskipun berada pada nilai aktivitas air yang sama. Perbedaan lintasan inilah yang kemudian dikenal sebagai fenomena histeresis sorpsi air (Van Den Berg & Bruin, 1981).

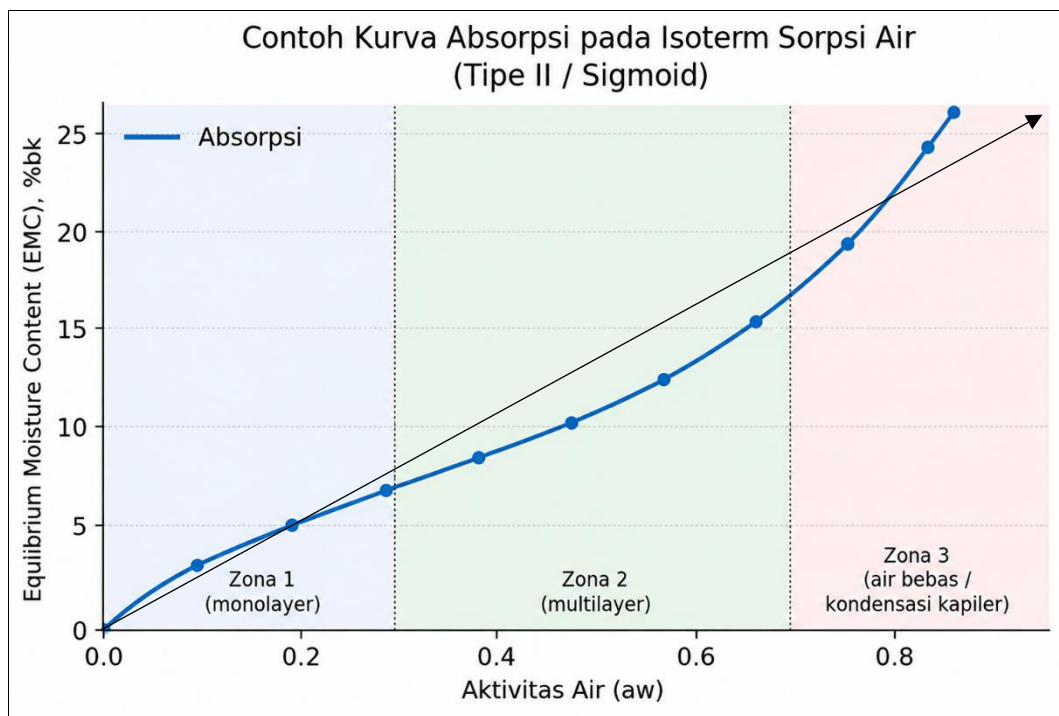
2.5.1 Absorpsi

Absorpsi merupakan proses masuknya uap air dari lingkungan ke dalam bahan pangan hingga tercapai kondisi kesetimbangan antara kadar air bahan dan kelembapan lingkungan. Pada bahan pangan higroskopis seperti beras, proses absorpsi terjadi ketika aktivitas air (*water activity/aw*) lingkungan lebih tinggi dibandingkan kondisi air bahan, sehingga molekul air berpindah dari lingkungan menuju bahan. Jumlah air yang terserap meningkat seiring dengan meningkatnya aktivitas air hingga tercapai *Equilibrium Moisture Content* (EMC), yaitu kondisi ketika tidak terjadi perubahan bersih kadar air antara bahan dan lingkungan (Aviara, 2020).

Pada proses absorpsi, molekul air berinteraksi dengan komponen penyusun beras, terutama gugus hidrofilik pada pati dan protein. Pada aktivitas air rendah, molekul air terutama berikatan pada situs aktif yang tersedia pada permukaan komponen bahan sehingga pembentukan lapisan air berlangsung secara bertahap. Seiring meningkatnya aktivitas air, jumlah air yang terikat bertambah dan mulai terbentuk lapisan air berikutnya (*multilayer*). Pada aktivitas air yang lebih tinggi, air dapat mengalami kondensasi pada ruang atau pori-pori bahan sehingga peningkatan EMC menjadi lebih besar (Rahman, 2009).

Hubungan antara aktivitas air dan EMC selama proses absorpsi dapat digambarkan dalam bentuk kurva isotherm sorpsi air. Pada sebagian besar bahan pangan berbasis pati, termasuk beras, kurva absorpsi umumnya berbentuk sigmoid tipe II. Bentuk

tersebut menunjukkan adanya perubahan mekanisme pengikatan air seiring meningkatnya aktivitas air, mulai dari pengikatan pada situs aktif, pembentukan lapisan air berlapis, hingga peningkatan air yang lebih bebas pada aktivitas air tinggi (Barbosa-Cánovas dkk., 2007). Karakteristik kurva tersebut penting dalam menentukan perubahan kadar air beras akibat kondisi kelembapan relatif lingkungan selama penyimpanan.



Gambar II.2 Contoh Kurva Absorpsi pada Isoterm Sorpsi Air

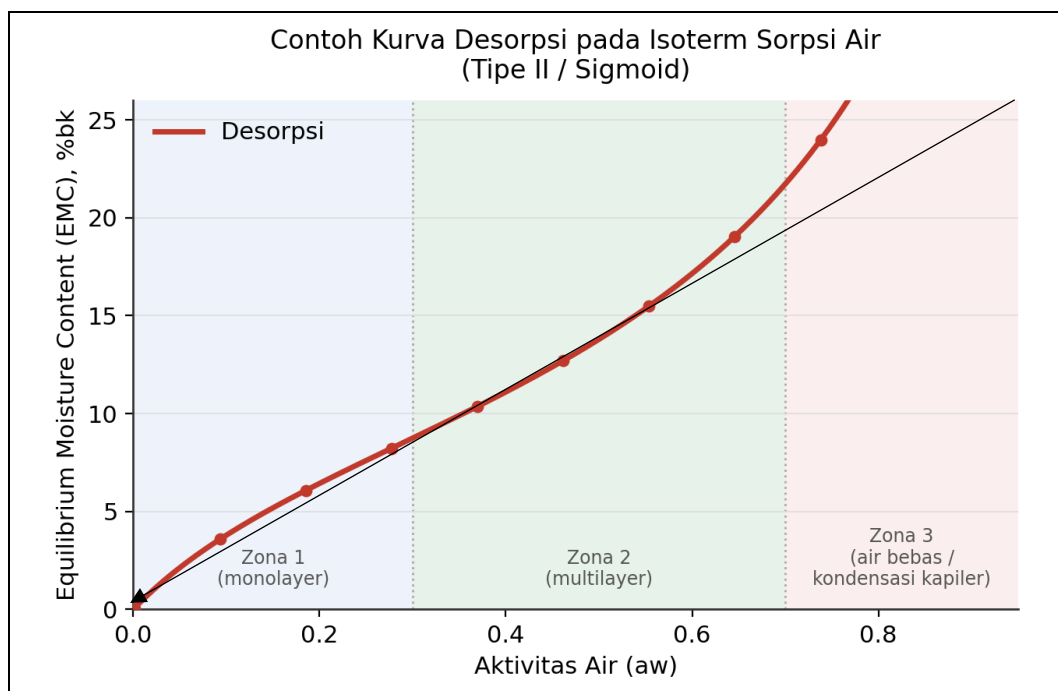
2.5.2 Desorpsi

Desorpsi merupakan proses pelepasan uap air dari bahan pangan menuju lingkungan ketika kadar air bahan lebih tinggi dibandingkan kadar air kesetimbangannya pada kondisi lingkungan tertentu. Selama proses ini molekul air yang sebelumnya berada di dalam bahan secara bertahap dilepaskan akibat adanya perbedaan tekanan uap air antara bahan dan udara sekitarnya (Rahman, 2009).

Pada bahan berpati, air yang berada di dalam pori-pori, ruang kapiler, maupun lapisan multilayer akan dilepaskan terlebih dahulu sebelum air yang terikat kuat pada gugus hidrofilik mulai berkurang. Karena sebagian molekul air masih

terperangkap di dalam struktur mikrokapiler dan matriks pati, kadar air kesetimbangan pada lintasan desorpsi umumnya lebih tinggi dibandingkan lintasan Absorpsi pada nilai aktivitas air yang sama (Van Den Berg & Bruin, 1981).

Dalam penelitian isoterm sorpsi, proses desorpsi umumnya dilakukan menggunakan bahan dengan kadar air awal tinggi yang kemudian dikeringkan hingga mencapai kondisi kesetimbangan pada berbagai tingkat aktivitas air. Hubungan antara aktivitas air dan kadar air kesetimbangan tersebut menghasilkan kurva desorpsi yang umumnya berada di atas kurva Absorpsi (Aviara, 2020).



Gambar II.3 Contoh Kurva Desorpsi pada Isoterm Sorpsi Air

2.6 Moisture Sorption Isotherm (MSI)

Moisture Sorption Isotherm (MSI) atau isoterm sorpsi uap air merupakan kurva yang menggambarkan hubungan kesetimbangan antara kadar air bahan (EMC) dan aktivitas air (a_w) pada suhu konstan. Kurva ini menunjukkan kemampuan suatu bahan pangan dalam menyerap maupun melepaskan uap air hingga mencapai kondisi setimbang dengan lingkungan sekitarnya. Informasi MSI banyak dimanfaatkan untuk mempelajari stabilitas produk selama penyimpanan,

menentukan kondisi pengemasan, serta memperkirakan umur simpan suatu bahan pangan (Rahman, 2009).

Pada bahan pangan berbasis pati seperti beras, kurva MSI umumnya berbentuk sigmoid atau tipe II. Kurva tersebut menggambarkan tiga zona ikatan air dalam bahan pangan, yaitu zona monolayer pada a_w rendah, zona multilayer pada a_w menengah, dan zona air bebas pada a_w tinggi. Keberadaan air bebas pada aktivitas air tinggi dapat meningkatkan risiko pertumbuhan mikroorganisme serta mempercepat berbagai reaksi kerusakan selama penyimpanan (Barbosa-Cánovas dkk., 2007).

Karakteristik MSI pada beras dipengaruhi oleh komposisi kimia dan struktur fisik butir beras. Kandungan amilosa, amilopektin, protein, dan lipid berperan dalam menentukan kemampuan bahan mengikat air. Perbedaan komposisi tersebut menyebabkan setiap varietas beras memiliki karakteristik sorpsi air yang berbeda sehingga diperlukan pengukuran MSI secara spesifik untuk masing-masing varietas (Juliano, 1993).

Fenomena histeresis sering dijumpai pada isoterm sorpsi beras, yaitu kondisi ketika kurva Absorpsi dan desorpsi tidak berada pada lintasan yang sama. Pada nilai aktivitas air tertentu, kadar air kesetimbangan yang diperoleh selama proses Absorpsi dapat berbeda dengan proses desorpsi. Perbedaan tersebut disebabkan oleh perubahan struktur internal bahan, seperti penyusutan pori dan perubahan konfigurasi matriks selama perpindahan air berlangsung (Al-Muhtaseb dkk., 2002).

Dalam penelitian beras Inpari 32 HDB, karakterisasi MSI diperlukan untuk memahami hubungan antara kadar air dan aktivitas air selama penyimpanan. Informasi tersebut dapat digunakan untuk mengevaluasi kestabilan mutu beras serta menentukan kondisi penyimpanan yang sesuai agar perubahan mutu fisik, kimia, dan organoleptik dapat diminimalkan (Labuza & Altunakar, 2007).

2.7 Fenomena Histeresis

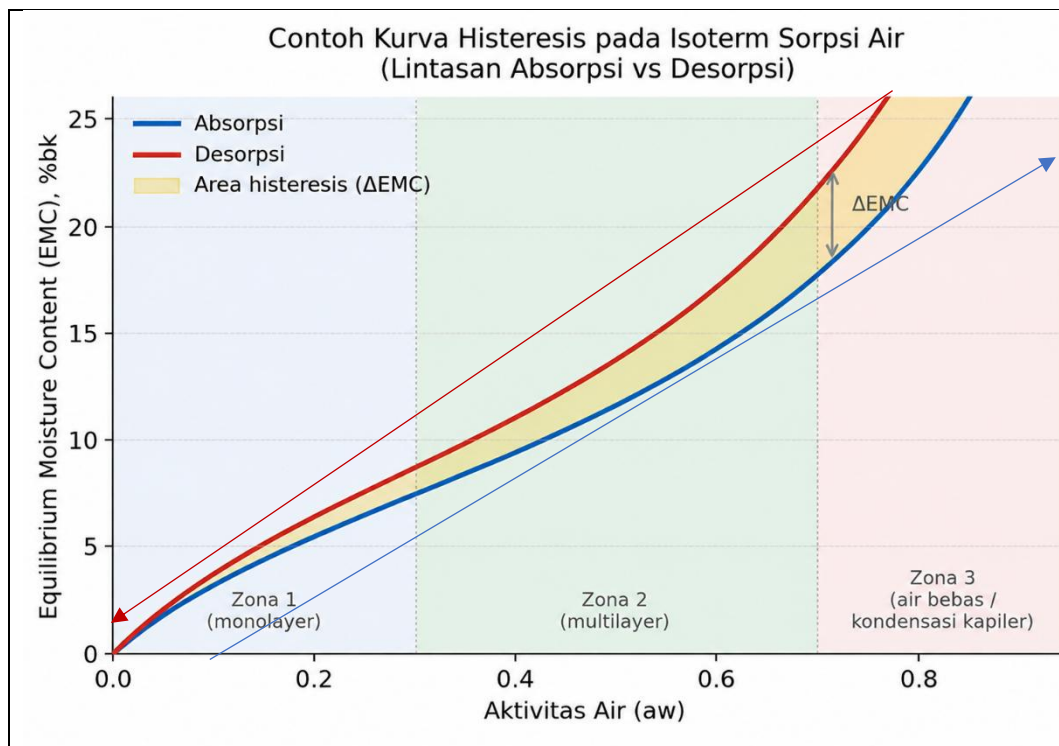
Salah satu karakteristik penting dari kurva MSI adalah fenomena histeresis, yaitu perbedaan nilai EMC antara kurva Absorpsi dan desorpsi pada nilai a_w yang sama, di mana kurva desorpsi secara konsisten berada di atas kurva Absorpsi (Aviara, 2020). Fenomena ini telah dilaporkan secara konsisten pada gabah, beras sosoh, serta komponen penyusunnya seperti granula pati amilosa, amilopektin, protein, dan selulosa (Mousa dkk., 2014). Pada beras, histeresis terjadi akibat perbedaan mekanisme fisik antara pengikatan air pada gugus hidrofilik selama Absorpsi dan pelepasan air dari struktur kapiler pati selama desorpsi (Rahman, 2009).

Besarnya histeresis dipengaruhi oleh komposisi pati, protein, lipid, ukuran pori, dan perubahan struktur mikro akibat proses pengeringan sebelumnya. Pada bahan pangan berbasis pati, proses pengeringan dapat menyebabkan sebagian gugus hidrofilik menjadi kurang dapat diakses kembali oleh molekul air selama Absorpsi, sehingga EMC pada kurva desorpsi cenderung lebih tinggi daripada kurva Absorpsi pada a_w yang sama (Labuza & Altunakar, 2020). Fenomena histeresis paling jelas teramati pada zona aktivitas air menengah hingga tinggi ($a_w > 0,30$), yaitu saat proses pembentukan lapisan multilayer dan kondensasi kapiler mendominasi mekanisme sorpsi (Taveesuvun dkk., 2022).

Dari perspektif manajemen gudang, kurva Absorpsi relevan untuk menggambarkan skenario beras yang menyerap kelembapan dari lingkungan gudang, sedangkan kurva desorpsi relevan untuk skenario pengeringan beras yang diterima dengan kadar air di atas batas SNI. Luas daerah histeresis dapat digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi stabilitas bahan terhadap perubahan kondisi lingkungan serta membantu penyusunan strategi penyimpanan yang lebih sesuai dengan karakteristik beras sosoh (Lomauro dkk., 1984).

Pada penelitian ini, karakteristik histeresis dianalisis berdasarkan perbedaan kurva Absorpsi dan desorpsi beras sosoh varietas Inpari 32 yang diperoleh pada suhu 30°C. Analisis tersebut bertujuan untuk menggambarkan perilaku sorpsi air beras

selama perubahan kadar air serta mendukung interpretasi hubungan antara aktivitas air dan *Equilibrium Moisture Content* (EMC). Informasi mengenai histeresis diharapkan dapat melengkapi karakterisasi isoterm sorpsi air sehingga estimasi EMC pada kondisi kelembapan relatif aktual Gudang BULOG dapat dilakukan dengan dasar ilmiah yang lebih komprehensif.



Gambar II.4 Contoh Kurva Histeresis pada Isoterm Sorpsi Air

Salah satu mekanisme yang banyak digunakan untuk menjelaskan terjadinya histeresis adalah *ink-bottle effect*. Mekanisme ini menggambarkan bahwa struktur pori bahan memiliki rongga berukuran relatif besar yang dihubungkan oleh leher pori yang lebih sempit. Pada proses Absorpsi, molekul air memasuki pori melalui leher sempit dan secara bertahap mengisi rongga pori seiring meningkatnya aktivitas air. Sebaliknya, pada proses desorpsi air yang telah berada di dalam rongga pori tidak dapat segera keluar karena pelepasannya dikendalikan oleh pengosongan leher pori yang sempit. Akibatnya, sebagian air masih tertahan di dalam struktur pori sehingga kadar air kesetimbangan pada lintasan desorpsi tetap lebih tinggi dibandingkan lintasan Absorpsi pada nilai aktivitas air yang sama. Mekanisme ini banyak ditemukan pada bahan berpori dan merupakan salah satu penjelasan utama

terjadinya histeresis akibat kondensasi kapiler (*capillary condensation*) (Thommes dkk., 2015).

Pada beras sosoh, mekanisme tersebut diduga berlangsung bersamaan dengan perubahan struktur matriks pati selama proses pengeringan dan pembasahan kembali, sehingga pelepasan dan penyerapan air tidak mengikuti lintasan yang sama. Oleh karena itu, fenomena histeresis pada beras tidak hanya dipengaruhi oleh geometri pori, tetapi juga oleh perubahan aksesibilitas gugus hidrofilik serta interaksi molekul air dengan komponen penyusun endosperma, terutama pati dan protein (Rahman, 2009).

2.8 Model Matematika MSI

Model matematika *Moisture Sorption Isotherm* (MSI) digunakan untuk menggambarkan hubungan antara kadar air kesetimbangan (EMC) dan aktivitas air (a_w) pada suhu tertentu. Pemodelan MSI berperan penting dalam menentukan karakteristik sorpsi air suatu bahan, memperkirakan stabilitas selama penyimpanan, serta menentukan kadar air monolayer yang berkaitan dengan kondisi penyimpanan optimum. Berbagai model matematis telah dikembangkan untuk menggambarkan fenomena sorpsi air pada bahan pangan, baik yang bersifat teoritis maupun empiris (Adawiyah & Soekarto, 2010).

Dalam penelitian ini digunakan dua model MSI yang umum diterapkan pada bahan pangan berbasis sereal, yaitu model GAB (*Guggenheim-Anderson-de Boer*) dan model Oswin. Kedua model tersebut dipilih karena mampu menggambarkan hubungan antara kadar air kesetimbangan dan aktivitas air pada bahan pangan higroskopis, serta banyak digunakan dalam penelitian isotherm sorpsi beras dan produk berbasis pati (Aviara, 2020).

2.8.1 Model GAB (*Guggenheim-Anderson-de Boer*)

Model GAB merupakan pengembangan dari model BET yang dirancang untuk menggambarkan isotherm sorpsi pada rentang aktivitas air yang lebih luas. Model

ini memiliki tiga parameter utama, yaitu kadar air monolayer (M_0), konstanta energi sorpsi lapisan pertama (C), dan konstanta multilayer (K). Model GAB direkomendasikan oleh proyek COST 90 sebagai model standar untuk bahan pangan karena mampu memberikan deskripsi yang baik pada rentang aktivitas air 0,05–0,90 dan menghasilkan nilai kadar air monolayer yang memiliki makna fisik yang jelas (Labuza & Altunakar, 2020).

Keunggulan utama model GAB adalah kemampuannya menggambarkan kurva isoterm sorpsi pada hampir seluruh rentang aktivitas air yang umum dijumpai selama penyimpanan pangan. Oleh karena itu, model ini banyak digunakan dalam penelitian sereal, tepung, dan produk pangan kering lainnya (Aviara, 2020).

2.8.2 Model Oswin

Model Oswin merupakan model empiris yang banyak digunakan untuk menggambarkan isoterm sorpsi bahan pangan berbasis pati dan sereal. Model ini memiliki bentuk persamaan yang relatif sederhana dengan dua parameter empiris yang diperoleh melalui proses regresi data. Kesederhanaan model tersebut menjadikan Oswin sering digunakan sebagai alternatif dalam pemodelan isoterm sorpsi berbagai produk pertanian dan pangan (Aviara, 2020).

Penelitian pada gabah varietas Ciherang dan Ciliwung menunjukkan bahwa model Oswin mampu memberikan tingkat kesesuaian yang baik dalam menggambarkan hubungan antara kadar air kesetimbangan dan aktivitas air, sehingga model ini layak digunakan sebagai salah satu model pembanding dalam penelitian isoterm sorpsi beras (Rahmawati dkk., 2025).

2.8.3 Evaluasi Kesesuaian Model

Kesesuaian model MSI dievaluasi dengan membandingkan nilai prediksi model terhadap data hasil pengamatan. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah koefisien determinasi (R^2) dan *Mean Relative Deviation* (MRD). Nilai R^2 yang semakin mendekati 1 menunjukkan kemampuan model yang semakin baik

dalam menjelaskan variasi data, sedangkan nilai MRD yang semakin kecil menunjukkan tingkat penyimpangan yang semakin rendah antara nilai hasil prediksi dan data aktual (Adawiyah & Soekarto, 2010).

Model dengan nilai R^2 tertinggi dan MRD terendah dipilih sebagai model terbaik dalam menggambarkan karakteristik isotherm sorpsi beras Inpari 32 HDB. Secara umum, nilai MRD kurang dari 10% menunjukkan bahwa model memiliki tingkat ketepatan yang baik dan dapat digunakan untuk merepresentasikan data isotherm sorpsi air secara memadai (Adawiyah & Soekarto, 2010).

2.9 Standar Mutu dan Kondisi Penyimpanan Beras di Gudang BULOG

Standar mutu beras di Indonesia diatur melalui Standar Nasional Indonesia (SNI) 6128:2020 yang ditetapkan oleh Badan Standardisasi Nasional (BSN). Standar ini mengklasifikasikan beras berdasarkan parameter fisik seperti derajat sosoh, butir kepala, butir patah, dan kadar air. Parameter kadar air menjadi parameter yang paling dinamis dan paling rentan mengalami perubahan selama penyimpanan di gudang tropis. BULOG menetapkan kadar air maksimum 14% (bb) sebagai syarat penerimaan beras, selain persyaratan bebas hama hidup dan bebas bau abnormal (BSN, 2020).

Pada level internasional, FAO, (2011) menetapkan bahwa kondisi penyimpanan beras ideal di iklim tropis memerlukan suhu di bawah 25°C dan RH di bawah 70% untuk meminimalkan risiko penurunan mutu. IRRI, (2013) secara lebih spesifik merekomendasikan kadar air beras 13–14% (bb) untuk penyimpanan jangka panjang lebih dari enam bulan pada suhu 25–30°C, dengan catatan bahwa pada suhu lebih tinggi dari 30°C, kadar air yang lebih rendah diperlukan untuk mempertahankan tingkat keamanan simpan yang setara. Ambang aktivitas air yang ditetapkan secara umum untuk keamanan penyimpanan beras jangka panjang adalah di bawah a_w 0,65, sementara a_w 0,70 ditetapkan sebagai ambang peringatan yang perlu segera ditindaklanjuti (FAO, 2011).

Kondisi lingkungan gudang Besar Baru BULOG Cimahi yang disurvei pada tanggal 29 April 2026 umumnya berada pada suhu harian 28–34°C dengan RH yang berfluktuasi antara 65–90% bergantung pada musim dan perubahan cuaca eksternal. Kondisi RH di atas 70% telah cukup untuk mendukung pertumbuhan kapang gudang seperti *Aspergillus* spp. dan *Penicillium* spp. yang berpotensi menghasilkan mikotoksin, dan risiko ini meningkat tajam pada RH di atas 80% (Magan & Aldred, 2007). Penetapan ambang batas kadar air 14% (bb) dalam SNI bersifat umum dan tidak mempertimbangkan karakteristik higroskopis spesifik per varietas, nilai a_w yang dihasilkan pada kadar air yang sama dapat berbeda antar varietas bergantung pada komposisi pati, protein, dan struktur butirnya.

Sistem pemantauan mutu yang ada saat ini di gudang BULOG masih bersifat insidental dan berbasis pengukuran kadar air konvensional, sehingga belum mampu mendeteksi secara dini perubahan kondisi lingkungan yang dapat memicu penurunan mutu sebelum gejala fisik menjadi nyata (Lestari & Kurniawan, 2021). Pemahaman yang lebih mendalam mengenai nilai EMC beras sesuai varietas Inpari 32 pada berbagai kondisi RH aktual gudang melalui pendekatan MSI dapat mengisi kesenjangan ini. Data tersebut memungkinkan evaluasi risiko penyimpanan tidak hanya berdasarkan kadar air aktual pada saat penerimaan, tetapi juga berdasarkan kadar air kesetimbangan yang akan dicapai beras apabila terpapar kondisi RH tertentu dalam jangka waktu penyimpanan yang panjang.

Bab III Metodologi Penelitian

Bab ini menguraikan mengenai: (3.1) Bahan dan Alat, (3.2) Metode Penelitian, (3.3) Prosedur Penelitian, (3.4) Analisis Data, serta (3.5) Jadwal Pelaksanaan Penelitian.

3.1 Bahan dan Alat

3.1.1 Bahan – Bahan Penelitian

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah beras sosoh varietas Inpari 32 yang diperoleh dari penggilingan padi di wilayah Jawa Barat. Beras sosoh yang digunakan adalah hasil penyosohan dengan derajat sosoh 90–95% yang setara dengan beras Bulog kelas medium. Bahan pendukung meliputi akuades (untuk penambahan air pada preparasi sampel).

3.1.2 Alat Penelitian

Peralatan utama yang digunakan meliputi: a_w meter (akurasi $\pm 0,03 a_w$) sebagai instrumen pengukuran utama, *Grain moisture meter portable* (akurasi $\pm 0,05\%$) untuk pengecekan kadar air awal, neraca analitik, *Dehydrator* (40°C) untuk pengeringan sampel, inkubator suhu 30°C untuk ekuilibrasi sampel pasca-preparasi, wadah plastik kedap udara (*sealed container*) untuk preparasi dan penyimpanan sampel, dan pipet berukuran untuk penambahan air secara presisi. Untuk analisis data digunakan perangkat lunak Microsoft Excel dan OriginPro untuk fitting model nonlinear.

3.2 Metode Penelitian

3.2.1 Rancangan Perlakuan

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif eksperimental dengan variabel bebas berupa tingkat kadar air sampel (10 taraf: 6%, 8%, 10%, 11%, 12%, 13%, 14%, 15%, 16%, dan 18%) dan jenis kurva Absorpsi dan desorpsi. Dua set sampel independen dipreparasi secara paralel menggunakan metode langsung, kemudian

nilai a_w masing-masing diukur menggunakan a_w meter. Setiap titik diukur dalam duplo (2 ulangan).

3.2.2 Rancangan Percobaan

Rancangan yang digunakan adalah rancangan pengukuran (*measurement design*): masing-masing kurva (Absorpsi dan desorpsi) dipreparasi pada beberapa tingkat kadar air (6%, 8%, 10%, 11%, 12%, 13%, 14%, 15%, 16%, dan 18%) dengan 2 ulangan per titik. Variasi antar ulangan dinyatakan sebagai simpangan baku dan koefisien variasi. Pendekatan ini sesuai dengan kaidah penentuan kurva sorpsi air yang berfokus pada pemodelan hubungan EMC– a_w .

3.2.3 Rancangan Analisis

Data EMC– a_w yang diperoleh dianalisis menggunakan dua model matematika (GAB dan Oswin) melalui regresi nonlinear (metode *Levenberg-Marquardt*). Pemilihan model terbaik dilakukan berdasarkan nilai R^2 tertinggi dan MRD terendah. Fenomena histeresis dianalisis dengan membandingkan nilai EMC kurva Absorpsi dan desorpsi pada aktivitas air (a_w) yang sama. Karena nilai a_w hasil pengukuran pada kedua kurva tidak identik, penentuan EMC pada a_w yang sama dilakukan melalui estimasi menggunakan persamaan model isoterm terbaik yang diperoleh dari hasil evaluasi model. Selisih EMC pada setiap nilai a_w digunakan sebagai indikator histeresis.

3.2.4 Rancangan Respon

Respon yang diamati dalam penelitian ini adalah:

1. Nilai a_w pada setiap tingkat kadar air untuk kurva Absorpsi dan desorpsi.
2. Nilai EMC (% berat kering) untuk kedua kurva.
3. Nilai parameter model (M_0 , C , K untuk GAB; A , B untuk Oswin).
4. Nilai R^2 dan MRD untuk pemilihan model terbaik.
5. Selisih EMC desorpsi dan Absorpsi sebagai indikator histeresis pada zona penyimpanan.

6. Nilai EMC pada a_w 0,70; 0,75; 0,80; dan 0,80 sebagai EMC kritis pada rentang RH gudang Bulog.

3.3 Prosedur Penelitian

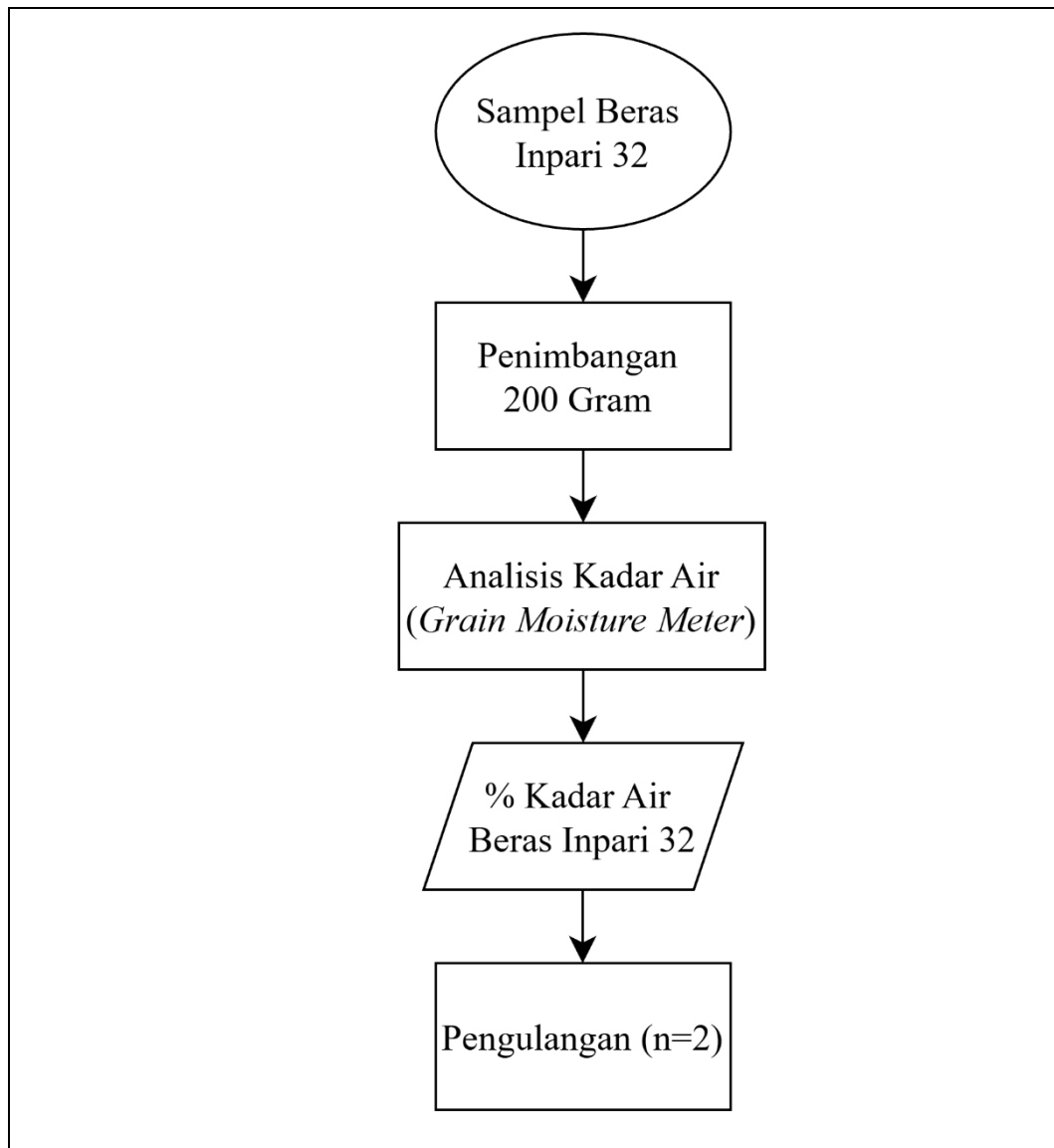
3.3.1 Analisis Kimia Beras Inpari 32

Prosedur preparasi sampel meliputi:

3.3.1.1 Analisis Kadar Air

1. Siapkan sampel beras sosoh varietas Inpari 32.
2. Timbang sebanyak 200 gram menggunakan timbangan analitik.
3. Sampel beras dimasukkan ke dalam ruang pengukuran alat *Grain Moisture Tester* (GMT) sesuai petunjuk penggunaan.
4. Hasil pengukuran berupa kadar air (%) dicatat sebagai kadar air sampel.
5. Pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali ulangan.

Secara skematik, prosedur dijelaskan pada Gambar III.1.

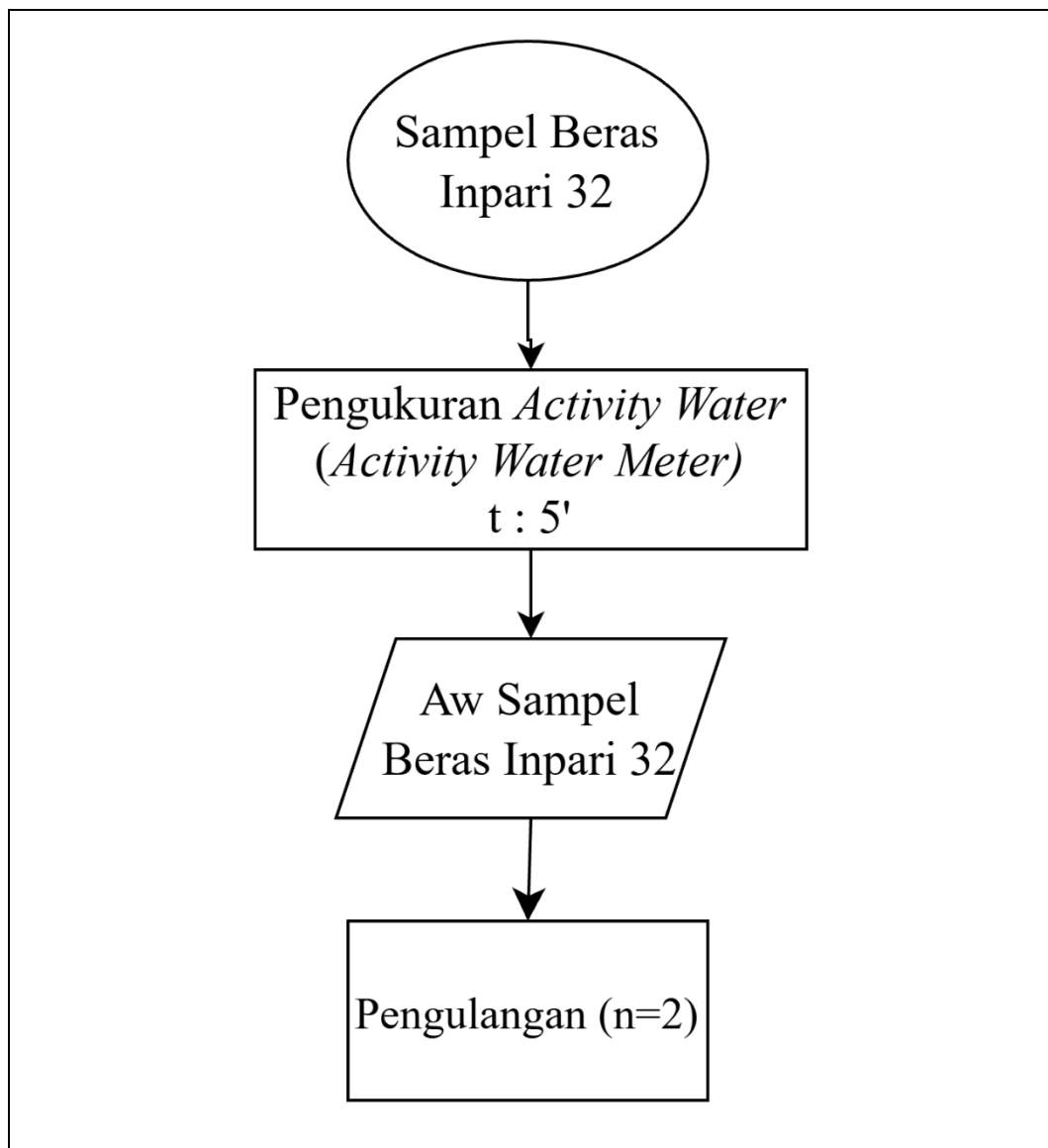


Gambar III.1. Prosedur Analisis Kimia Kadar Air Beras

3.3.1.2 Analisis Aktivitas Air

1. Siapkan sampel beras sosoh varietas Inpari 32.
2. Sampel dimasukkan ke dalam sampel *plate* (cawan pengukuran) hingga memenuhi volume yang dianjurkan.
3. Pengukuran dilakukan selama 5 menit atau hingga pembacaan nilai stabil.
4. Nilai aktivitas air (a_w) yang ditampilkan pada layar alat dicatat sebagai hasil pengukuran.
5. Pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali ulangan.

Secara skematik, prosedur dijelaskan pada Gambar III.2.



Gambar III.2. Prosedur Analisis Kimia Aktivitas Air Beras

3.3.2 Pengkondisian Kadar Air Beras Inpari 32

Prosedur Pengkondisian Kadar air Beras Inpari 32 meliputi:

3.3.2.1 Pengkondisian Sampel Absorpsi

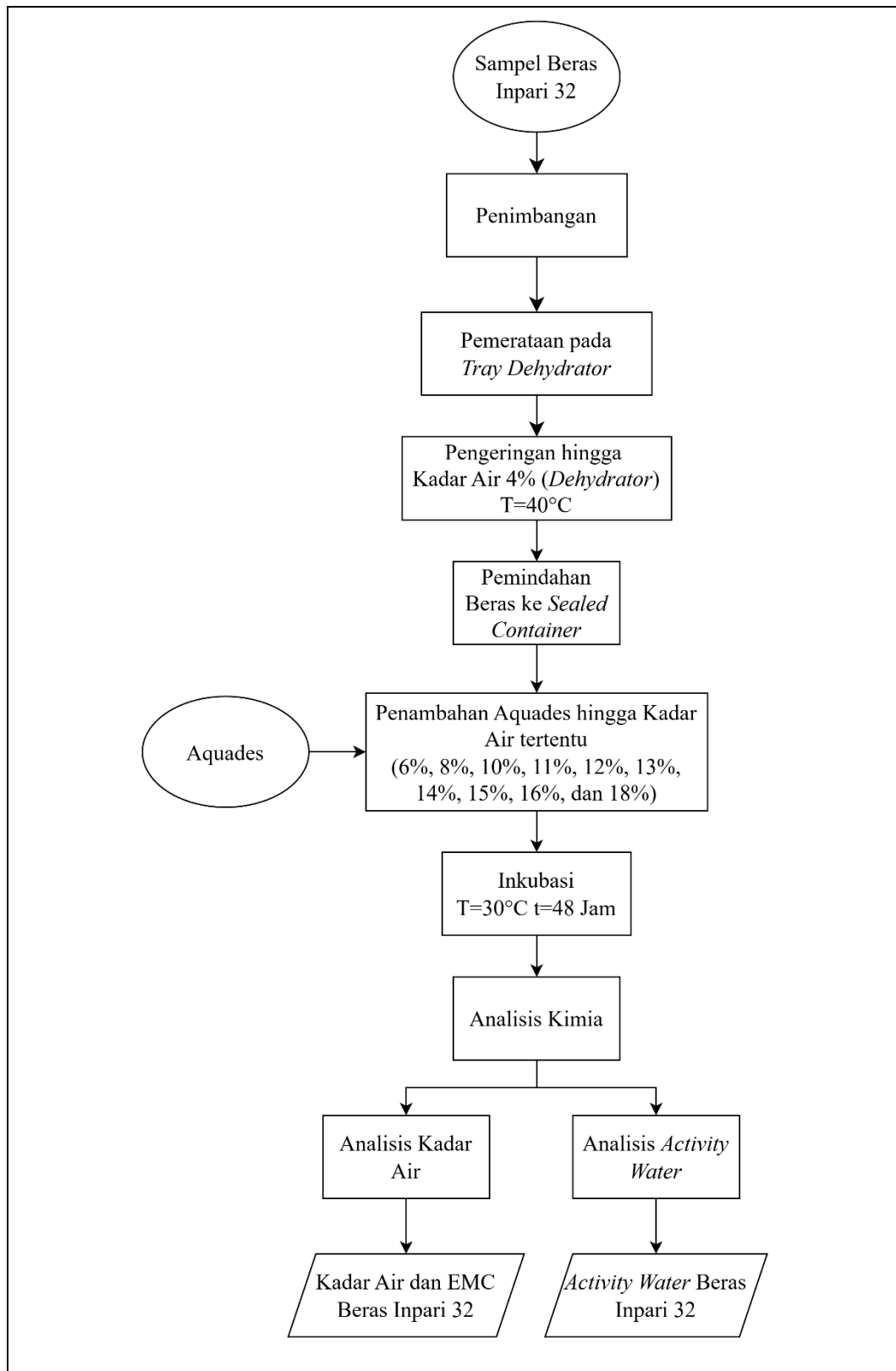
1. Siapkan Sampel, kemudian di timbang berat awal.
2. Sampel dikeringkan hingga mencapai kadar air rendah yaitu 4% sebagai kondisi awal homogen.
3. Setelah mencapai kadar air 4%, Sampel kemudian dimasukkan ke dalam wadah kedap udara (*sealed container*) yang dibagi menjadi 10 kelompok dengan kadar air target masing-masing, yaitu 6%, 8%, 10%, 11%, 12%, 13%, 14%, 15%, 16%, dan 18%.
4. Sampel dilakukan penambahan air secara presisi menggunakan pipet untuk mencapai kadar air target masing-masing kelompok, Air ditambahkan secara merata ke dalam sampel untuk memastikan distribusi kelembaban yang homogen.
5. Sampel diinkubasi pada suhu 30°C selama 48 jam untuk mencapai kesetimbangan kelembaban sebelum pengukuran.
6. Sampel kemudian dilakukan pengecekan Kadar Air dan Aktivitas Air
7. Nilai kadar air yang diperoleh dalam basis basah (%bb) selanjutnya dikonversi ke dalam basis kering (%bk).

Air yang ditambahkan untuk mencapai kadar air target menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Volume\ Air\ (ml) = \left(\frac{MC\ Target\ (\%) - MC\ Awal\ (\%)}{100 - MC\ Target\ (\%)} \right) \times Bobot\ Sampel$$

Rumus III.1 Rumus Penambahan Air Untuk MC Target

Secara skematik, prosedur dijelaskan pada Gambar III.3.

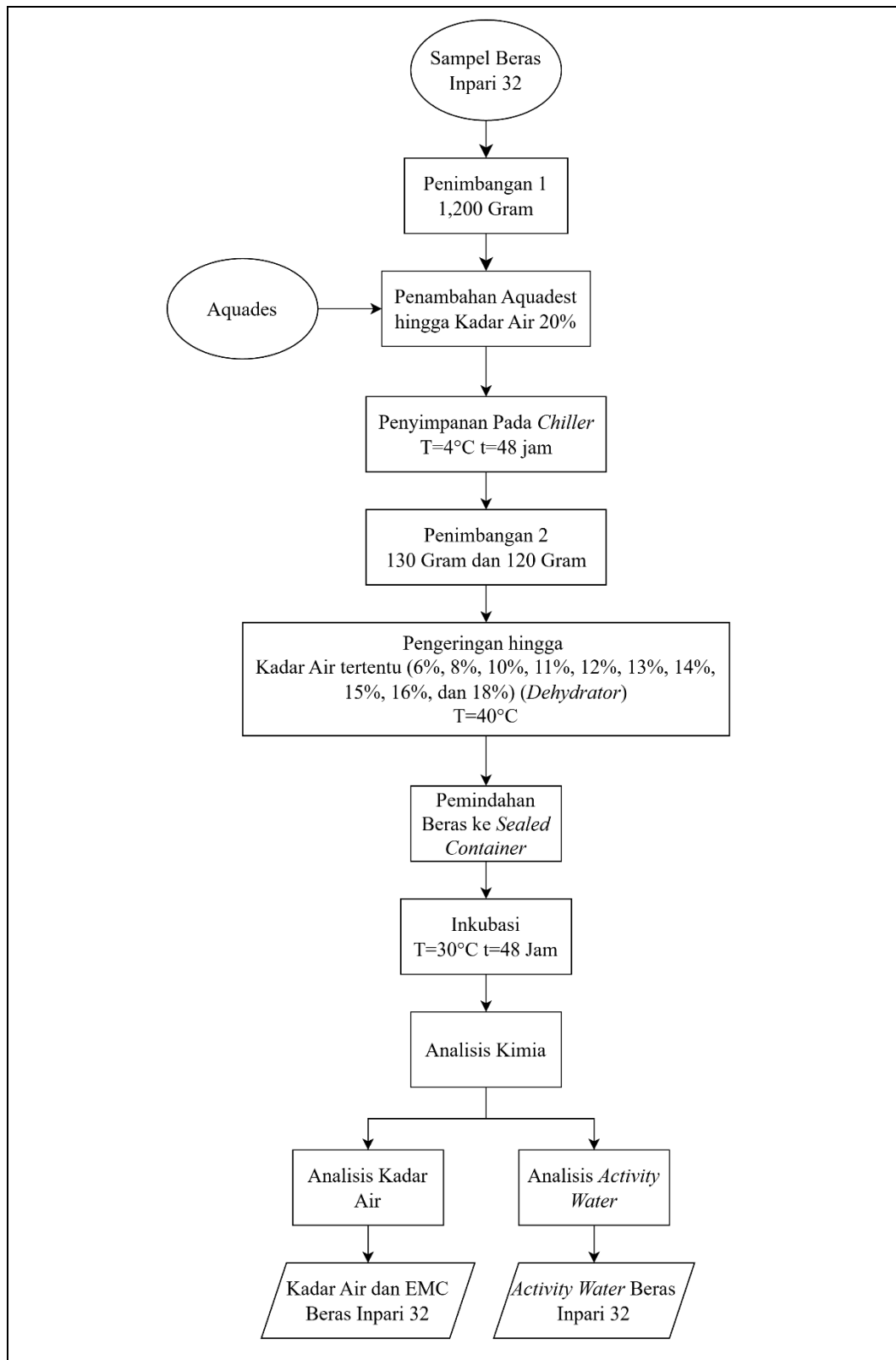


Gambar III.3 Prosedur Pengkondisian Sampel Absorpsi

3.3.2.2 Pengkondisian Sampel Desorpsi

1. Siapkan Sampel, kemudian di timbang berat awal.
2. Sampel beras Inpari 32 terlebih dahulu ditambahkan air hingga mencapai kadar air tinggi yaitu 20% sebagai kondisi awal homogen.
3. Sampel dimasukan ke wadah kedap udara kemudian, di diamkan di chiller dengan suhu 4°C dengan waktu 48 jam agar pendistribusian air merata.
4. Sampel kemudian dikeringkan untuk menghasilkan 10 kelompok dengan kadar air target masing-masing, yaitu 6%, 8%, 10%, 11%, 12%, 13%, 14%, 15%, 16%, dan 18%.
5. Sampel kemudian dimasukkan ke dalam wadah kedap udara (*sealed container*).
6. Sampel diinkubasi pada suhu 30°C selama 48 jam untuk mencapai kesetimbangan kelembaban sebelum pengukuran.
7. Sampel kemudian dilakukan pengecekan Kadar Air dan Aktivitas Air.
8. Nilai kadar air yang diperoleh dalam basis basah (%bb) selanjutnya dikonversi ke dalam basis kering (%bk).

Secara skematik, prosedur dijelaskan pada Gambar III.4.



Gambar III.4 Prosedur Pengkondisian Sampel Desorpsi

3.4 Analisis Data

3.4.1 Perhitungan *Equilibrium Moisture Content* (EMC)

Nilai kadar air kesetimbangan (*Equilibrium Moisture Content*, EMC) diperoleh dari hasil pengukuran kadar air aktual dalam basis basah (*wet basis*) yang selanjutnya dikonversi ke basis kering (*dry basis*). Konversi ini dilakukan karena sebagian besar model isoterm sorpsi air menyatakan kadar air dalam satuan persen basis kering (%bk), sehingga hasil penelitian dapat dibandingkan dengan penelitian lain serta digunakan dalam proses pemodelan isoterm (Labuza, 1984).

Perhitungan EMC dilakukan menggunakan rumus berikut:

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{\text{Kadar Air Aktual } (\%bb)}{100 - \text{Kadar Air Aktual } (\%bb)} \right) \times 100$$

Rumus III.2 Rumus Konversi Kadar Air Ke EMC

Nilai EMC yang diperoleh kemudian dipasangkan dengan nilai aktivitas air (a_w) pada masing-masing perlakuan Absorpsi dan desorpsi untuk membentuk kurva *Moisture Sorption Isotherm* (MSI) serta digunakan sebagai data masukan pada proses pemodelan matematis.

3.4.2 Penyusunan Kurva *Moisture Sorption Isotherm* (MSI)

Kurva *Moisture Sorption Isotherm* (MSI) disusun untuk menggambarkan hubungan antara aktivitas air (a_w) dengan kadar air kesetimbangan (*Equilibrium Moisture Content*) pada suhu konstan. Dalam penelitian ini, kurva MSI diperoleh dengan memplot nilai aktivitas air (a_w) sebagai sumbu horizontal (x) dan nilai EMC (%bk) sebagai sumbu vertikal (y) untuk masing-masing proses Absorpsi dan desorpsi. Kurva tersebut digunakan untuk mengamati karakteristik sorpsi air beras sosoh varietas Inpari 32 serta mengetahui perubahan kadar air kesetimbangan akibat perubahan aktivitas air selama penyimpanan (Van Den Berg & Bruin, 1981).

Penyusunan kurva MSI dilakukan secara terpisah untuk data Absorpsi dan desorpsi, kemudian kedua kurva ditampilkan dalam satu grafik untuk memperlihatkan adanya perbedaan lintasan sorpsi (*hysteresis loop*). Bentuk kurva yang dihasilkan selanjutnya diamati dan dibandingkan dengan karakteristik isoterm sorpsi bahan pangan yang telah dilaporkan dalam berbagai penelitian. Menurut Brunauer dkk., (1940), isoterm sorpsi bahan pangan umumnya dapat diklasifikasikan menjadi lima tipe, di mana bahan pangan berpati seperti beras umumnya menunjukkan kurva isoterm berbentuk sigmoid (Tipe II). Kurva tersebut ditandai dengan peningkatan EMC yang relatif lambat pada aktivitas air rendah, kemudian meningkat lebih cepat pada aktivitas air menengah hingga tinggi akibat meningkatnya jumlah molekul air yang terikat pada permukaan bahan.

Kurva MSI yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam proses pemodelan isoterm sorpsi menggunakan model GAB dan Oswin serta sebagai acuan dalam analisis fenomena histeresis antara proses Absorpsi dan desorpsi.

3.4.3 Pemodelan *Moisture Sorption Isotherm* (MSI)

Pemodelan *Moisture Sorption Isotherm* (MSI) dilakukan untuk memperoleh persamaan matematis yang dapat menggambarkan hubungan antara aktivitas air (a_w) dengan kadar air kesetimbangan (EMC). Model matematika tersebut digunakan untuk memprediksi perubahan kadar air kesetimbangan pada berbagai kondisi aktivitas air serta mempermudah interpretasi karakteristik sorpsi air beras selama penyimpanan (Labuza, 1984).

Pada penelitian ini digunakan dua model isoterm sorpsi, yaitu model *Guggenheim-Anderson-de Boer* (GAB) dan model Oswin. Model GAB dipilih karena mampu menggambarkan isoterm sorpsi bahan pangan pada rentang aktivitas air yang luas (sekitar a_w 0,10–0,90) dan direkomendasikan sebagai model standar dalam penelitian bahan pangan. Sementara itu, model Oswin dipilih sebagai model empiris pembanding karena memiliki bentuk persamaan yang sederhana dan telah

banyak diaplikasikan pada penelitian sereal serta bahan pangan berpati (Van Den Berg & Bruin, 1981).

Estimasi parameter masing-masing model dilakukan menggunakan fitur *Nonlinear Curve Fit (NLFit)* pada perangkat lunak OriginPro. Estimasi parameter dilakukan dengan metode *nonlinear least squares* menggunakan algoritma *Levenberg-Marquardt*, yaitu algoritma optimasi iteratif yang bertujuan meminimumkan jumlah kuadrat galat (*Sum of Squared Error/SSE*).

3.4.3.1 Model Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB)

Persamaan model GAB dinyatakan sebagai berikut (Van Den Berg & Bruin, 1981):

$$M = \frac{X_m C K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)}$$

Rumus III.3 Rumus Pemodelan GAB

Keterangan:

- M = kadar air kesetimbangan (%bk)
- X_M = kadar air monolayer (%bk)
- C = konstanta Guggenheim
- K = konstanta multilayer
- a_w = aktivitas air

3.4.3.2 Model Oswin

Persamaan model Oswin dinyatakan sebagai berikut (Lomauro dkk., 1984):

$$M = a \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^b$$

Rumus III.4 Rumus Permodelan Oswin

Keterangan:

- M = kadar air kesetimbangan (%bk)

- a dan b = konstanta model
- a_w = aktivitas air

Parameter model GAB dan Oswin yang diperoleh melalui proses optimasi selanjutnya digunakan untuk menghasilkan kurva prediksi isoterm sorpsi dan dibandingkan dengan data hasil pengamatan. Model yang memiliki nilai R^2 tertinggi dan MRD terendah dipilih sebagai model yang paling sesuai untuk menggambarkan karakteristik sorpsi air beras sosoh varietas Inpari 32 dan digunakan sebagai dasar dalam analisis karakteristik sorpsi air serta estimasi kadar air kesetimbangan pada kondisi penyimpanan.

3.4.4 Evaluasi Model *Moisture Sorption Isotherm* (MSI)

3.4.4.1 Koefisien Determinasi (R^2)

Koefisien determinasi (R^2) digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian antara data hasil pengamatan dan data hasil prediksi model. Nilai R^2 berkisar antara 0 hingga 1, di mana nilai yang semakin mendekati 1 menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan yang semakin baik dalam menjelaskan hubungan antara aktivitas air dan kadar air kesetimbangan (Lomauro dkk., 1984). Nilai R^2 dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_{exp,i} - M_{pred,i})^2}{\sum_{i=1}^n (M_{exp,i} - \bar{M}_{exp})^2}$$

Rumus III.5 Rumus Koefisien Determinasi (R^2)

Keterangan:

- R^2 = koefisien determinasi
- M_{exp} = kadar air kesetimbangan hasil pengamatan (%bk)
- M_{pred} = kadar air kesetimbangan hasil prediksi model (%bk)
- $\bar{M}_{exp}$ = rata-rata kadar air kesetimbangan hasil pengamatan (%bk)
- n = jumlah data pengamatan

3.4.4.2 Mean Relative Deviation (MRD)

Selain koefisien determinasi, ketepatan model juga dievaluasi menggunakan nilai *Mean Relative Deviation* (MRD). Parameter ini menunjukkan rata-rata penyimpangan relatif antara nilai kadar air kesetimbangan hasil pengamatan dan nilai hasil prediksi model. Model dengan nilai MRD yang lebih kecil memiliki tingkat akurasi prediksi yang lebih baik (Lomauro dkk., 1984). Nilai MRD dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$MRD(\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{M_{exp,i} - M_{pred,i}}{M_{exp,i}} \right|$$

Rumus III.6 Rumus *Mean Relative Deviation* (MRD)

Keterangan:

- MRD = *Mean Relative Deviation* (%)
- M_{exp} = kadar air kesetimbangan hasil pengamatan (%bk)
- M_{pred} = kadar air kesetimbangan hasil prediksi model (%bk)
- n = jumlah data pengamatan

3.4.5 Analisis Histeresis Sorpsi Air

Analisis histeresis dilakukan untuk mengevaluasi perbedaan antara kurva Absorpsi dan desorpsi beras sosoh varietas Inpari 32 pada nilai aktivitas air (a_w) yang sama. Fenomena histeresis menunjukkan bahwa lintasan penyerapan air (Absorpsi) tidak sama dengan lintasan pelepasan air (desorpsi), sehingga nilai *Equilibrium Moisture Content* (EMC) pada proses desorpsi umumnya lebih tinggi dibandingkan proses Absorpsi (Labuza, 1984).

Nilai EMC Absorpsi dan desorpsi terlebih dahulu dimodelkan menggunakan model GAB dan Oswin. Selanjutnya, model terbaik dipilih berdasarkan nilai koefisien determinasi (R^2) tertinggi dan *Mean Relative Deviation* (MRD) terendah. Model yang memberikan hasil evaluasi terbaik kemudian digunakan untuk mengestimasi

nilai EMC pada rentang aktivitas air 0,50–0,82 dengan interval 0,02 sehingga diperoleh titik-titik EMC yang lebih rapat untuk analisis histeresis.

Besarnya histeresis pada setiap tingkat aktivitas air kemudian ditentukan berdasarkan selisih antara nilai EMC desorpsi hasil interpolasi dan nilai EMC Absorpsi pada aktivitas air yang sama. Dalam penelitian ini, selisih tersebut dinyatakan sebagai ΔEMC dan dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\Delta EMC = EMC_{desorpsi} - EMC_{adsorpsi}$$

Rumus III.7 Rumus Selisih EMC

Keterangan:

- ΔEMC = selisih kadar air kesetimbangan antara proses desorpsi dan Absorpsi (%bk)
- $EMC_{desorpsi}$ = nilai EMC desorpsi hasil interpolasi (%bk)
- $EMC_{Absorpsi}$ = nilai EMC Absorpsi (%bk)

Nilai ΔEMC digunakan sebagai indikator besarnya fenomena histeresis pada setiap tingkat aktivitas air. Nilai ΔEMC yang positif menunjukkan bahwa kadar air kesetimbangan hasil desorpsi lebih tinggi dibandingkan kadar air kesetimbangan hasil Absorpsi pada aktivitas air yang sama. Sebaliknya, nilai ΔEMC yang semakin kecil menunjukkan bahwa perbedaan karakteristik sorpsi antara kedua proses semakin berkurang. Hasil analisis ini selanjutnya digunakan untuk menjelaskan pengaruh riwayat kadar air terhadap karakteristik sorpsi air beras sosoh varietas Inpari 32 serta implikasinya terhadap estimasi kadar air kesetimbangan selama penyimpanan di gudang BULOG.

3.5 Jadwal Pelaksanaan Penelitian

Tabel III.1. Jadwal Penelitian

No.	Uraian Kegiatan	2026					
		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						
4.	Seminar Usulan Penelitian						
5.	Pelaksanaan Penelitian						
6.	Pengolahan Data Hasil Penelitian						
7.	Proses Bimbingan dengan Pembimbing						
8.	Sidang Tugas Akhir						

Bab IV Hasil dan Pembahasan

Bab ini menyajikan dan membahas data yang telah diolah untuk selanjutnya dilakukan pembahasan yang terdiri dari: (4.1) Karakteristik Kimia Beras Inpari 32, (4.2) Pengkondisian Sampel Beras Inpari 32, (4.3) Penentuan *Equilibrium Moisture Content* (EMC), (4.4) Karakteristik Kurva Sorpsi Air Beras Inpari 32, (4.5) Permodelan *Moisture Sorption Isotherm* (MSI), (4.6) Evaluasi Model Matematis *Moisture Sorption Isotherm*, (4.7) Histeresis Kurva *Moisture Sorption Isotherm* (MSI), dan (4.8) Implikasi *Moisture Sorption Isotherm* terhadap Kondisi Penyimpanan Beras.

4.1 Karakteristik Kimia Beras Inpari 32

Dalam penelitian ini, Beras Inpari 32 dianalisis untuk parameter kimia. Analisis terhadap Beras tersebut mencakup pengukuran aktivitas air (a_w) dan kadar air. Hasil dari analisis tersebut dapat dilihat pada Tabel IV.1., yang menunjukkan karakteristik utama beras Inpari 32.

Tabel IV.1. Karakteristik Utama Beras Inpari 32

Karakteristik kimia Beras Inpari 32	Nilai
Kadar Air (%)	$13,2 \pm 0,5$
Aktivitas Air (a_w)	$0,67 \pm 0,03$

Keterangan: Hasil dinyatakan sebagai rata-rata standar deviasi (SD)

4.1.1 Kadar Air Beras Inpari 32

Kadar air merupakan salah satu parameter penting yang menentukan mutu dan daya simpan beras selama penyimpanan. Oleh karena itu, pengukuran kadar air awal dilakukan untuk memastikan kondisi awal sampel sebelum diberikan perlakuan pengkondisian pada proses Absorpsi dan desorpsi (Labuza & Altunakar, 2020),

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel IV.1, kadar air awal beras sosoh varietas Inpari 32 pada penelitian ini adalah sebesar $13,2\% \pm 0,5\%$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sampel yang digunakan memiliki kondisi awal yang baik sebelum dilakukan perlakuan pengkondisian kadar air untuk proses Absorpsi dan desorpsi. Berdasarkan SNI 6128:2020 tentang Beras, kadar air maksimum yang dipersyaratkan untuk beras adalah 14,0% (basis basah). Dengan demikian, kadar air awal beras pada penelitian ini masih berada di bawah batas maksimum yang ditetapkan sehingga telah memenuhi persyaratan mutu nasional untuk beras. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa bahan penelitian berada pada kondisi yang cukup stabil sebagai bahan baku penelitian dan layak digunakan untuk tahapan pengkondisian kadar air selanjutnya (BSN, 2020).

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian oleh Champagne dkk., 2004, yang melaporkan bahwa kadar air beras yang disimpan pada kisaran 12–14% mampu mempertahankan mutu beras lebih baik dibandingkan kadar air yang lebih tinggi. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kadar air selama penyimpanan dapat mempercepat aktivitas mikroba dan menyebabkan perubahan mutu, seperti munculnya aroma tidak normal (*off-flavor*), terutama pada kadar air di atas 16%. Dengan demikian, kadar air awal sebesar 13,2% pada penelitian ini menunjukkan bahwa sampel berada pada kisaran yang sesuai untuk mempertahankan mutu awal beras sebelum diberikan perlakuan penelitian.

4.1.2 Aktivitas Air Beras Inpari 32

Aktivitas air (a_w) merupakan salah satu parameter penting yang menunjukkan ketersediaan air bebas dalam bahan pangan dan berpengaruh terhadap stabilitas selama penyimpanan. Oleh karena itu, pengukuran aktivitas air awal dilakukan untuk mengetahui kondisi awal beras sosoh varietas Inpari 32 sebelum proses pengkondisian kadar air (Labuza & Altunakar, 2020).

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel IV.1, beras sosoh varietas Inpari 32 memiliki nilai aktivitas air sebesar $0,67 \pm 0,03$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar air di dalam beras masih berada dalam bentuk air terikat sehingga jumlah air bebas yang tersedia relatif terbatas. Secara umum, sebagian besar bakteri memerlukan aktivitas air di atas 0,90 untuk dapat tumbuh, sedangkan khamir umumnya memerlukan aktivitas air di atas 0,88, dan sebagian besar kapang memerlukan aktivitas air sekitar 0,70 atau lebih. Dengan demikian, nilai aktivitas air awal sebesar 0,67 mengindikasikan bahwa kondisi awal beras relatif stabil karena tidak mendukung pertumbuhan sebagian besar bakteri dan khamir (Chirife dkk., 1996).

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Chirife dkk., 1996, yang menyatakan bahwa aktivitas air merupakan parameter utama dalam mengevaluasi stabilitas pangan karena berkaitan langsung dengan ketersediaan air bebas yang dapat dimanfaatkan oleh mikroorganisme maupun terlibat dalam berbagai reaksi penurunan mutu. Penelitian tersebut menjelaskan bahwa bahan pangan dengan nilai aktivitas air di bawah kisaran pertumbuhan sebagian besar mikroorganisme memiliki stabilitas penyimpanan yang lebih baik dibandingkan bahan dengan aktivitas air yang lebih tinggi. Oleh karena itu, nilai aktivitas air awal sebesar 0,67 pada penelitian ini menunjukkan bahwa beras sosoh varietas Inpari 32 berada pada kondisi awal yang cukup stabil dan sesuai sebagai bahan penelitian.

4.2 Pengkondisian Kadar Air Beras Inpari 32

4.2.1 Pengkondisian Sampel Absorpsi

Pengkondisian kadar air dilakukan untuk memperoleh sampel dengan kadar air target yang homogen sebelum pengukuran aktivitas air dan kadar air kesetimbangan (EMC). Pada proses Absorpsi, sampel dikeringkan terlebih dahulu, kemudian ditambahkan air sesuai kebutuhan dan disimpan dalam wadah tertutup agar terjadi redistribusi air secara merata di dalam bahan (Basunia & Abe, 1999).

Berdasarkan hasil pengukuran, kadar air aktual pada setiap perlakuan Absorpsi menunjukkan nilai yang mendekati kadar air target yang telah ditentukan. Hasil pengkondisian kadar air sampel Absorpsi disajikan pada Tabel IV.2.

Tabel IV.2 Hasil Pengkondisian Sampel Absorpsi

Target Kadar Air (%)	Berat Awal (g)	Air yang Ditambahkan (ml)	Kadar Air Aktual (%bb)	a_w
6	100	1,49	$6,8 \pm 0,22$	0,55
8	100	3,7	$7,8 \pm 0,28$	0,59
10	100	6	$10,7 \pm 0,28$	0,66
11	100	7,2	$11,6 \pm 0,10$	0,69
12	100	8,4	$12,6 \pm 0,50$	0,73
13	100	9,7	$12,9 \pm 0,10$	0,75
14	100	10,93	$14,4 \pm 0,14$	0,76
15	100	12,24	$14,6 \pm 0,22$	0,79
16	100	13,57	$15,1 \pm 0,14$	0,81
18	100	16,34	$17,7 \pm 0,42$	0,82

Berdasarkan Tabel IV.2, proses pengkondisian Absorpsi mampu menghasilkan kadar air aktual yang mendekati kadar air target pada seluruh taraf perlakuan. Kadar air aktual yang diperoleh berada pada kisaran 6,8–17,7%, sedangkan kadar air target yang direncanakan berada pada kisaran 6–18%. Selisih antara kadar air target dan kadar air aktual relatif kecil, yaitu sekitar 0,1–0,8%, sehingga menunjukkan bahwa metode pengkondisian yang diterapkan telah mampu menghasilkan variasi kadar air sesuai dengan rancangan penelitian. Perbedaan kecil tersebut masih dapat diterima karena selama proses pengkondisian terjadi difusi air dari permukaan menuju bagian dalam butir beras yang berlangsung secara bertahap hingga mencapai distribusi yang lebih homogen. Selain itu, variasi ukuran butir, struktur endosperma, ketelitian penambahan air, dan proses pengukuran kadar air juga dapat menyebabkan sedikit penyimpangan antara kadar air target dan kadar air aktual.

Seiring dengan meningkatnya kadar air aktual, nilai aktivitas air (a_w) juga menunjukkan kecenderungan meningkat, yaitu dari 0,55 pada kadar air aktual 6,8% menjadi 0,82 pada kadar air aktual 17,7%. Kecenderungan tersebut menunjukkan bahwa penambahan air selama proses pengkondisian meningkatkan jumlah air bebas yang tersedia di dalam bahan.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Basunia & Abe, 1999, yang melaporkan bahwa proses pengkondisian kadar air pada beras umumnya menghasilkan kadar air aktual yang mendekati kadar air target, meskipun tidak selalu sama. Penelitian tersebut menjelaskan bahwa penyimpangan kecil antara kadar air target dan kadar air aktual merupakan kondisi yang umum terjadi karena proses difusi air menuju bagian dalam butir memerlukan waktu hingga tercapai distribusi air yang seragam. Oleh karena itu, hasil pengkondisian pada penelitian ini menunjukkan bahwa metode yang digunakan telah berhasil menghasilkan sampel dengan variasi kadar air yang sesuai untuk tahap pengukuran sifat sorpsi selanjutnya.

4.2.2 Pengkondisian Sampel Desorpsi

Pengkondisian sampel desorpsi dilakukan untuk memperoleh sampel dengan kadar air target melalui proses pengeringan dari kondisi kadar air tinggi. Sampel dikeringkan hingga mencapai kadar air yang diinginkan, kemudian disimpan dalam wadah tertutup agar distribusi air di dalam bahan menjadi homogen sebelum dilakukan pengukuran aktivitas air (a_w) dan kadar air kesetimbangan (EMC) (Basunia & Abe, 1999).

Berdasarkan hasil pengukuran setelah proses pengkondisian, diperoleh nilai kadar air aktual dan aktivitas air pada setiap taraf perlakuan desorpsi. Hasil pengukuran tersebut disajikan pada Tabel IV.3.

Tabel IV.3 Hasil Pengkondisian Sampel Desorpsi

Target KA (%)	Berat Awal (g)	KA Aktual (%bb)	a _w
6	130	5,8 ± 0,28	0,49
8	130	7,5 ± 0,10	0,56
10	120	9,5 ± 0,10	0,59
11	120	10,9 ± 0,00	0,63
12	120	12,1 ± 0,54	0,67
13	120	12,7 ± 0,10	0,69
14	120	13,7 ± 0,10	0,73
15	120	14,9 ± 0,10	0,74
16	120	15,8 ± 0,00	0,78
18	120	17,7 ± 0,10	0,8

Berdasarkan Tabel IV.3, kadar air aktual hasil pengkondisian berada pada kisaran 5,8–17,7%, sedangkan nilai aktivitas air berkisar antara 0,49–0,80. Secara umum, kadar air aktual pada seluruh perlakuan telah mendekati kadar air target yang direncanakan, dengan selisih yang relatif kecil. Hal ini menunjukkan bahwa proses pengkondisian desorpsi mampu menghasilkan variasi kadar air yang sesuai untuk tahapan pengukuran selanjutnya. Pada perlakuan dengan kadar air target 6% dan 8%, digunakan berat awal sampel sebesar 130 g, sedangkan pada perlakuan kadar air target 10–18% digunakan berat awal 120 g. Perbedaan berat awal tersebut dilakukan untuk mengantisipasi penyusutan massa selama proses pengeringan. Pada perlakuan dengan kadar air target yang lebih rendah, jumlah air yang diuapkan lebih besar sehingga berat sampel setelah pengeringan berpotensi berada di bawah batas minimum analisis kadar air. Oleh karena itu, massa awal sampel ditambah agar jumlah sampel yang tersedia setelah pengeringan tetap memenuhi persyaratan analisis laboratorium. Selain itu, nilai aktivitas air menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan meningkatnya kadar air aktual. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi kadar air yang masih tersisa di dalam butir beras, semakin besar pula jumlah air bebas yang tersedia.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian San Martin dkk. (2001) yang melaporkan bahwa proses pengkondisian pada penelitian isotherm sorpsi menghasilkan kadar air aktual yang mendekati kadar air target setelah sampel mencapai kondisi ekuilibrium. Penelitian tersebut menjelaskan bahwa sedikit perbedaan antara kadar air target dan kadar air aktual merupakan fenomena yang umum terjadi karena proses perpindahan air di dalam butir berlangsung secara bertahap hingga tercapai distribusi kadar air yang seragam. Dengan demikian, hasil pengkondisian desorpsi pada penelitian ini menunjukkan bahwa metode yang digunakan telah berhasil menghasilkan sampel dengan variasi kadar air yang sesuai untuk tahap penentuan karakteristik sorpsi.

4.3 Penentuan *Equilibrium Moisture Content* (EMC)

4.3.1 Penentuan *Equilibrium Moisture Content* (EMC) Absorpsi

Equilibrium Moisture Content (EMC) merupakan kadar air kesetimbangan suatu bahan pada kondisi aktivitas air tertentu dan menjadi parameter utama dalam penyusunan kurva *Moisture Sorption Isotherm* (MSI). Oleh karena itu, nilai EMC pada penelitian ini dihitung dari kadar air aktual untuk menggambarkan karakteristik sorpsi air beras sosoh varietas Inpari 32 (Labuza, 1984).

Nilai EMC pada proses Absorpsi diperoleh melalui konversi kadar air aktual (%bb) yang telah mencapai kondisi kesetimbangan menjadi kadar air basis kering (%bk) menggunakan Rumus III.2 Hasil perhitungan EMC pada setiap taraf perlakuan Absorpsi disajikan pada Tabel IV.4.

Tabel IV.4 Hasil Perhitungan EMC Sampel Absorpsi

KA Aktual (%bb)	EMC (%bk)
6,8	7,3
7,8	8,5
10,7	12
11,6	13,1

KA Aktual (%bb)	EMC (%bk)
12,6	14,4
12,9	14,8
14,4	16,8
14,6	17,1
15,1	17,8
17,7	21,5

Berdasarkan Tabel IV.4, nilai EMC hasil Absorpsi berkisar antara 7,3–21,5%bk. Peningkatan nilai EMC terjadi seiring dengan meningkatnya kadar air aktual sampel setelah proses pengkondisian. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin besar kandungan air yang dimiliki beras pada kondisi setimbang, semakin tinggi pula nilai EMC yang dihasilkan setelah dikonversi ke dalam basis kering. Nilai EMC terendah diperoleh pada kadar air aktual 6,8%bb, sedangkan nilai EMC tertinggi diperoleh pada kadar air aktual 17,7%bb. Pola peningkatan tersebut menunjukkan bahwa beras sosoh varietas Inpari 32 memiliki kemampuan mempertahankan air dalam jumlah yang semakin besar seiring meningkatnya kadar air bahan. Informasi ini penting karena EMC merupakan parameter yang akan digunakan dalam penyusunan kurva *Moisture Sorption Isotherm* untuk menggambarkan karakteristik sorpsi beras pada berbagai kondisi kadar air.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Basunia & Abe, 1999, yang melaporkan bahwa nilai EMC beras meningkat seiring bertambahnya kadar air bahan pada kondisi kesetimbangan. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa konversi kadar air dari basis basah ke basis kering menghasilkan hubungan yang konsisten dengan karakteristik sorpsi beras dan menjadi dasar dalam penyusunan model isoterm sorpsi. Dengan demikian, nilai EMC yang diperoleh pada penelitian ini telah sesuai dengan karakteristik umum bahan pangan berpati dan layak digunakan pada tahap analisis kurva MSI.

4.3.2 Penentuan *Equilibrium Moisture Content* (EMC) Desorpsi

Equilibrium Moisture Content (EMC) pada proses desorpsi merupakan kadar air kesetimbangan beras setelah mengalami pelepasan air hingga mencapai kondisi setimbang pada aktivitas air tertentu. Nilai EMC desorpsi digunakan untuk menggambarkan karakteristik sorpsi air selama proses pelepasan air dan menjadi dasar dalam analisis kurva *Moisture Sorption Isotherm* (MSI) serta fenomena histeresis (Labuza, 1984).

Nilai EMC pada proses desorpsi dihitung berdasarkan kadar air aktual (%bb) yang diperoleh setelah proses pengkondisian dan mencapai kondisi kesetimbangan. Selanjutnya, kadar air aktual tersebut dikonversi ke dalam basis kering (%bk) menggunakan Rumus III.2 Hasil perhitungan EMC sampel desorpsi disajikan pada Tabel IV.5.

Tabel IV.5 Hasil Perhitungan EMC Sampel Desorpsi

KA Aktual (%bb)	EMC (%bk)
5,8	6,2
7,5	8,1
9,5	10,5
10,9	12,2
12,1	13,8
12,7	14,5
13,7	15,9
14,9	17,5
15,8	18,8
17,7	21,5

Berdasarkan Tabel IV.5, nilai EMC hasil desorpsi berada pada kisaran 6,2–21,5%bk. Nilai EMC menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan meningkatnya kadar air aktual setelah proses pengkondisian. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar air yang masih tersisa di dalam butir beras setelah proses pengeringan, semakin besar pula kadar air kesetimbangan yang

dimiliki bahan. Nilai EMC terendah diperoleh pada kadar air aktual 5,8%bb, sedangkan nilai tertinggi diperoleh pada kadar air aktual 17,7%bb. Peningkatan tersebut mengindikasikan bahwa air yang masih tertahan di dalam matriks beras berkontribusi terhadap meningkatnya kadar air kesetimbangan setelah dikonversi ke basis kering. Dengan demikian, data EMC hasil desorpsi dapat menggambarkan karakteristik pelepasan air pada beras sosoh varietas Inpari 32 dan menjadi dasar untuk membandingkan lintasan desorpsi dengan Absorpsi pada analisis kurva MSI.

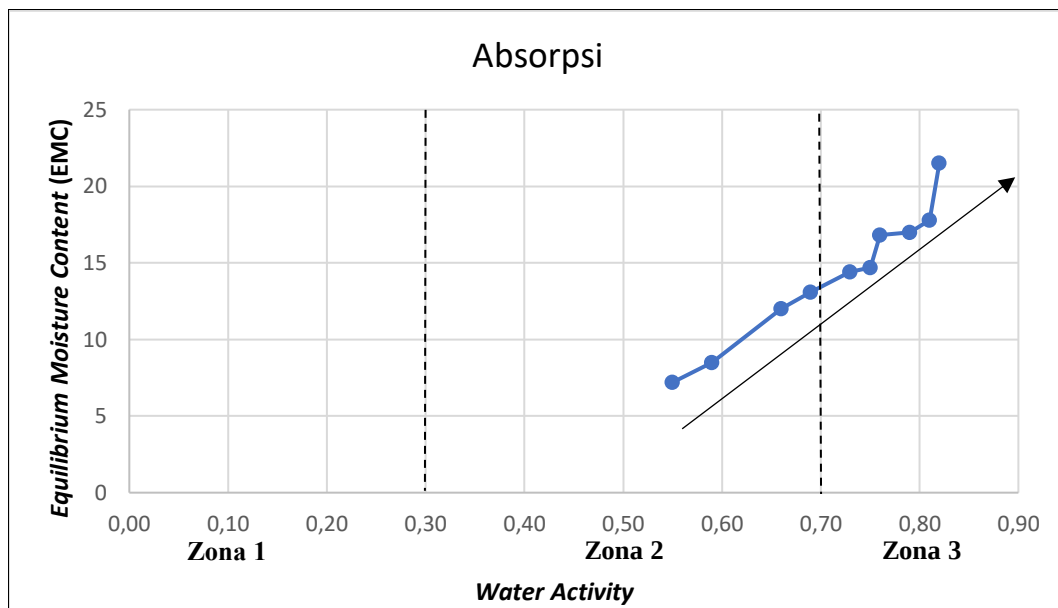
Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian San Martin dkk., 2001 yang melaporkan bahwa nilai EMC hasil desorpsi meningkat seiring dengan meningkatnya kadar air bahan pada kondisi kesetimbangan. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa karakteristik desorpsi dipengaruhi oleh kemampuan matriks bahan dalam mempertahankan molekul air selama proses pengeringan, sehingga nilai EMC yang diperoleh pada berbagai tingkat kadar air dapat digunakan untuk menggambarkan perilaku sorpsi bahan pangan. Kesamaan kecenderungan tersebut menunjukkan bahwa hasil penelitian ini sesuai dengan karakteristik isotherm sorpsi yang umum dijumpai pada sereal, khususnya beras.

4.4 Karakteristik Kurva Sorpsi Air Beras Inpari 32

4.4.1 Karakteristik Sorpsi Air pada Proses Absorpsi

Kurva *Moisture Sorption Isotherm* (MSI) digunakan untuk menggambarkan hubungan antara aktivitas air (a_w) dan kadar air kesetimbangan (EMC) suatu bahan pada suhu tertentu. Hubungan tersebut dapat digunakan untuk mengevaluasi karakteristik sorpsi air dan stabilitas bahan selama penyimpanan (Labuza, 1984).

Berdasarkan nilai aktivitas air dan EMC hasil penelitian, hubungan kedua parameter tersebut kemudian diplot menjadi kurva sorpsi air untuk proses Absorpsi. Kurva sorpsi air Absorpsi beras sosoh varietas Inpari 32 pada zona aktivitas air penyimpanan disajikan pada Gambar IV.1.



Gambar IV.1 Kurva Sorpsi Air Inpari 32 pada Proses Absorpsi

Berdasarkan Gambar IV.1, terlihat bahwa nilai EMC meningkat seiring dengan meningkatnya aktivitas air. Pada rentang aktivitas air sekitar 0,55–0,82, hubungan antara kedua parameter menunjukkan kecenderungan meningkat secara kontinu. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi aktivitas air lingkungan, semakin banyak molekul air yang diserap oleh beras hingga mencapai kondisi kesetimbangan. Peningkatan EMC pada rentang aktivitas air tersebut mengindikasikan bertambahnya jumlah air yang terikat di dalam matriks pati dan komponen penyusun beras sebagai akibat meningkatnya kelembapan lingkungan. Kondisi ini sesuai dengan sifat higroskopis beras yang cenderung menyerap uap air apabila disimpan pada lingkungan dengan kelembapan relatif yang lebih tinggi.

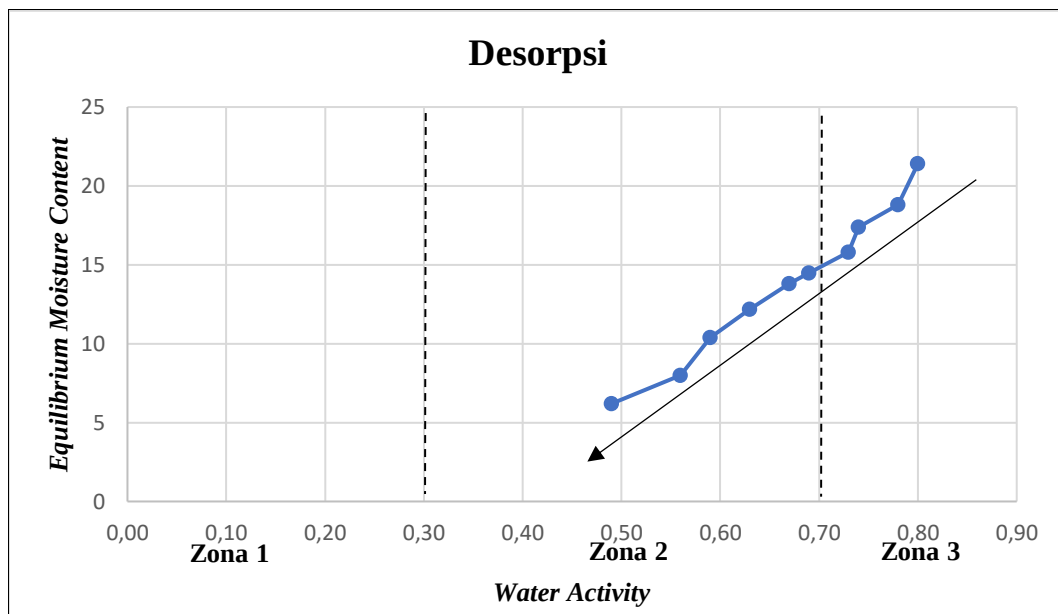
Penelitian ini dilakukan pada zona aktivitas air penyimpanan, sehingga rentang aktivitas air yang diamati berada pada kisaran 0,55–0,82. Oleh karena itu, kurva yang dihasilkan menggambarkan karakteristik sorpsi air pada kondisi penyimpanan yang umum dijumpai di gudang, bukan keseluruhan rentang isoterm sorpsi. Dengan demikian, interpretasi kurva difokuskan pada perilaku penyerapan air beras pada kondisi penyimpanan yang relevan dengan aplikasi praktis, khususnya dalam penyimpanan beras di gudang Bulog.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Basunia & Abe, 1999, yang melaporkan bahwa peningkatan aktivitas air menyebabkan meningkatnya kadar air kesetimbangan beras pada suhu konstan. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa pada rentang aktivitas air menengah hingga tinggi, penyerapan uap air berlangsung semakin besar karena meningkatnya jumlah molekul air yang berikatan dengan komponen penyusun beras. Kesamaan kecenderungan tersebut menunjukkan bahwa karakteristik sorpsi air beras sosoh varietas Inpari 32 pada penelitian ini sesuai dengan perilaku sorpsi sereal yang telah dilaporkan sebelumnya.

4.4.2 Karakteristik Sorpsi Air Pada Proses Desorpsi

Kurva *Moisture Sorption Isotherm* (MSI) pada proses desorpsi menunjukkan hubungan antara aktivitas air (a_w) dan kadar air kesetimbangan (EMC) selama pelepasan air dari bahan. Hubungan tersebut digunakan untuk menggambarkan karakteristik sorpsi air beras sosoh varietas Inpari 32 pada proses desorpsi (Van Den Berg & Bruin, 1981).

Berdasarkan nilai aktivitas air dan EMC yang diperoleh dari proses desorpsi, selanjutnya disusun kurva sorpsi air untuk menggambarkan hubungan kedua parameter tersebut pada zona aktivitas air penyimpanan. Kurva sorpsi air proses desorpsi beras sosoh varietas Inpari 32 disajikan pada Gambar IV.2.



Gambar IV.2 Kurva Sorpsi Air Inpari 32 pada Proses Desorpsi

Berdasarkan Gambar IV.2, nilai EMC menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan meningkatnya aktivitas air pada rentang 0,49–0,80. Peningkatan tersebut mengindikasikan bahwa semakin tinggi aktivitas air lingkungan, semakin besar kadar air kesetimbangan yang dipertahankan oleh beras setelah mengalami proses pelepasan air. Pada aktivitas air yang lebih rendah, perubahan EMC berlangsung relatif kecil, sedangkan pada aktivitas air yang lebih tinggi peningkatan EMC menjadi lebih nyata. Pola tersebut menunjukkan bahwa air yang masih tertahan di dalam matriks pati dan protein beras memiliki afinitas yang cukup tinggi sehingga tidak seluruhnya mudah dilepaskan selama proses pengeringan. Akibatnya, pada kondisi aktivitas air yang sama, bahan yang mengalami desorpsi cenderung masih mempertahankan kandungan air lebih besar dibandingkan kondisi awal tertentu, yang merupakan karakteristik umum bahan pangan higroskopis.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Basunia & Abe, 1999, yang melaporkan bahwa kurva desorpsi beras menunjukkan peningkatan nilai EMC seiring meningkatnya aktivitas air pada suhu konstan. Penelitian tersebut menjelaskan bahwa selama proses pelepasan air, sebagian molekul air masih terikat kuat pada permukaan maupun struktur internal bahan sehingga diperlukan aktivitas

air yang lebih tinggi untuk mencapai kondisi kesetimbangan. Kecenderungan yang sama juga terlihat pada penelitian ini, di mana peningkatan aktivitas air diikuti oleh meningkatnya nilai EMC pada seluruh taraf perlakuan desorpsi. Hal tersebut menunjukkan bahwa karakteristik sorpsi air beras sosoh varietas Inpari 32 pada proses desorpsi masih sesuai dengan karakteristik sorpsi sereal yang telah banyak dilaporkan dalam literatur.

4.5 Pemodelan *Moisture Sorption Isotherm* (MSI)

4.5.1 Hasil Pemodelan GAB

Model *Guggenheim–Anderson–de Boer* (GAB) merupakan salah satu model isotherm sorpsi yang banyak digunakan untuk menggambarkan hubungan antara aktivitas air dan kadar air kesetimbangan pada bahan pangan. Model ini menghasilkan tiga parameter, yaitu kadar air monolayer (M_0), konstanta C, dan konstanta K. Nilai M_0 menggambarkan jumlah air yang terikat kuat pada permukaan bahan, sedangkan konstanta C dan K berhubungan dengan energi ikatan air pada lapisan monolayer maupun multilayer (Van Den Berg & Bruin, 1981).

Berdasarkan hasil pemodelan menggunakan model GAB, diperoleh parameter model pada proses Absorpsi dan desorpsi sebagaimana disajikan pada Tabel IV.6.

Tabel IV.6 Parameter Model GAB Pada Proses Absorpsi dan Desorpsi

Proses	M_0	C	K
Absorpsi	48,75542	0,19187	0,66315
Desorpsi	178,13026	0,06186	0,62825

Hasil pemodelan menunjukkan bahwa pada proses Absorpsi diperoleh nilai kadar air monolayer (M_0) sebesar 48,76% bk, dengan konstanta C sebesar 0,19 dan K sebesar 0,66. sedangkan pada proses desorpsi diperoleh nilai kadar air monolayer (M_0) sebesar 178,13% bk, dengan konstanta C sebesar 0,06 dan K sebesar 0,62.

Nilai M_0 menggambarkan kadar air monolayer, yaitu jumlah air yang terikat kuat pada permukaan bahan dan umumnya dikaitkan dengan kondisi kestabilan maksimum selama penyimpanan. Sementara itu, konstanta C dan K menggambarkan kekuatan interaksi antara molekul air dengan permukaan bahan pada lapisan monolayer dan multilayer.

Nilai M_0 yang relatif tinggi pada penelitian ini menunjukkan bahwa hasil estimasi kadar air monolayer menjadi lebih besar dibandingkan nilai yang umumnya dilaporkan pada bahan pangan sereal. Kondisi tersebut diduga dipengaruhi oleh rentang aktivitas air yang digunakan dalam penelitian, yaitu a_w 0,55–0,82, sehingga tidak mencakup daerah aktivitas air rendah yang sangat penting dalam penentuan kadar air monolayer. Pada model GAB, parameter M_0 terutama ditentukan oleh bentuk kurva pada daerah aktivitas air rendah. Ketika data pada rentang tersebut tidak tersedia, proses optimasi tetap dapat menghasilkan kurva yang sesuai dengan data pengamatan, tetapi dengan nilai parameter yang menjadi kurang representatif secara fisik. Selain itu, nilai C sebesar 0,19 yang lebih kecil dari satu juga menunjukkan bahwa estimasi parameter belum mampu menggambarkan kekuatan ikatan molekul air pada lapisan monolayer secara optimal.

Kondisi yang lebih ekstrem justru teramati pada proses desorpsi. Nilai M_0 desorpsi yang diperoleh sebesar 178,13% bk jauh melampaui nilai M_0 pada lintasan Absorpsi maupun nilai kadar air monolayer yang lazim dilaporkan pada bahan pangan sereal. Sebagaimana telah diuraikan pada lintasan Absorpsi, penyebab utamanya adalah rentang aktivitas air penelitian (0,55–0,82) yang tidak mencakup zona aktivitas air rendah (0,05–0,35), yaitu zona yang secara teoritis mengunci nilai M_0 pada model GAB. Karena informasi pada zona tersebut tidak tersedia dalam data, proses optimasi nonlinear kurang bisa menghasilkan kurva dengan tingkat kesesuaian yang baik terhadap data pengamatan, ditunjukkan oleh nilai MRD desorpsi yang rendah pada Tabel IV.8, namun nilai M_0 yang dihasilkan menjadi tidak dapat diinterpretasikan secara fisik sebagai kadar air monolayer yang sesungguhnya.

Hasil penelitian ini berbeda dengan konsep yang dikemukakan oleh Van Den Berg & Bruin, (1981), yang menyatakan bahwa model GAB sebaiknya diterapkan pada data dengan rentang aktivitas air yang luas agar parameter kadar air monolayer dapat diestimasi secara lebih representatif. Pada penelitian ini, keterbatasan rentang aktivitas air menyebabkan estimasi parameter GAB menjadi kurang stabil sehingga menghasilkan nilai M_0 yang relatif tinggi. Oleh karena itu, interpretasi parameter model GAB pada penelitian ini, baik pada proses Absorpsi maupun desorpsi, perlu dilakukan secara hati-hati, dan selanjutnya dievaluasi bersama indikator statistik lainnya serta kewajaran nilai parameter secara fisik pada subbab berikutnya.

4.5.2 Hasil Pemodelan Oswin

Model Oswin merupakan salah satu model isoterm sorpsi empiris yang banyak digunakan untuk menggambarkan hubungan antara aktivitas air (a_w) dan *Equilibrium Moisture Content* (EMC) pada bahan pangan. Berbeda dengan model GAB yang memiliki dasar teoritis, model Oswin menggunakan dua parameter empiris, yaitu a dan b , yang diperoleh melalui proses optimasi terhadap data hasil pengamatan. Model ini dikenal memiliki bentuk persamaan yang sederhana dan mampu memberikan pendugaan yang baik pada bahan pangan dengan rentang aktivitas air menengah hingga tinggi (Lomauro dkk., 1984).

Berdasarkan hasil pemodelan menggunakan model Oswin, diperoleh parameter model pada proses Absorpsi dan desorpsi sebagaimana disajikan pada Tabel IV.7.

Tabel IV.7 Parameter Model Oswin Pada Proses Absorpsi dan Desorpsi

Proses	a	b
Absorpsi	7,03121	0,69958
Desorpsi	7,62553	0,74944

Hasil pemodelan menunjukkan bahwa pada proses Absorpsi diperoleh nilai parameter a sebesar 7,03121 dan b sebesar 0,69958, sedangkan pada proses desorpsi diperoleh nilai a sebesar 7,62553 dan b sebesar 0,74944. Nilai parameter a yang lebih tinggi pada proses desorpsi menunjukkan bahwa kapasitas bahan dalam mempertahankan air pada kondisi kesetimbangan lebih besar dibandingkan pada proses Absorpsi. Sementara itu, nilai b yang juga lebih tinggi pada proses desorpsi mengindikasikan bahwa perubahan kadar air kesetimbangan lebih peka terhadap perubahan aktivitas air selama proses pelepasan air dibandingkan pada proses penyerapan air.

Perbedaan nilai parameter antara Absorpsi dan desorpsi menunjukkan adanya pengaruh riwayat kadar air (*moisture history*) terhadap perilaku sorpsi beras sosoh varietas Inpari 32. Pada proses desorpsi, air yang sebelumnya telah berada di dalam matriks bahan tidak seluruhnya dilepaskan ketika aktivitas air menurun, sehingga kadar air kesetimbangan tetap lebih tinggi dibandingkan pada proses Absorpsi. Kondisi tersebut menyebabkan nilai parameter a dan b pada proses desorpsi menjadi lebih besar daripada proses Absorpsi. Hasil ini juga sejalan dengan fenomena histeresis yang telah ditunjukkan pada kurva isoterm sorpsi, di mana kurva desorpsi berada di atas kurva Absorpsi pada rentang aktivitas air yang sama.

Nilai A dan B tidak dihitung lewat rumus aljabar langsung, karena persamaan Oswin bersifat nonlinear (parameter B berada di posisi pangkat), sehingga tidak ada solusi tertutup untuk menghitungnya secara manual. Nilai A dan B diperoleh melalui proses regresi nonlinear menggunakan algoritma *Levenberg-Marquardt*, yang bekerja dengan mencari nilai A dan B yang meminimalkan jumlah kuadrat selisih (*sum of squared residuals*) antara nilai EMC hasil pengamatan dan nilai EMC hasil prediksi model, di seluruh 10 titik data.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Lomauro dkk., (1984) yang melaporkan bahwa model Oswin mampu memberikan pendugaan yang baik terhadap hubungan aktivitas air dan kadar air kesetimbangan pada berbagai bahan

pangan. Model ini memiliki bentuk persamaan yang sederhana dengan jumlah parameter yang lebih sedikit dibandingkan model GAB, sehingga proses estimasi parameter umumnya lebih stabil, terutama pada data dengan rentang aktivitas air menengah hingga tinggi. Kondisi tersebut sesuai dengan penelitian ini yang menggunakan rentang aktivitas air 0,55–0,82, sehingga model Oswin mampu menggambarkan pola sorpsi air beras dengan baik.

Berdasarkan hasil pemodelan tersebut, model Oswin mampu merepresentasikan hubungan antara aktivitas air dan kadar air kesetimbangan pada proses Absorpsi maupun desorpsi. Namun demikian, untuk menentukan model matematis yang paling sesuai dalam menggambarkan karakteristik sorpsi air beras sosok varietas Inpari 32, diperlukan evaluasi lebih lanjut menggunakan parameter statistik, yaitu koefisien determinasi (R^2) dan *Mean Relative Deviation* (MRD), yang akan dibahas pada subbab berikutnya.

4.6 Evaluasi Model Matematis *Moisture Sorption Isotherm*

4.6.1 Evaluasi Model Berdasarkan Nilai R^2 dan MRD

Koefisien determinasi (R^2) digunakan untuk menunjukkan kemampuan model dalam menjelaskan hubungan antara aktivitas air dan kadar air kesetimbangan, sedangkan *Mean Relative Deviation* (MRD) digunakan untuk mengetahui besarnya penyimpangan antara nilai EMC hasil prediksi model dengan hasil pengamatan. Menurut Lomauro dkk. (1984), model isoterm sorpsi dinilai memiliki tingkat ketelitian yang baik apabila menghasilkan nilai MRD kurang dari 10%.

Berdasarkan hasil evaluasi, diperoleh nilai R^2 dan MRD model GAB maupun Oswin sebagaimana disajikan pada Tabel IV.8.

Tabel IV.8 Hasil evaluasi model GAB dan Oswin

Kurva	Model	R^2	MRD (%)
Absorpsi	GAB	0,9552	5,00

Kurva	Model	R ²	MRD (%)
Absorpsi	Oswin	0,9504	6,24
Desorpsi	GAB	0,9819	5,09
Desorpsi	Oswin	0,9707	6,55

Berdasarkan Tabel IV.8, seluruh model menghasilkan nilai R² di atas 0,95 dan MRD di bawah 10%, sehingga secara statistik keduanya memiliki kemampuan yang baik dalam menggambarkan hubungan antara aktivitas air dan kadar air kesetimbangan. Pada proses Absorpsi, model GAB menghasilkan nilai R² sebesar 0,9552 dengan MRD sebesar 5,00%, sedangkan model Oswin menghasilkan R² sebesar 0,9504 dengan MRD sebesar 6,24%. Pada proses desorpsi, model GAB menghasilkan nilai R² sebesar 0,9819 dan MRD sebesar 5,09%, sedangkan model Oswin menghasilkan R² sebesar 0,9707 dan MRD sebesar 6,55%.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa secara statistik model GAB memiliki kemampuan prediksi yang sedikit lebih baik dibandingkan model Oswin karena menghasilkan nilai R² yang lebih tinggi dan MRD yang lebih rendah pada proses Absorpsi maupun desorpsi. Namun, selisih nilai R² antara kedua model relatif kecil, yaitu hanya sekitar 0,0048 pada Absorpsi dan 0,0112 pada desorpsi. Demikian pula dengan nilai MRD, seluruh model masih berada jauh di bawah batas 10%, sehingga baik model GAB maupun Oswin sama-sama memenuhi kriteria model isotherm sorpsi yang baik (Lomauro dkk., 1984).

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian (Lomauro dkk., 1984), yang menyatakan bahwa model GAB maupun Oswin umumnya mampu memberikan ketelitian yang baik pada berbagai bahan pangan apabila menghasilkan nilai MRD kurang dari 10%. Oleh karena itu, berdasarkan parameter statistik saja, kedua model sebenarnya telah memenuhi kriteria untuk digunakan dalam menggambarkan karakteristik sorpsi air beras sosoh varietas Inpari 32.

4.6.2 Pemilihan Model Matematis Terbaik

Evaluasi model matematis dilakukan untuk menentukan model yang paling sesuai dalam menggambarkan hubungan antara aktivitas air (a_w) dan *Equilibrium Moisture Content* (EMC) beras sosoh varietas Inpari 32. Pada penelitian ini, model GAB dan Oswin dievaluasi menggunakan dua parameter statistik, yaitu koefisien determinasi (R^2) dan *Mean Relative Deviation* (MRD). Koefisien determinasi digunakan untuk menunjukkan tingkat kesesuaian model terhadap data hasil pengamatan, sedangkan MRD digunakan untuk mengukur besarnya penyimpangan antara nilai EMC hasil prediksi model dengan data eksperimen. Menurut Lomauro dkk. (1984), model isoterm sorpsi dikatakan memiliki ketelitian yang baik apabila menghasilkan nilai MRD kurang dari 10%.

Berdasarkan Tabel IV.8, baik model GAB maupun Oswin menghasilkan nilai R^2 lebih besar dari 0,95 dan MRD kurang dari 10%, sehingga kedua model mampu menggambarkan hubungan antara aktivitas air dan kadar air kesetimbangan beras sosoh varietas Inpari 32 dengan tingkat ketelitian yang baik. Hal tersebut menunjukkan bahwa kedua model dapat digunakan untuk mendeskripsikan karakteristik *Moisture Sorption Isotherm* (MSI) pada rentang aktivitas air yang diamati.

Pada proses Absorpsi, model GAB menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,9552 dengan MRD sebesar 5,00%, sedangkan model Oswin menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,9504 dan MRD sebesar 6,24%. Demikian pula pada proses desorpsi, model GAB menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,9819 dan MRD sebesar 5,09%, sedangkan model Oswin menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,9707 dan MRD sebesar 6,55%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model GAB secara konsisten memiliki nilai R^2 yang lebih tinggi dan nilai MRD yang lebih rendah dibandingkan model Oswin, baik pada proses Absorpsi maupun desorpsi.

Nilai koefisien determinasi (R^2) yang lebih mendekati satu menunjukkan bahwa model GAB mampu menjelaskan hubungan antara aktivitas air dan EMC dengan

tingkat ketepatan yang lebih baik dibandingkan model Oswin. Selain itu, nilai MRD yang lebih rendah menunjukkan bahwa penyimpangan antara hasil prediksi model dengan data hasil pengamatan lebih kecil, sehingga kemampuan prediksi model GAB lebih baik. Menurut Lomauro dkk. (1984), model isoterm sorpsi dengan nilai MRD di bawah 10% dikategorikan memiliki kemampuan prediksi yang baik. Dengan demikian, kedua model memenuhi kriteria tersebut, namun model GAB memberikan tingkat akurasi yang lebih tinggi.

Berdasarkan nilai R^2 dan MRD saja, model GAB unggul secara statistik dibandingkan model Oswin pada kedua lintasan sorpsi. Namun demikian, evaluasi model isoterm sorpsi tidak dapat hanya didasarkan pada kesesuaian statistik terhadap data, karena model dengan jumlah parameter lebih banyak, seperti GAB dengan tiga parameter, cenderung lebih fleksibel dalam mengikuti pola data meskipun parameter yang dihasilkan tidak selalu memiliki makna fisik yang valid. Oleh karena itu, pemilihan model pada penelitian ini juga mempertimbangkan kriteria ketiga, yaitu kewajaran nilai parameter secara fisik, khususnya parameter kadar air monolayer (M_0) pada model GAB.

Sebagaimana telah diuraikan pada subbab 4.5.1, nilai M_0 yang dihasilkan model GAB pada penelitian ini, baik pada proses Absorpsi maupun desorpsi, tidak dapat diinterpretasikan sebagai kadar air monolayer yang representatif secara fisik. Kondisi ini disebabkan oleh rentang aktivitas air penelitian (0,55–0,82) yang tidak mencakup zona aktivitas air rendah, sehingga data yang tersedia tidak cukup untuk mengunci nilai M_0 secara unik. Akibatnya, meskipun model GAB menghasilkan nilai R^2 yang lebih tinggi dan MRD yang lebih rendah, keunggulan statistik tersebut tidak diikuti oleh keunggulan pada aspek interpretasi fisik parameternya. Berbeda dengan GAB, model Oswin tidak mengandung parameter dengan klaim makna fisik seperti M_0 , sehingga tidak menghadapi persoalan keterbatasan interpretasi yang sama.

Kewajaran nilai M_0 tersebut juga dapat diperiksa menggunakan kriteria kuantitatif yang dilaporkan oleh Lewicki, (1997), yang menyatakan bahwa galat estimasi

kadar air monolayer pada model GAB tidak akan melebihi 15,5% apabila nilai konstanta K berada pada rentang 0,24–1 dan nilai konstanta C melebihi 5,67, di luar rentang tersebut, estimasi M_0 memiliki galat yang jauh lebih besar dan tidak lagi dapat diandalkan. Pada penelitian ini, nilai konstanta K memang berada pada rentang yang disyaratkan (0,663 pada Absorpsi dan 0,628 pada desorpsi), namun nilai konstanta C jauh berada di bawah ambang tersebut, yaitu hanya 0,192 pada proses Absorpsi dan 0,062 pada proses desorpsi. Berdasarkan kriteria Lewicki, (1997), kondisi ini menunjukkan bahwa estimasi M_0 pada kedua lintasan berada di luar rentang yang dapat dipercaya keandalannya, dengan nilai C desorpsi yang jauh lebih kecil turut menjelaskan mengapa penyimpangan M_0 desorpsi (178,13% bk) jauh lebih besar dibandingkan M_0 Absorpsi (48,76% bk). Temuan ini memperkuat kesimpulan bahwa keterbatasan rentang aktivitas air pada penelitian ini menyebabkan parameter M_0 model GAB kehilangan keandalannya sebagai representasi fisik kadar air monolayer.

Berdasarkan evaluasi tersebut, meskipun model GAB menunjukkan kinerja statistik yang sedikit lebih baik dibandingkan model Oswin pada kedua lintasan sorpsi, keunggulan tersebut tidak diikuti oleh kewajaran nilai parameter secara fisik. Nilai M_0 yang dihasilkan model GAB, baik pada proses Absorpsi maupun desorpsi, berada di luar rentang keandalan berdasarkan kriteria konstanta K dan C yang disyaratkan oleh Lewicki, (1997), sehingga tidak dapat diinterpretasikan sebagai kadar air monolayer yang representatif secara fisik. Sementara itu, selisih nilai R^2 antara model GAB dan Oswin relatif kecil, yaitu hanya sekitar 0,0048 pada Absorpsi dan 0,0112 pada desorpsi, dan kedua model sama-sama menghasilkan nilai MRD di bawah batas 10% yang disyaratkan oleh Lomauro dkk., (1984), sehingga selisih kinerja statistik tersebut tidak cukup besar untuk mengesampingkan persoalan kewajaran fisik pada parameter GAB.

Dengan mempertimbangkan ketiga kriteria evaluasi secara bersamaan, yaitu koefisien determinasi (R^2), Mean Relative Deviation (MRD), dan kewajaran nilai parameter secara fisik, model Oswin dinilai lebih defensibel dan dipilih sebagai model matematis terbaik dalam mendeskripsikan karakteristik Moisture Sorption

Isotherm beras sosoh varietas Inpari 32, baik pada proses Absorpsi maupun desorpsi. Pemilihan ini juga menghindari inkonsistensi penggunaan model yang berbeda antar lintasan sorpsi, sehingga interpretasi fenomena histeresis pada subbab berikutnya dapat dilakukan berdasarkan satu model yang sama. Model Oswin selanjutnya digunakan untuk mengestimasi nilai Equilibrium Moisture Content (EMC) pada proses Absorpsi maupun desorpsi pada subbab 4.6.3.

4.6.3 Estimasi *Equilibrium Moisture Content* (EMC) Menggunakan Model Terbaik

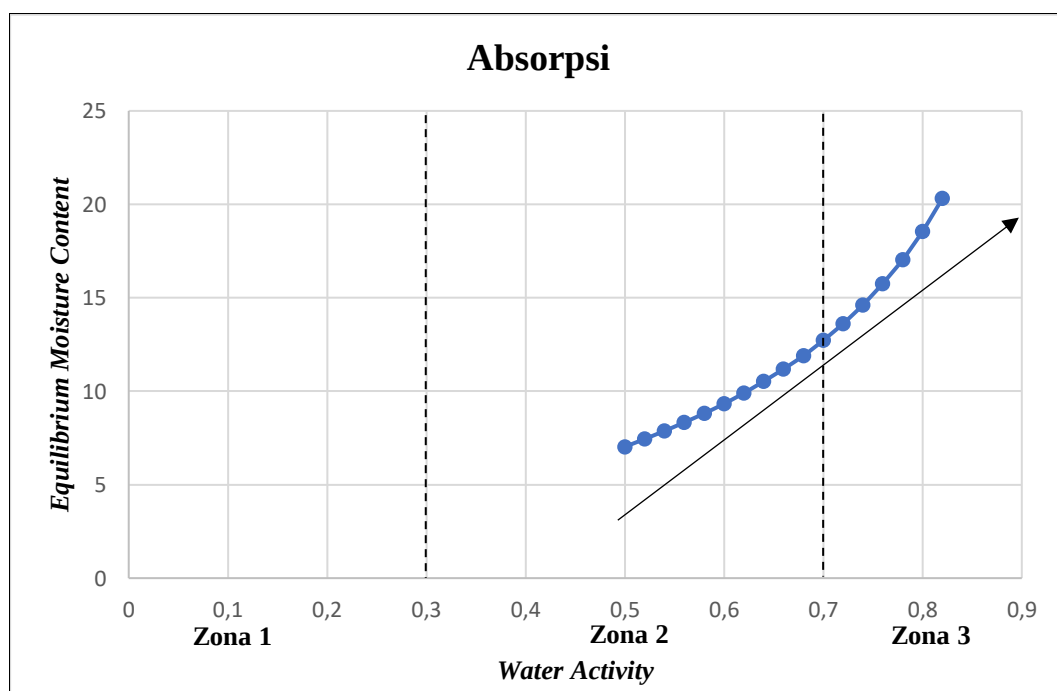
Model Oswin ditetapkan sebagai model matematis terbaik berdasarkan evaluasi gabungan nilai koefisien determinasi (R^2), *Mean Relative Deviation* (MRD), dan kewajaran nilai parameter secara fisik sebagaimana diuraikan pada Subbab 4.6.2. Model tersebut selanjutnya digunakan untuk mengestimasi nilai *Equilibrium Moisture Content* (EMC) pada rentang aktivitas air yang lebih rapat. Estimasi dilakukan pada rentang aktivitas air 0,50–0,82 dengan interval 0,02, sehingga diperoleh kurva isotherm yang lebih kontinu dan representatif. Pendekatan ini dilakukan untuk mempermudah interpretasi perubahan EMC terhadap aktivitas air serta sebagai dasar dalam analisis fenomena histeresis pada subbab berikutnya. Hasil estimasi EMC menggunakan model Oswin pada proses Absorpsi dan desorpsi disajikan pada Tabel IV.9.

Tabel IV.9 Estimasi *Equilibrium Moisture Content* (EMC) Menggunakan Model Oswin

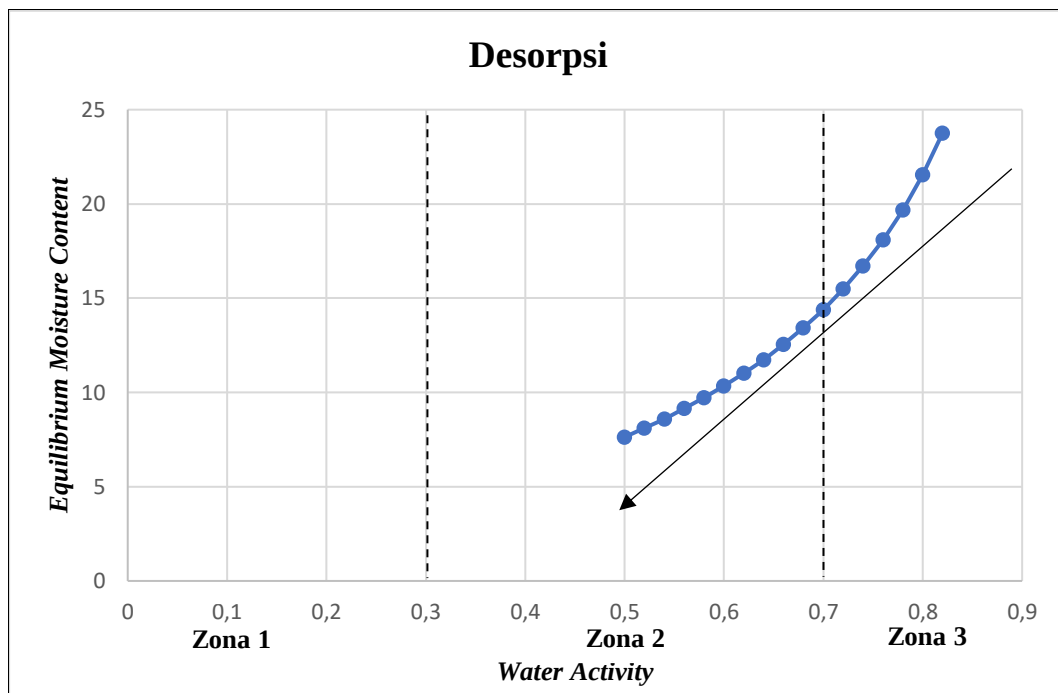
a_w	EMC Absorpsi (%bk)	EMC Desorpsi (%bk)
0,5	7,03	7,63
0,52	7,44	8,10
0,54	7,87	8,60
0,56	8,32	9,14
0,58	8,81	9,71
0,6	9,34	10,33

a_w	EMC Absorpsi (%bk)	EMC Desorpsi (%bk)
0,62	9,90	11,01
0,64	10,52	11,74
0,66	11,18	12,54
0,68	11,91	13,42
0,7	12,72	14,39
0,72	13,61	15,48
0,74	14,62	16,70
0,76	15,75	18,09
0,78	17,04	19,69
0,8	18,54	21,55
0,82	20,31	23,76

Kurva hasil estimasi EMC menggunakan model Oswin pada proses Absorpsi dan desorpsi ditunjukkan pada Gambar IV.3 dan Gambar IV.4.



Gambar IV.3 Kurva Absorpsi Hasil Model Oswin



Gambar IV.4. Kurva Desorpsi Hasil Model Oswin

Berdasarkan Gambar IV.3 dan Gambar IV.4, nilai EMC hasil estimasi menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya aktivitas air, baik pada proses Absorpsi maupun desorpsi. Pola tersebut sesuai dengan karakteristik isoterm sorpsi bahan pangan, di mana semakin tinggi aktivitas air lingkungan, semakin besar kemampuan bahan menyerap maupun mempertahankan air hingga mencapai kondisi kesetimbangan.

Kurva hasil estimasi juga menunjukkan bahwa nilai EMC pada proses desorpsi selalu lebih tinggi dibandingkan proses Absorpsi pada aktivitas air yang sama. Perbedaan tersebut mengindikasikan adanya fenomena histeresis, yaitu kondisi ketika lintasan pelepasan air tidak berimpit dengan lintasan penyerapan air. Hal ini menunjukkan bahwa beras sosoh varietas Inpari 32 memiliki kecenderungan mempertahankan kandungan air lebih tinggi setelah mengalami proses desorpsi dibandingkan saat mengalami proses Absorpsi pada aktivitas air yang sama.

Penggunaan interval aktivitas air sebesar 0,02 menghasilkan jumlah titik estimasi yang lebih banyak dibandingkan data hasil pengamatan, sehingga kurva isotherm yang diperoleh menjadi lebih halus (*smooth*) dan mampu menggambarkan perubahan EMC secara lebih kontinu. Estimasi tersebut tidak dimaksudkan untuk menggantikan data hasil pengamatan, melainkan sebagai representasi matematis dari model Oswin yang telah dipilih sebagai model terbaik. Nilai EMC hasil estimasi ini selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam analisis fenomena histeresis untuk mengevaluasi perbedaan karakteristik Absorpsi dan desorpsi beras sosoh varietas Inpari 32.

Hasil tersebut sejalan dengan (Lomauro dkk., 1984) yang menyatakan bahwa model Oswin mampu menghasilkan kurva isotherm sorpsi yang sesuai pada rentang aktivitas air menengah hingga tinggi, didukung oleh bentuk persamaannya yang sederhana dan jumlah parameter yang lebih sedikit dibandingkan model GAB sehingga proses estimasi cenderung lebih stabil. Kemampuan model Oswin dalam menghasilkan estimasi EMC secara kontinu dan stabil pada rentang aktivitas air penelitian ini menjadikannya sesuai untuk analisis lanjutan, seperti evaluasi histeresis dan penentuan kondisi penyimpanan yang optimum.

4.7 Histeresis Kurva *Moisture Sorption Isotherm* (MSI)

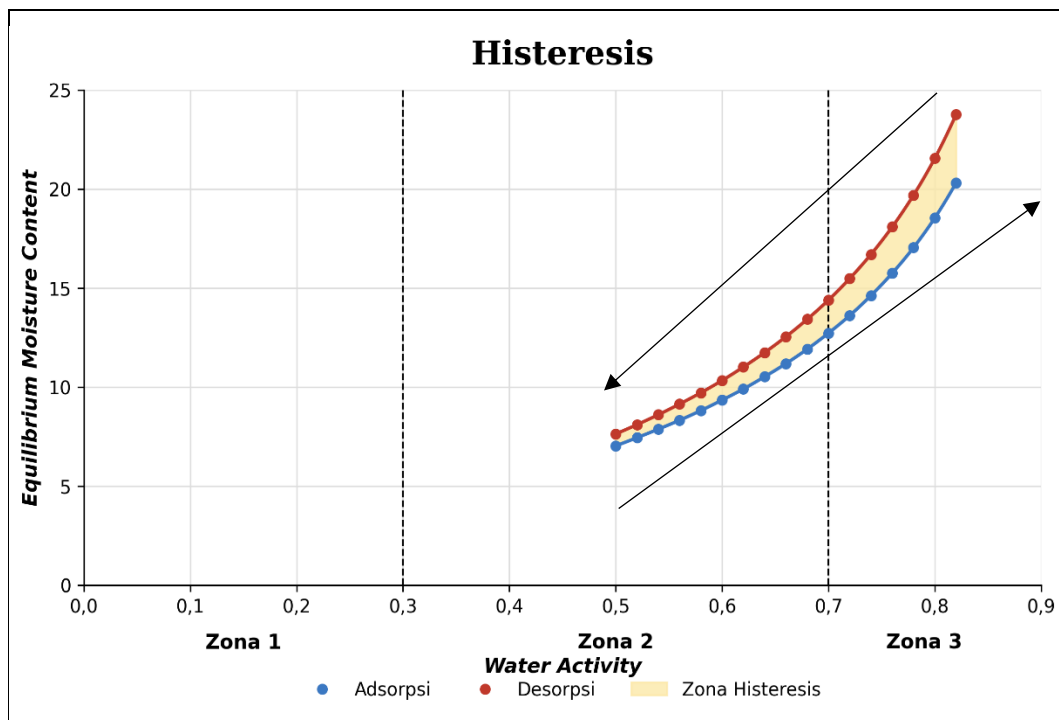
Fenomena histeresis merupakan salah satu karakteristik penting pada *Moisture Sorption Isotherm* (MSI), yaitu kondisi ketika lintasan Absorpsi dan desorpsi tidak saling berimpit pada nilai aktivitas air (a_w) yang sama. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa mekanisme penyerapan air oleh bahan berbeda dengan mekanisme pelepasan air, sehingga kadar air kesetimbangan (*Equilibrium Moisture Content*, EMC) yang diperoleh pada proses Absorpsi dan desorpsi tidak identik. Analisis histeresis dilakukan untuk mengetahui besarnya perbedaan EMC antara kedua lintasan sorpsi sebagai dasar dalam memahami perilaku beras sosoh selama proses penyimpanan (Labuza, 1984).

Pada penelitian ini, analisis histeresis dilakukan menggunakan nilai EMC hasil estimasi model Oswin pada rentang aktivitas air 0,50–0,82 dengan interval 0,02 sebagaimana telah disajikan pada Subbab 4.6.3. Besarnya histeresis dihitung berdasarkan selisih nilai EMC desorpsi terhadap EMC Absorpsi pada setiap aktivitas air yang sama. Hasil perhitungan tersebut disajikan pada Tabel IV.10.

Tabel IV.10 Hasil Perhitungan Histeresis Beras Sosoh Varietas Inpari 32

a_w	EMC Absorpsi (%bk)	EMC Desorpsi (%bk)	ΔEMC (%bk)
0,5	7,03	7,63	0,60
0,52	7,44	8,10	0,66
0,54	7,87	8,60	0,73
0,56	8,32	9,14	0,82
0,58	8,81	9,71	0,90
0,6	9,34	10,33	0,99
0,62	9,90	11,01	1,11
0,64	10,52	11,74	1,22
0,66	11,18	12,54	1,36
0,68	11,91	13,42	1,51
0,7	12,72	14,39	1,67
0,72	13,61	15,48	1,87
0,74	14,62	16,70	2,08
0,76	15,75	18,09	2,34
0,78	17,04	19,69	2,65
0,8	18,54	21,55	3,01
0,82	20,31	23,76	3,45

Hubungan antara kurva Absorpsi dan desorpsi hasil estimasi model Oswin disajikan pada Gambar IV.5.



Gambar IV.5 Kurva Histeresis MSI Beras Inpari 32

Berdasarkan Tabel IV.10 dan Gambar IV.5, nilai EMC pada proses desorpsi selalu lebih tinggi dibandingkan nilai EMC pada proses Absorpsi pada seluruh rentang aktivitas air yang diamati. Kondisi tersebut menghasilkan nilai ΔEMC yang seluruhnya bernilai positif dengan kisaran 0,60–3,45% bk, yang menunjukkan adanya fenomena histeresis pada beras sosoh varietas Inpari 32. Semakin besar nilai ΔEMC , semakin besar pula perbedaan antara lintasan Absorpsi dan desorpsi pada aktivitas air yang sama.

Nilai ΔEMC menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya aktivitas air. Pada aktivitas air 0,50, selisih EMC antara proses desorpsi dan Absorpsi sebesar 0,60% bk, kemudian meningkat secara bertahap hingga mencapai 3,45% bk pada aktivitas air 0,82. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa perbedaan lintasan Absorpsi dan desorpsi semakin nyata pada aktivitas air yang lebih tinggi.

Selain berdasarkan selisih EMC pada setiap aktivitas air, besarnya fenomena histeresis juga dievaluasi melalui perhitungan luas area histeresis menggunakan metode trapesium (*trapezoidal rule*). Berdasarkan hasil perhitungan pada rentang aktivitas air 0,50–0,82 dengan interval 0,02, diperoleh luas area histeresis sebesar 0,4988 atau setara dengan 49,88% bk. Nilai tersebut menunjukkan bahwa perbedaan antara lintasan Absorpsi dan desorpsi tergolong cukup besar, sehingga riwayat sorpsi air memberikan pengaruh yang nyata terhadap kadar air kesetimbangan beras sosoh varietas Inpari 32. Semakin luas area histeresis yang terbentuk, semakin besar pula perbedaan kadar air kesetimbangan antara proses Absorpsi dan desorpsi pada aktivitas air yang sama, yang mengindikasikan bahwa mekanisme pelepasan air berlangsung lebih lambat dibandingkan mekanisme penyerapan air.

Fenomena tersebut berkaitan dengan perubahan struktur internal bahan selama proses sorpsi. Pada proses Absorpsi, molekul air secara bertahap memasuki matriks beras dan berikatan dengan gugus hidrofilik yang terdapat pada komponen pati dan protein. Sebaliknya, selama proses desorpsi sebagian molekul air masih tertahan di dalam pori-pori dan kapiler bahan serta berikatan melalui ikatan hidrogen yang relatif kuat. Akibatnya, pelepasan air berlangsung lebih lambat dibandingkan proses penyerapan air sehingga nilai EMC desorpsi tetap lebih tinggi daripada EMC Absorpsi pada aktivitas air yang sama. Kondisi ini merupakan penyebab utama terbentuknya area histeresis di antara kedua kurva.

Hasil penelitian ini sesuai dengan teori yang dikemukakan oleh Van Den Berg & Bruin (1981) serta Labuza (1984) yang menyatakan bahwa histeresis merupakan karakteristik umum bahan pangan higroskopis akibat adanya perbedaan mekanisme Absorpsi dan desorpsi. Pada bahan berpati seperti beras, fenomena tersebut dipengaruhi oleh struktur kapiler, pembengkakan granula pati, serta kekuatan ikatan molekul air dengan matriks bahan selama proses sorpsi.

Secara praktis, hasil analisis histeresis menunjukkan bahwa riwayat kadar air beras memengaruhi kadar air kesetimbangan selama penyimpanan. Beras yang sebelumnya memiliki kadar air tinggi cenderung mempertahankan kandungan air lebih besar dibandingkan beras yang mengalami penyerapan air pada aktivitas air yang sama. Oleh karena itu, pengendalian kelembapan relatif gudang penyimpanan menjadi faktor penting untuk menjaga kadar air beras tetap stabil dan meminimalkan risiko penurunan mutu selama penyimpanan. Hasil penelitian ini memberikan informasi mengenai karakteristik histeresis beras sosoh varietas Inpari 32 yang dapat dimanfaatkan sebagai dasar dalam menentukan kondisi penyimpanan yang lebih aman dan efektif.

4.8 Implikasi *Moisture Sorption Isotherm* terhadap Kondisi Penyimpanan

Beras

Sesuai dengan tujuan penelitian, model Oswin yang telah ditetapkan sebagai model isotherm terbaik digunakan untuk mengestimasi nilai *Equilibrium Moisture Content* (EMC) beras sosoh varietas Inpari 32 pada beberapa kondisi kelembapan relatif (RH) yang umum dijumpai di gudang penyimpanan BULOG. Estimasi dilakukan pada tiga kondisi RH, yaitu 70%, 75%, dan 80%, yang masing-masing diasumsikan setara dengan aktivitas air (a_w) sebesar 0,70, 0,75, dan 0,80. Hasil estimasi EMC pada lintasan Absorpsi dan desorpsi kemudian dibandingkan dengan batas kadar air aman penyimpanan beras menurut SNI 6128:2020, yaitu maksimum 14% basis basah atau setara dengan 16,28% basis kering.

Tabel IV.11 Estimasi EMC kritis beras Inpari 32 pada rentang RH/ a_w aktual gudang BULOG berdasarkan model isotherm Oswin.

RH/ a_w Gudang	EMC Absorpsi (%bk)	EMC Absorpsi (%bb)	EMC Desorpsi (%bk)	EMC Desorpsi (%bb)	Status Keamanan
70% (0,70)	12,72	11,28	14,39	12,58	Aman (kedua lintasan)

RH/a_w Gudang	EMC Absorpsi (%bk)	EMC Absorpsi (%bb)	EMC Desorpsi (%bk)	EMC Desorpsi (%bb)	Status Keamanan
75% (0,75)	15,16	13,17	17,37	14,80	Waspada (desorpsi melampaui)
80% (0,80)	18,54	15,64	21,55	17,73	Melampaui (kedua lintasan)

4.8.1 Analisis EMC pada RH 70%

Pada RH 70% ($a_w = 0,70$), model Oswin mengestimasi EMC Absorpsi sebesar 12,72% bk/11,28% bb, sedangkan EMC desorpsi sebesar 14,39% bk/12,58% bb. Kedua nilai tersebut masih berada di bawah batas maksimum kadar air penyimpanan menurut SNI 6128:2020, yaitu 16,28% bk/14% bb. Buffer keamanan terhadap batas SNI masing-masing sebesar 3,56% bk pada lintasan Absorpsi dan 1,89% bk pada lintasan desorpsi.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada RH gudang sekitar 70%, beras sosoh varietas Inpari 32 masih berada pada kondisi penyimpanan yang relatif aman, baik apabila beras mengalami proses Absorpsi maupun desorpsi. Kondisi ini sejalan dengan rekomendasi FAO (2011) yang menyatakan bahwa kelembapan relatif gudang sebaiknya dipertahankan di bawah 70% untuk meminimalkan penyerapan uap air dan mempertahankan mutu beras selama penyimpanan. Selain itu, nilai a_w sekitar 0,70 juga masih berada pada batas bawah pertumbuhan sebagian besar kapang gudang sehingga risiko kerusakan biologis relatif rendah (Magan & Aldred, 2007).

Pada kondisi RH 70%, ancaman terhadap mutu beras relatif rendah karena kadar air kesetimbangan masih berada pada kondisi yang aman. Meskipun demikian, peningkatan RH secara terus-menerus tetap perlu diwaspadai karena dapat

meningkatkan penyerapan uap air oleh beras. Kondisi tersebut berpotensi meningkatkan aktivitas mikroorganisme dan hama gudang apabila kelembapan lingkungan meningkat atau berlangsung dalam waktu yang lama.

4.8.2 Analisis EMC pada RH 75%

Pada RH 75% ($a_w = 0,75$), EMC Absorpsi diperkirakan sebesar 15,16% bk/13,17% bb, yang masih berada di bawah batas maksimum SNI dengan buffer keamanan sekitar 1,12% bk. Sebaliknya, EMC desorpsi meningkat menjadi 17,37% bk/14,80% bb, sehingga telah melampaui batas kadar air aman sebesar 1,09% bk.

Temuan ini menunjukkan bahwa RH 75% merupakan ambang kewaspadaan bagi beras sosoh varietas Inpari 32. Beras yang masuk ke gudang dengan riwayat kadar air tinggi atau baru selesai mengalami proses pengeringan cenderung mengikuti lintasan desorpsi, sehingga pada kondisi RH tersebut kadar air kesetimbangannya telah melampaui batas aman penyimpanan. Dengan demikian, walaupun kadar air awal beras masih memenuhi standar penerimaan gudang, peningkatan kelembapan lingkungan hingga sekitar 75% berpotensi menyebabkan kadar air kesetimbangan meningkat melewati batas yang direkomendasikan.

Hasil ini menegaskan bahwa karakteristik isotherm sorpsi bersifat spesifik terhadap varietas. Oleh karena itu, informasi EMC berbasis varietas seperti yang diperoleh pada penelitian ini menjadi penting sebagai dasar dalam pengambilan keputusan penyimpanan, dibandingkan hanya mengandalkan batas kadar air umum yang ditetapkan dalam standar nasional.

Pada kondisi RH 75%, ancaman terhadap mutu beras mulai meningkat, terutama pada beras yang berada pada lintasan desorpsi. Kadar air yang lebih tinggi dapat meningkatkan ketersediaan air bagi pertumbuhan kapang dan mikroorganisme serta mendukung aktivitas hama gudang. Apabila kondisi kelembapan tersebut berlangsung dalam waktu lama, peningkatan kadar air juga dapat mempercepat penurunan mutu dan meningkatkan risiko kerusakan selama penyimpanan.

4.8.3 Analisis EMC pada RH 80%

Pada RH 80% ($a_w = 0,80$), nilai EMC beras sosoh varietas Inpari 32 meningkat secara nyata pada kedua lintasan sorpsi. EMC Absorpsi diperkirakan mencapai 18,54% bk (15,64% bb), sedangkan EMC desorpsi sebesar 21,55% bk (17,73% bb). Kedua nilai tersebut telah melampaui batas maksimum kadar air penyimpanan beras menurut SNI 6128:2020, yaitu 14% bb atau setara dengan 16,28% bk. Nilai EMC Absorpsi melebihi batas aman sebesar 2,26% bk, sedangkan EMC desorpsi melampaui batas tersebut sebesar 5,27% bk. Hasil ini menunjukkan bahwa pada kondisi RH 80%, beras akan mencapai kadar air kesetimbangan yang berada di atas batas aman penyimpanan sehingga berpotensi mengalami penurunan mutu apabila disimpan dalam waktu yang lama.

Peningkatan EMC yang relatif tajam pada A_w tinggi menunjukkan karakteristik khas kurva *Moisture Sorption Isotherm* tipe II. Pada rentang $A_w > 0,70$ (Zona III), mekanisme sorpsi didominasi oleh kondensasi kapiler di dalam pori-pori bahan. Akibatnya, kenaikan aktivitas air yang relatif kecil menghasilkan peningkatan kadar air kesetimbangan yang jauh lebih besar dibandingkan pada Zona I maupun Zona II. Karakteristik ini sesuai dengan teori isoterm sorpsi pangan yang menjelaskan bahwa air bebas mulai mendominasi pada aktivitas air tinggi sehingga kemampuan bahan menyerap uap air meningkat secara signifikan (Magan & Aldred, 2007).

Kondisi RH sekitar 80% juga meningkatkan risiko biologis selama penyimpanan. Sebagian besar kapang gudang, termasuk kapang penghasil mikotoksin seperti *Aspergillus flavus* dan *Aspergillus parasiticus*, dapat tumbuh pada aktivitas air di atas 0,75 (Magan & Aldred, 2007). Selain itu, kadar air beras yang melebihi 14% bb dapat meningkatkan laju respirasi biji serta mempercepat perkembangan hama gudang, seperti *Sitophilus* spp., sehingga mempercepat penurunan mutu selama penyimpanan. Oleh karena itu, kondisi RH mendekati 80% perlu dihindari dalam pengelolaan gudang BULOG agar kadar air kesetimbangan beras tetap berada di bawah batas aman penyimpanan.

4.8.4 Implikasi terhadap Sistem Penyimpanan Beras di Gudang BULOG

Hasil estimasi EMC menggunakan model Oswin menunjukkan bahwa perubahan kelembapan relatif gudang memberikan pengaruh yang sangat nyata terhadap kadar air kesetimbangan beras sosoh varietas Inpari 32. Berdasarkan hasil penelitian ini, kondisi RH gudang dapat dibagi menjadi tiga kategori operasional.

Pertama, $RH \leq 70\%$ merupakan zona aman, karena nilai EMC pada lintasan Absorpsi maupun desorpsi masih berada di bawah batas kadar air maksimum menurut SNI sehingga risiko penurunan mutu relatif kecil.

Kedua, RH sekitar 75% merupakan zona waspada, karena EMC pada lintasan desorpsi telah melampaui batas aman meskipun lintasan Absorpsi masih berada di bawah ambang batas. Pada kondisi ini diperlukan pemantauan RH gudang dan kadar air beras secara lebih intensif, terutama terhadap beras yang baru diterima dari proses pengeringan.

Ketiga, $RH \geq 80\%$ merupakan zona intervensi, karena nilai EMC hasil estimasi pada kedua lintasan sorpsi telah melampaui batas aman penyimpanan. Pada kondisi tersebut diperlukan tindakan pengendalian seperti peningkatan ventilasi, penggunaan sistem aerasi, pengaturan kelembapan udara (*dehumidification*), serta penerapan prinsip *first in first out* (FIFO) untuk mengurangi risiko penurunan mutu selama penyimpanan.

Hasil penelitian ini melengkapi penerapan SNI 6128:2020, yang menetapkan batas kadar air maksimum tanpa mempertimbangkan karakteristik sorpsi spesifik setiap varietas. Data isoterm sorpsi air dan estimasi EMC yang diperoleh dari penelitian ini memberikan informasi tambahan mengenai respons higroskopis beras sosoh varietas Inpari 32 terhadap perubahan kelembapan lingkungan. Dengan demikian, hasil penelitian ini berpotensi menjadi dasar ilmiah dalam pengembangan sistem pemantauan mutu penyimpanan beras yang lebih adaptif di gudang BULOG,

khususnya dalam menentukan ambang kelembapan gudang yang aman berdasarkan karakteristik varietas yang disimpan.

Bab V Kesimpulan dan Saran

Bab ini menyimpulkan hasil penelitian (5.1) dan menyampaikan saran yang bisa diajukan untuk penelitian selanjutnya (5.2).

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan diperoleh beberapa kesimpulan antara lain:

1. Kurva Absorpsi dan desorpsi sorpsi air beras sosoh varietas Inpari 32 pada rentang aktivitas air (a_w) 0,50–0,80 dan suhu 30°C berhasil dimodelkan menggunakan metode langsung berbasis *aw meter*. Kurva yang dihasilkan membentuk isoterm sorpsi sigmoid tipe II serta menunjukkan adanya perbedaan lintasan Absorpsi dan desorpsi.
2. Model Oswin merupakan model matematika terbaik dalam mendeskripsikan karakteristik sorpsi air beras sosoh varietas Inpari 32 berdasarkan evaluasi nilai koefisien determinasi (R^2), *Mean Relative Deviation* (MRD), dan kewajaran parameter fisik. Model ini menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,9504 dan MRD sebesar 6,24% pada Absorpsi, serta R^2 sebesar 0,9707 dan MRD sebesar 6,55% pada desorpsi.
3. Berdasarkan model Oswin, estimasi *Equilibrium Moisture Content* (EMC) menunjukkan bahwa pada kondisi RH 70% nilai EMC sebesar 12,72% bk pada lintasan Absorpsi dan 14,39% bk pada lintasan desorpsi, sehingga masih berada pada kondisi penyimpanan yang aman. Pada RH 75%, nilai EMC sebesar 15,16% bk pada lintasan Absorpsi masih berada di bawah batas maksimum kadar air menurut SNI 6128:2020, sedangkan pada lintasan desorpsi telah mencapai 17,37% bk, sehingga merupakan ambang kewaspadaan. Pada RH 80%, nilai EMC pada lintasan Absorpsi (18,54% bk) maupun desorpsi (21,55% bk) telah melampaui batas aman kadar air, sehingga berpotensi meningkatkan risiko penurunan mutu beras selama penyimpanan.

4. Karakteristik histeresis sorpsi air beras sosoh varietas Inpari 32 ditunjukkan oleh nilai *Equilibrium Moisture Content* (EMC) pada lintasan desorpsi yang selalu lebih tinggi dibandingkan lintasan Absorpsi pada aktivitas air yang sama, dengan Δ EMC berkisar antara 0,60–3,45% bk. Hasil ini menunjukkan bahwa riwayat kadar air bahan memengaruhi kadar air kesetimbangan yang dicapai selama penyimpanan dan menjadi pertimbangan dalam pengelolaan kelembapan relatif gudang.

5.2 Saran

1. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan rentang aktivitas air yang lebih luas, yaitu a_w 0,05–0,95, sehingga karakteristik *Moisture Sorption Isotherm* (MSI) pada Zona I, Zona II, dan Zona III dapat diamati secara lebih komprehensif. Rentang pengamatan yang lebih lengkap diharapkan menghasilkan parameter model isoterm yang lebih representatif.
2. Penelitian selanjutnya perlu dilakukan pada beberapa tingkat suhu penyimpanan untuk mengevaluasi pengaruh suhu terhadap karakteristik isoterm sorpsi air beras. Pengujian pada berbagai suhu akan menghasilkan model isoterm yang lebih representatif terhadap kondisi penyimpanan beras di Indonesia.
3. Penelitian selanjutnya disarankan membandingkan karakteristik isoterm sorpsi beberapa varietas beras dengan menggunakan metode dan kondisi pengujian yang sama. Perbandingan tersebut diharapkan dapat memberikan informasi mengenai pengaruh perbedaan varietas terhadap parameter model isoterm, nilai *Equilibrium Moisture Content* (EMC), serta karakteristik histeresis.
4. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan model prediksi perubahan kadar air dan umur simpan beras dengan mengintegrasikan data isoterm sorpsi, suhu, dan kelembapan relatif. Pengembangan tersebut diharapkan dapat mendukung penyusunan sistem penyimpanan beras yang lebih efektif dan berbasis prediksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Adawiyah, D. R., & Soekarto, S. T. (2010). PEMODELAN ISOTERMIS SORPSI AIR PADA MODEL PANGAN. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*, XXI No. 1.
- Adzigbe, J., Frimpong, F., Danquah, A., Danquah, E. Y., Asante, I. K., Abebrese, S. O., Dormatey, R., Afriyie-Debrah, C., Ribeiro, P. F., Owusu Danquah, E., Agyeman, K., Bam, R. K., & Asante, M. D. (2025). The responses and adaptations of rice (*Oryza sativa* L.) to drought stress: A review. Dalam *Climate Smart Agriculture* (Vol. 2, Nomor 4). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.csag.2025.100080>
- Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2002). Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Food Products: A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 80(2), 118–128. <https://doi.org/10.1205/09603080252938753>
- Aviara, N. (2020). Moisture Sorption Isotherms and Isotherm Model Performance Evaluation for Food and Agricultural Products. Dalam *Sorption in 2020s*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87996>
- Barbosa-Cánovas, G. V., Fontana, A. J., Schmidt, S. J., & Labuza, T. P. (2007). *Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications*. Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470376454>
- Basunia, M. A., & Abe, T. (1999). Moisture adsorption isotherms of rough rice. *Journal of Food Engineering*, 42(4), 235–242. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00127-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00127-2)
- BBPSI Padi. (2016). *Benih Padi & Deskripsi: Varietas Inpari 30 Ciherang Sub 1 dan Inpari 32 HDB Sebagai Pengganti Varietas Lama Ciherang*.
- Bell, L., & Labuza, T. (2000). *Moisture Sorption : Practical Aspects of Isotherm Measurement and Use*. Amer Assn of Cereal Chemists.
- BPS. (2023). *Konsumsi Rata-rata per Kapita Seminggu Beberapa Macam Bahan Makanan Penting*. <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/1/OTUwIzE=/rata-rata-konsumsi-per-kapita-seminggu-beberapa-macam-bahan-makanan-penting--2007-2023.html>.

- Brunauer, S., Deming, L. S., Deming, W. E., & Teller, E. (1940). On a Theory of the van der Waals Adsorption of Gases. *Journal of the American Chemical Society*, 62(7), 1723–1732. <https://doi.org/10.1021/ja01864a025>
- BSN. (2020). SNI 6128:2020 Beras. Dalam *Badan Standarisasi Nasional*. Jakarta. Badan Standarisasi Nasional.
- Champagne, E. T., Thompson, J. F., Bett-Garber, K. L., Mutters, R., Miller, J. A., & Tan, E. (2004). Impact of Storage of Freshly Harvested Paddy Rice on Milled White Rice Flavor. *Cereal Chemistry*, 81(4), 444–449. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2004.81.4.444>
- Chirife, J., del Pilar Buera, M., & Labuza, T. P. (1996). Water Activity, Water Glass Dynamics, and The Control of Microbiological Growth in Foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 36(5), 465–513. <https://doi.org/10.1080/10408399609527736>
- Cnossen, A. G., & Siebenmorgen, T. J. (2000). THE GLASS TRANSITION TEMPERATURE CONCEPT IN RICE DRYING AND TEMPERING: EFFECT ON MILLING QUALITY. *Transactions Of The Asae*, 43, 1661–1667.
- FAO. (2011). *Guide to Efficient Post-Harvest Management of Rice in the Tropics*. Food and Agriculture Organization.
- Fathoni, A., Hidayat, R., & Santoso, J. (2025). Physical and Physiological Quality of Rice Seeds of Inpari 32 Variety Under Different Harvest Ages, Packaging Types, and Storage Durations. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, 14(5), 1869–1881. <https://doi.org/10.23960/jtepl.v14i5.1869-1881>
- International Rice Research Institute. (2013). *Rice postharvest handbook*. IRRI.
- Juliano, B. O. (1993). *Rice in human nutrition*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- 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>
- Labuza, T. P. (1984). Moisture sorption: Practical aspects of isotherm measurement and use. St. Paul, Minnesota: American Association of Cereal Chemists. *St. Paul, Minnesota: American Association of Cereal Chemists*.

- Labuza, T. P., & Altunakar, B. (2020). Water Activity Prediction and Moisture Sorption Isotherms. Dalam *Water Activity in Foods* (hlm. 161–205). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118765982.ch7>
- Lestari, S., & Kurniawan, F. (2021). Pemutuan Fisik Gabah dan Beras Menurut Standar Nasional Indonesia (SNI). *Agriprima: Journal of Applied Agricultural Sciences*, 5(2), 159–168. <https://doi.org/10.25047/agriprima.v5i2.438>
- Lewicki, P. P. (1997). The applicability of the GAB model to food water sorption isotherms. *International Journal of Food Science and Technology*, 32(6), 553–557. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1997.tb02131.x>
- Lomauro, C., Bakshi, A., & Labuza, T. P. (1984). Evaluation of Food Moisture Sorption Isotherm Equations Part 1: Fruit, Vegetable and Meat Product. *Departement of Food Science and Nutrition, University of Minnesota*.
- Maftoon Azad, N., Alizadeh, A., Kazemiyan Jahromi, A., Ehsan Torkamani, A., Baghaei, S., & Mirazimi Abarghuei, F. (2023). Effects of thermodynamic properties of rice and ambient conditions on moisture migration during storage at naturally ventilated warehouses. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(7), 104761. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104761>
- Magan, N., & Aldred, D. (2007). Post-harvest control strategies: Minimizing mycotoxins in the food chain. *International Journal of Food Microbiology*, 119(1–2), 131–139. <https://doi.org/10.1016/J.IJFOODMICRO.2007.07.034>
- Mousa, W., Ghazali, F. Mohamad., Jinap, S., Ghazali, H. Mohd., & Radu, S. (2014). Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of Malaysian paddy. *Journal of Food Science and Technology*, 51(10), 2656–2663. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0799-4>
- Ozbekova, Z., & Kulmyrzaev, A. (2019). Study of moisture content and water activity of rice using fluorescence spectroscopy and multivariate analysis. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 223, 117357. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.117357>
- Pradipta, S., Ubaidillah, M., & Siswoyo, T. A. (2020). Physicochemical, Functional and Antioxidant properties of Pigmented Rice. *Current Research in Nutrition and Food Science Journal*, 8(3), 837–851. <https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.8.3.15>
- Pramahsari Putri, N., Yunaida, Wirda, Z., & Muaz Munauwar, M. (2023). PENGARUH KADAR AIR DAN PERIODE PENYIMPANAN BERAS TERHADAP POPULASI *Sitophilus zeamais* DAN KERUSAKAN BERAS. *Jurnal Agrium*, 20, No. 3, 275–283. <https://ojs.unimal.ac.id/index.php/agrium>

- Rahman, M. S. (2009). *Handbook Of Food Preservation (2nd Ed.)*. CRC Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781420017373>
- Rahmawati, Y., Muhidong, J., & Haerani. (2025). Isotherm Curve Model of Ciherang and Ciliwung Grain Varieties. *SALAGA Journal of Appropriate Technology for Agriculture Production and Processing*, 3(1), 18–26.
- San Martin, M. B., Mate, J. I., Fernandez, T., & Virseda, P. (2001). MODELLING ADSORPTION EQUILIBRIUM MOISTURE CHARACTERISTICS OF ROUGH RICE. *Drying Technology*, 19(3–4), 681–690. <https://doi.org/10.1081/DRT-100103944>
- Sasmitaloka, K. S., Haliza, W., Sukasih, E., Ardhiyanti, S. D., & Widowati, S. (2022). Pengaruh Derajat Sosoh dan Pencucian terhadap Karakteristik Nasi Instan Biofortifikasi. *agriTECH*, 42(3), 260. <https://doi.org/10.22146/agritech.67011>
- Suarti, B., Setiavani, G., Nusa, M. I., Fuadi, M., & Apriyanti, I. (2023). PERBEDAAN SIFAT FISIK DAN AMILOSA BERAS PECAH KULIT DAN BERAS SOSOH. *Warta Dharmawangsa*, 17.
- Sun, D.-W. (1999). Comparison and selection of EMC/ERH isotherm equations for rice. *Journal of Stored Products Research*, 35(3), 249–264. [https://doi.org/10.1016/S0022-474X\(99\)00009-0](https://doi.org/10.1016/S0022-474X(99)00009-0)
- Suparto, H., & Widyawati, W. (2024). UJI BERBAGAI JENIS BAHAN MATRICONDITIONING TERHADAP VIABILITAS DAN VIGOR BENIH PADI (ORYZA SATIVA L.) VARIETAS INPARI 32. *AgriPeat*, 25(02), 1–8. <https://doi.org/10.36873/agp.v25i02.15591>
- Syarief, R., & Halid, H. (1993). *Teknologi Penyimpanan Pangan*. Arcan. Kerjasama dengan Pusat Antar Universitas Pangan Dan Gizi IPB.
- Taveesuvun, C., Tirawanichakul, S., & Tirawanichakul, Y. (2022). Equilibrium Moisture Content Modeling and Study of Circulating-Bed Drying Kinetics of Non-Fragrant and Fragrant Paddy Varieties. *Trends in Sciences*, 19(14), 4950. <https://doi.org/10.48048/tis.2022.4950>
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9–10), 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
- Van Den Berg, C., & Bruin, S. (1981). *Water Activity: Influences on Food Quality*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-07552-4>

Zeymer, J. S., Corrêa, P. C., Oliveira, G. H. H., Baptestini, F. M., & Campos, R. C. (2019). MATHEMATICAL MODELING AND HYSTERESIS OF SORPTION ISOTHERMS FOR PADDY RICE GRAINS. *Engenharia Agrícola*, 39(4), 524–532. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v39n4p524-532/2019>

LAMPIRAN

Lampiran A. Perhitungan Pengkondisian Sampel

a. Perhitungan Absorpsi

Diketahui:

Kadar Air Awal = 4,6%

Kadar Air Target = 6%, 8%, 10%, 11%, 12%, 13%, 14%, 15%, 16%, 18%.

Bobot Sampel = 100 Gram

$$Volume\ Air\ (ml) = \left(\frac{MC\ Target\ (\%) - MC\ Awal\ (\%)}{100 - MC\ Target\ (\%)} \right) \times Bobot\ Sampel$$

$$Volume\ Air\ (ml) = \left(\frac{6\% - 4,6\%}{100 - 6\%} \right) \times 100\ gram = 1,49\ ml$$

$$Volume\ Air\ (ml) = \left(\frac{8\% - 4,6\%}{100 - 8\%} \right) \times 100\ gram = 3,7\ ml$$

$$Volume\ Air\ (ml) = \left(\frac{10\% - 4,6\%}{100 - 10\%} \right) \times 100\ gram = 6\ ml$$

$$Volume\ Air\ (ml) = \left(\frac{11\% - 4,6\%}{100 - 11\%} \right) \times 100\ gram = 7,2\ ml$$

$$Volume\ Air\ (ml) = \left(\frac{12\% - 4,6\%}{100 - 12\%} \right) \times 100\ gram = 8,4\ ml$$

$$Volume\ Air\ (ml) = \left(\frac{13\% - 4,6\%}{100 - 13\%} \right) \times 100\ gram = 9,7\ ml$$

$$Volume\ Air\ (ml) = \left(\frac{14\% - 4,6\%}{100 - 14\%} \right) \times 100\ gram = 10,93\ ml$$

$$Volume\ Air\ (ml) = \left(\frac{15\% - 4,6\%}{100 - 15\%} \right) \times 100\ gram = 12,24\ ml$$

$$Volume\ Air\ (ml) = \left(\frac{16\% - 4,6\%}{100 - 16\%} \right) \times 100\ gram = 13,57\ ml$$

$$Volume\ Air\ (ml) = \left(\frac{18\% - 4,6\%}{100 - 18\%} \right) \times 100\ gram = 16,34\ ml$$

b. Perhitungan Desorpsi

Diketahui:

Kadar Air Awal = 13,2%

Kadar Air Target = 20%

Bobot Sampel = 1200 Gram

$$Volume\ Air\ (ml) = \left(\frac{MC\ Target\ (\%) - MC\ Awal\ (\%)}{100 - MC\ Target\ (\%)} \right) \times Bobot\ Sampel$$

$$Volume\ Air\ (ml) = \left(\frac{20\% - 13,2\%}{100 - 20\%} \right) \times 1200\ gram = 102\ ml$$

Lampiran B. Data Hasil Perhitungan EMC Aktual

a. Absorpsi

Ulangan	Target KA (%bb)	KA Aktual (%bb)	Aw	EMC (%bk)	RATA-RATA KA	RATA-RATA AW	EMC AKHIR
1	6	6,6	0,54	7,07	6,8	0,55	7,3
2	6	6,9	0,55	7,41			
1	8	7,6	0,58	8,23	7,8	0,59	8,5
2	8	8	0,6	8,70			
1	10	10,5	0,67	11,73	10,7	0,66	12
2	10	10,9	0,65	12,23			
1	11	11,5	0,69	12,99	11,6	0,69	13,1
2	11	11,6	0,68	13,12			
1	12	12,9	0,74	14,81	12,6	0,73	14,4
2	12	12,2	0,72	13,90			
1	13	12,8	0,76	14,68	12,9	0,75	14,8
2	13	12,9	0,74	14,81			
1	14	14,5	0,75	16,96	14,4	0,76	16,8
2	14	14,3	0,76	16,69			
1	15	14,7	0,77	17,23	14,6	0,79	17,1
2	15	14,4	0,8	16,82			
1	16	15	0,82	17,65	15,1	0,81	17,8
2	16	15,2	0,79	17,92			
1	18	18	0,84	21,95	17,7	0,82	21,5
2	18	17,4	0,8	21,07			

b. Desorpsi

Ulangan	Target KA (%bb)	KA Aktual (%bb)	Aw	EMC (%bk)	RATA-RATA KA	RATA-RATA AW	EMC AKHIR
1	6	6	0,49	6,38	5,8	0,49	6,2
2	6	5,6	0,49	5,93			
1	8	7,4	0,56	7,99	7,5	0,56	8,1
2	8	7,5	0,56	8,11			
1	10	9,5	0,58	10,50	9,5	0,59	10,5
2	10	9,4	0,59	10,38			
1	11	10,9	0,63	12,23	10,9	0,63	12,2
2	11	10,9	0,63	12,23			
1	12	11,9	0,67	13,51	12,1	0,67	13,8
2	12	11,6	0,67	13,12			
1	13	12,6	0,69	14,42	12,7	0,69	14,5
2	13	12,7	0,69	14,55			
1	14	13,6	0,73	15,74	13,7	0,73	15,9
2	14	13,7	0,73	15,87			
1	15	14,9	0,74	17,51	14,9	0,74	17,5
2	15	14,8	0,74	17,37			
1	16	15,8	0,77	18,76	15,8	0,78	18,8
2	16	15,8	0,78	18,76			
1	18	17,6	0,79	21,36	17,7	0,80	21,5
2	18	17,7	0,8	21,51			

- Perhitungan Standar Deviasi Kadar Air Aktual**

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (xi - \bar{x})^2}{(n - 1)}}$$

Keterangan :

SD = Standar Deviasi

xi = Data ke-i

$\bar{x}$ = Nilai rata-rata

n = Banyak data

a. Absorpsi

Diketahui : 6% (6,6;6,9), 8% (7,6;8), 10% (10,5;10,9), 11% (11,5;11,6), 12% (12,9;12,2), 13% (12,8;12,9), 14% (14,5;14,3), 15% (14,7;14,4), 16% (15;15,2), 18% (18;17,4).

- **6%**

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{6,6 + 6,9}{2} = 6,8$$

$$(x_1 - \bar{x})^2 = (6,6 - 6,8)^2 = (-0,20)^2 = 0,04$$

$$(x_2 - \bar{x})^2 = (6,9 - 6,6)^2 = (0,10)^2 = 0,01$$

$$SD = \sqrt{\frac{0,05}{(2 - 1)}} = 0,2828 = 0,28$$

- **8%**

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{7,6 + 8}{2} = 7,8$$

$$(x_1 - \bar{x})^2 = (7,6 - 7,8)^2 = (-0,20)^2 = 0,04$$

$$(x_2 - \bar{x})^2 = (8 - 7,8)^2 = (0,20)^2 = 0,04$$

$$SD = \sqrt{\frac{0,08}{(2 - 1)}} = 0,2828 = 0,28$$

- **10%**

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{10,5 + 10,9}{2} = 10,7$$

$$(x_1 - \bar{x})^2 = (10,5 - 10,7)^2 = (-0,20)^2 = 0,04$$

$$(x_2 - \bar{x})^2 = (10,9 - 10,7)^2 = (0,20)^2 = 0,04$$

$$SD = \sqrt{\frac{0,08}{(2 - 1)}} = 0,2828 = 0,28$$

- **11%**

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{11,5 + 11,6}{2} = 11,6$$

$$(x_1 - \bar{x})^2 = (11,5 - 11,6)^2 = (-0,10)^2 = 0,01$$

$$(x_2 - \bar{x})^2 = (11,6 - 11,6)^2 = (0,00)^2 = 0,00$$

$$SD = \sqrt{\frac{0,01}{(2-1)}} = 0,1000 = 0,10$$

- **12%**

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{12,9 + 12,2}{2} = 12,6$$

$$(x_1 - \bar{x})^2 = (12,9 - 12,6)^2 = (0,30)^2 = 0,09$$

$$(x_2 - \bar{x})^2 = (12,2 - 12,6)^2 = (-0,40)^2 = 0,16$$

$$SD = \sqrt{\frac{0,25}{(2-1)}} = 0,5000 = 0,50$$

- **13%**

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{12,8 + 12,9}{2} = 12,9$$

$$(x_1 - \bar{x})^2 = (12,8 - 12,9)^2 = (-0,10)^2 = 0,01$$

$$(x_2 - \bar{x})^2 = (12,9 - 12,9)^2 = (0,00)^2 = 0,00$$

$$SD = \sqrt{\frac{0,01}{(2-1)}} = 0,1000 = 0,10$$

- **14%**

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{14,5 + 14,3}{2} = 14,4$$

$$(x_1 - \bar{x})^2 = (14,5 - 14,4)^2 = (0,10)^2 = 0,01$$

$$(x_2 - \bar{x})^2 = (14,3 - 14,4)^2 = (-0,10)^2 = 0,01$$

$$SD = \sqrt{\frac{0,20}{(2-1)}} = 0,1414 = 0,14$$

- **15%**

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{14,7 + 14,4}{2} = 14,6$$

$$(x_1 - \bar{x})^2 = (14,7 - 14,6)^2 = (0,10)^2 = 0,01$$

$$(x_2 - \bar{x})^2 = (14,4 - 14,6)^2 = (-0,20)^2 = 0,04$$

$$SD = \sqrt{\frac{0,05}{(2-1)}} = 0,2236 = 0,22$$

- **16%**

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{15 + 15,2}{2} = 15,1$$

$$(x_1 - \bar{x})^2 = (15 - 15,1)^2 = (-0,10)^2 = 0,01$$

$$(x_2 - \bar{x})^2 = (15,2 - 15,1)^2 = (0,10)^2 = 0,01$$

$$SD = \sqrt{\frac{0,02}{(2-1)}} = 0,1414 = 0,14$$

- **18%**

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{18 + 17,4}{2} = 17,7$$

$$(x_1 - \bar{x})^2 = (18 - 17,7)^2 = (0,30)^2 = 0,09$$

$$(x_2 - \bar{x})^2 = (18 - 17,7)^2 = (-0,30)^2 = 0,09$$

$$SD = \sqrt{\frac{0,18}{(2-1)}} = 0,4243 = 0,42$$

b. Desorpsi

Diketahui : 6% (6;5,6), 8% (7,4;7,5), 10% (9,5;9,4), 11% (10,9;10,9), 12% (11,9;11,6), 13% (12,6;12,7), 14% (13,6;13,7), 15% (14,9;14,8), 16% (15,8;15,8), 18% (17,6;17,7).

- **6%**

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{6 + 5,6}{2} = 5,8$$

$$(x_1 - \bar{x})^2 = (6 - 5,8)^2 = (0,20)^2 = 0,04$$

$$(x_2 - \bar{x})^2 = (5,6 - 5,8)^2 = (-0,20)^2 = 0,04$$

$$SD = \sqrt{\frac{0,08}{(2-1)}} = 0,2828 = 0,28$$

- **8%**

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{7,4 + 7,5}{2} = 7,5$$

$$(x_1 - \bar{x})^2 = (7,4 - 7,5)^2 = (-0,10)^2 = 0,01$$

$$(x_2 - \bar{x})^2 = (7,5 - 7,5)^2 = (0,00)^2 = 0,00$$

$$SD = \sqrt{\frac{0,01}{(2-1)}} = 0,1000 = 0,10$$

- **10%**

$$\bar{x} = \frac{x1 + x2}{2} = \frac{9,5 + 9,4}{2} = 9,5$$

$$(x1 - \bar{x})^2 = (9,5 - 9,5)^2 = (0,00)^2 = 0,00$$

$$(x2 - \bar{x})^2 = (9,4 - 9,5)^2 = (-0,10)^2 = 0,01$$

$$SD = \sqrt{\frac{0,01}{(2-1)}} = 0,1000 = 0,10$$

- **11%**

$$\bar{x} = \frac{x1 + x2}{2} = \frac{10,9 + 10,9}{2} = 10,9$$

$$(x1 - \bar{x})^2 = (10,9 - 10,9)^2 = (0,00)^2 = 0,00$$

$$(x2 - \bar{x})^2 = (10,9 - 10,9)^2 = (0,00)^2 = 0,00$$

$$SD = \sqrt{\frac{0,00}{(2-1)}} = 0,0000 = 0,00$$

- **12%**

$$\bar{x} = \frac{x1 + x2}{2} = \frac{11,9 + 11,6}{2} = 12,1$$

$$(x1 - \bar{x})^2 = (11,9 - 12,1)^2 = (-0,20)^2 = 0,04$$

$$(x2 - \bar{x})^2 = (11,6 - 12,1)^2 = (-0,50)^2 = 0,25$$

$$SD = \sqrt{\frac{0,29}{(2-1)}} = 0,5385 = 0,54$$

- **13%**

$$\bar{x} = \frac{x1 + x2}{2} = \frac{12,6 + 12,7}{2} = 12,7$$

$$(x1 - \bar{x})^2 = (12,6 - 12,7)^2 = (-0,10)^2 = 0,01$$

$$(x2 - \bar{x})^2 = (12,7 - 12,7)^2 = (0,00)^2 = 0,00$$

$$SD = \sqrt{\frac{0,01}{(2-1)}} = 0,1000 = 0,10$$

- **14%**

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{13,6 + 13,7}{2} = 13,7$$

$$(x_1 - \bar{x})^2 = (13,6 - 13,7)^2 = (0,10)^2 = 0,01$$

$$(x_2 - \bar{x})^2 = (13,7 - 13,7)^2 = (0,00)^2 = 0,00$$

$$SD = \sqrt{\frac{0,01}{(2 - 1)}} = 0,1000 = 0,10$$

- **15%**

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{14,9 + 14,8}{2} = 14,9$$

$$(x_1 - \bar{x})^2 = (14,9 - 14,9)^2 = (0,00)^2 = 0,00$$

$$(x_2 - \bar{x})^2 = (14,8 - 14,9)^2 = (0,10)^2 = 0,01$$

$$SD = \sqrt{\frac{0,01}{(2 - 1)}} = 0,1000 = 0,10$$

- **16%**

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{15,8 + 15,8}{2} = 15,8$$

$$(x_1 - \bar{x})^2 = (15,8 - 15,8)^2 = (0,00)^2 = 0,00$$

$$(x_2 - \bar{x})^2 = (15,8 - 15,8)^2 = (0,00)^2 = 0,00$$

$$SD = \sqrt{\frac{0,00}{(2 - 1)}} = 0,0000 = 0,00$$

- **18%**

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{17,6 + 17,7}{2} = 17,7$$

$$(x_1 - \bar{x})^2 = (17,6 - 17,7)^2 = (-0,10)^2 = 0,01$$

$$(x_2 - \bar{x})^2 = (17,7 - 17,7)^2 = (0,00)^2 = 0,00$$

$$SD = \sqrt{\frac{0,01}{(2 - 1)}} = 0,1000 = 0,10$$

- **Perhitungan EMC Aktual**

a. Absorpsi

Diketahui Kadar Air Aktual = 6,8; 7,8; 10,7; 11,6; 12,6; 12,9; 14,4; 14,6; 15,1; 17,7.

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{Kadar\ Air\ Aktual (\%bb)}{100 - Kadar\ Air\ Aktual (\%bb)} \right) \times 100$$

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{6,8}{100 - 6,8} \right) \times 100 = 7,3\%$$

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{7,8}{100 - 7,8} \right) \times 100 = 8,6\%$$

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{10,7}{100 - 10,7} \right) \times 100 = 12\%$$

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{11,6}{100 - 11,6} \right) \times 100 = 13,1\%$$

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{12,6}{100 - 12,6} \right) \times 100 = 14,4\%$$

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{12,9}{100 - 12,9} \right) \times 100 = 14,8\%$$

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{14,4}{100 - 14,4} \right) \times 100 = 16,8\%$$

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{14,6}{100 - 14,6} \right) \times 100 = 17,1\%$$

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{15,1}{100 - 15,1} \right) \times 100 = 17,8\%$$

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{17,7}{100 - 17,7} \right) \times 100 = 21,5\%$$

b. Desorpsi

Diketahui Kadar Air Aktual = 5,8; 7,5; 9,5; 10,9; 12,1; 12,7; 13,7; 14,9; 15,8; 17,7.

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{Kadar\ Air\ Aktual (\%bb)}{100 - Kadar\ Air\ Aktual (\%bb)} \right) \times 100$$

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{5,8}{100 - 5,8} \right) \times 100 = 6,2\%$$

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{7,5}{100 - 7,5} \right) \times 100 = 8,1\%$$

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{9,5}{100 - 9,5} \right) \times 100 = 10,5\%$$

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{10,9}{100 - 10,9} \right) \times 100 = 12,2\%$$

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{12,1}{100-12,1} \right) \times 100 = 13,8\%$$

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{12,7}{100-12,7} \right) \times 100 = 14,5\%$$

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{13,7}{100-13,7} \right) \times 100 = 15,9\%$$

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{14,9}{100-14,9} \right) \times 100 = 17,5\%$$

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{15,8}{100-15,8} \right) \times 100 = 18,8\%$$

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{17,7}{100-17,7} \right) \times 100 = 21,5\%$$

Lampiran C. Hasil Pemodelan Matematis MSI pada aplikasi OriginPro

- Absorpsi Model GAB**

Parameters

		Value	Standard Error	t-Value	Prob> t	Dependency
Equilibrium Moisture Content	Xm	48,75542	2469,20984	0,01975	0,9848	1
	C	0,19187	9,0732	0,02115	0,98372	1
	K	0,66315	2,69993	0,24562	0,81302	1

Reduced Chi-sqr = 1,07792262516

COD(R²) = 0,95524108212043

Iterations Performed = 400

Total Iterations in Session = 400

- Desorpsi Model GAB**

Parameters

		Value	Standard Error	t-Value	Prob> t	Dependency
Equilibrium Moisture Content	Xm	178,13026	54179,00239	0,00329	0,99747	1
	C	0,06186	18,29211	0,00338	0,9974	1
	K	0,62825	5,57453	0,1127	0,91343	1

Reduced Chi-sqr = 0,531737111362

COD(R²) = 0,98190535096604

Iterations Performed = 400

Total Iterations in Session = 400

- Absorpsi Model Oswin**

Parameters

		Value	Standard Error	t-Value	Prob> t	Dependency
Equilibrium Moisture Content	a	7,03121	0,53969	13,02813	1,14321E-6	0,91962
	b	0,69958	0,06296	11,11149	3,84441E-6	0,91962

Reduced Chi-sqr = 1,044334462

COD(R²) = 0,95044088447031
 Iterations Performed = 5
 Total Iterations in Session = 5

- **Desorpsi Model Oswin**

Parameters

		Value	Standard Error	t-Value	Prob> t	Dependency
Equilibrium Moisture Content	a	7,62553	0,40452	18,85068	6,48318E-8	0,87365
	b	0,74944	0,05039	14,87251	4,11699E-7	0,87365

Reduced Chi-sqr = 0,753045220728
 COD(R²) = 0,97071358612663
 Iterations Performed = 5
 Total Iterations in Session = 5

Lampiran D. Perhitungan Nilai MRD

a. Model GAB Absorpsi

EMC Aktual (%bk)	EMC Prediksi (%bk)	$\frac{M_{exp} - M_{pred}}{M_{exp}}$
7,20	7,62	0,0577
8,50	8,79	0,0344
12,00	11,27	0,0612
13,10	12,52	0,0442
14,40	14,42	0,0013
14,70	15,48	0,0529
16,80	16,04	0,0454
17,00	17,85	0,0501
17,80	19,18	0,0778
21,50	19,89	0,0748
Jumlah		0,4993

Keterangan :

EMC Prediksi didapatkan dari rumus EMC pemodelan GAB

$$MRD(\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{M_{exp,i} - M_{pred,i}}{M_{exp,i}} \right|$$

$$MRD(\%) = \frac{100}{10} \times 0,4993 = 4,993\% \approx 5,00\%$$

b. Model GAB Desorpsi

EMC Aktual (%bk)	EMC Prediksi (%bk)	$\frac{M_{exp} - M_{pred}}{M_{exp}}$
6,20	6,89	0,1114
8,00	8,93	0,1159
10,40	9,95	0,0433
12,20	11,48	0,0589
13,80	13,24	0,0408
14,50	14,21	0,0199
15,80	16,38	0,0370
17,40	16,98	0,0242
18,80	19,60	0,0425
21,40	21,07	0,0155
JUMLAH		0,5094

Keterangan :

EMC Prediksi didapatkan dari rumus EMC pemodelan GAB

$$MRD(\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{M_{exp,i} - M_{pred,i}}{M_{exp,i}} \right|$$

$$MRD(\%) = \frac{100}{10} \times 0,5094 = 5,094\% \approx \mathbf{5,09\%}$$

c. Model Oswin Absorpsi

EMC Aktual (%bk)	EMC Prediksi (%bk)	$\frac{M_{exp} - M_{pred}}{M_{exp}}$
7,20	7,82	0,1237
8,50	8,82	0,0671
12,00	10,89	0,0681
13,10	11,99	0,0606
14,40	13,66	0,0208
14,70	14,61	0,0316
16,80	15,12	0,0626
17,00	16,76	0,0450
17,80	17,99	0,0893
21,50	18,67	0,0553
JUMLAH		0,6241

Keterangan :

EMC Prediksi didapatkan dari rumus EMC pemodelan Oswin

$$MRD(\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{M_{exp,i} - M_{pred,i}}{M_{exp,i}} \right|$$

$$MRD (\%) = \frac{100}{10} \times 0,6241 = 6,241\% \approx \mathbf{6,24\%}$$

d. Model Oswin Desorpsi

EMC Aktual (%bk)	EMC Prediksi (%bk)	$\frac{M_{exp} - M_{pred}}{M_{exp}}$
6,20	7,40	0,1936
8,00	9,04	0,1420
10,40	9,85	0,0368
12,20	11,01	0,0686
13,80	12,29	0,0605
14,50	12,98	0,0421
15,80	14,52	0,0170
17,40	14,95	0,0402
18,80	16,92	0,0473
21,40	18,11	0,0071
JUMLAH		0,6553

Keterangan :

EMC Prediksi didapatkan dari rumus EMC pemodelan Oswin

$$MRD(\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{M_{exp,i} - M_{pred,i}}{M_{exp,i}} \right|$$

$$MRD (\%) = \frac{100}{10} \times 0,6553 = 6,553\% \approx \mathbf{6,55\%}$$

Lampiran E. Perhitungan Estimasi EMC Menggunakan Model Terbaik

a. Oswin Absorpsi

Diketahui:

- a=7,03121
- b=0,69958
- a_w=0,50; 0,52; 0,54; 0,56; 0,58; 0,60; 0,62; 0,64; 0,66; 0,68; 0,70; 0,72; 0,74; 0,76; 0,78; 0,80; 0,82.

$$M = a \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^b$$

$$M = 7,03121 \left(\frac{0,50}{1-0,50} \right)^{0,69958} = 7,03\%$$

$$M = 7,03121 \left(\frac{0,52}{1-0,52} \right)^{0,69958} = 7,44\%$$

$$M = 7,03121 \left(\frac{0,54}{1-0,54} \right)^{0,69958} = 7,87\%$$

$$M = 7,03121 \left(\frac{0,56}{1-0,56} \right)^{0,69958} = 8,32\%$$

$$M = 7,03121 \left(\frac{0,58}{1-0,58} \right)^{0,69958} = 8,81\%$$

$$M = 7,03121 \left(\frac{0,60}{1-0,60} \right)^{0,69958} = 9,34\%$$

$$M = 7,03121 \left(\frac{0,62}{1-0,62} \right)^{0,69958} = 9,90\%$$

$$M = 7,03121 \left(\frac{0,64}{1-0,64} \right)^{0,69958} = 10,52\%$$

$$M = 7,03121 \left(\frac{0,66}{1-0,66} \right)^{0,69958} = 11,18\%$$

$$M = 7,03121 \left(\frac{0,68}{1-0,68} \right)^{0,69958} = 11,91\%$$

$$M = 7,03121 \left(\frac{0,70}{1-0,70} \right)^{0,69958} = 12,72\%$$

$$M = 7,03121 \left(\frac{0,72}{1-0,72} \right)^{0,69958} = 13,61\%$$

$$M = 7,03121 \left(\frac{0,74}{1-0,74} \right)^{0,69958} = 14,62\%$$

$$M = 7,03121 \left(\frac{0,76}{1-0,76} \right)^{0,69958} = 15,75\%$$

$$M = 7,03121 \left(\frac{0,78}{1-0,78} \right)^{0,69958} = 17,04\%$$

$$M = 7,03121 \left(\frac{0,80}{1-0,80} \right)^{0,69958} = 18,54\%$$

$$M = 7,03121 \left(\frac{0,82}{1-0,82} \right)^{0,69958} = 20,31\%$$

b. Oswin Desorpsi

Diketahui:

- $a = 7,62553$
- $b = 0,74944$
- $a_w = 0,50; 0,52; 0,54; 0,56; 0,58; 0,60; 0,62; 0,64; 0,66; 0,68; 0,70; 0,72; 0,74; 0,76; 0,78; 0,80; 0,82.$

$$M = a \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^b$$

$$M = 7,62553 \left(\frac{0,50}{1 - 0,50} \right)^{0,74944} = 7,63\%$$

$$M = 7,62553 \left(\frac{0,52}{1 - 0,52} \right)^{0,74944} = 8,10\%$$

$$M = 7,62553 \left(\frac{0,54}{1 - 0,54} \right)^{0,74944} = 8,60\%$$

$$M = 7,62553 \left(\frac{0,56}{1 - 0,56} \right)^{0,74944} = 9,14\%$$

$$M = 7,62553 \left(\frac{0,58}{1 - 0,58} \right)^{0,74944} = 9,71\%$$

$$M = 7,62553 \left(\frac{0,60}{1 - 0,60} \right)^{0,74944} = 10,33\%$$

$$M = 7,62553 \left(\frac{0,62}{1 - 0,62} \right)^{0,74944} = 11,01\%$$

$$M = 7,62553 \left(\frac{0,64}{1 - 0,64} \right)^{0,74944} = 11,74\%$$

$$M = 7,62553 \left(\frac{0,66}{1 - 0,66} \right)^{0,74944} = 12,54\%$$

$$M = 7,62553 \left(\frac{0,68}{1 - 0,68} \right)^{0,74944} = 13,42\%$$

$$M = 7,62553 \left(\frac{0,70}{1 - 0,70} \right)^{0,74944} = 14,39\%$$

$$M = 7,62553 \left(\frac{0,72}{1 - 0,72} \right)^{0,74944} = 15,48\%$$

$$M = 7,62553 \left(\frac{0,74}{1 - 0,74} \right)^{0,74944} = 16,70\%$$

$$M = 7,62553 \left(\frac{0,76}{1 - 0,76} \right)^{0,74944} = 18,09\%$$

$$M = 7,62553 \left(\frac{0,78}{1 - 0,78} \right)^{0,74944} = 19,69\%$$

$$M = 7,62553 \left(\frac{0,80}{1 - 0,80} \right)^{0,74944} = 21,55\%$$

$$M = 7,62553 \left(\frac{0,50}{1-0,50} \right)^{0,74944} = 23,76\%$$

Lampiran F. Hasil Pemodelan Oswin pada aplikasi OriginPro untuk data a_w yang ditentukan

a. Absorpsi

Parameters

		Value	Standard Error	t-Value	Prob> t	Dependency
Equilibrium Moisture Content	a	7,03166	0,0011	6365,05181	1,17575E-49	0,83875
	b	0,69945	1,46144E-4	4786,06344	8,46578E-48	0,83875

Reduced Chi-sqr = 1,08723325014E-5

COD(R²) = 0,99999937716829

Iterations Performed = 5

Total Iterations in Session = 5

b. Desorpsi

Parameters

		Value	Standard Error	t-Value	Prob> t	Dependency
Equilibrium Moisture Content	a	7,62763	8,36102E-4	9122,84641	5,31361E-52	0,84689
	b	0,74926	1,00576E-4	7449,75057	1,10973E-50	0,84689

Reduced Chi-sqr = 6,52741295335E-6

COD(R²) = 0,9999997459154

Iterations Performed = 5

Total Iterations in Session = 5

Lampiran G. Perhitungan Histeresis

a. Hasil Selisih EMC (Δ EMC) Pada Setiap Titik A_w untuk Kedua Kurva.

$$\Delta \text{EMC}(A_w) = g(A_w) - f(A_w)$$

- 0,50: 7,63 – 7,03 = 0,60
- 0,52: 8,10 – 7,44 = 0,66
- 0,54: 8,60 – 7,87 = 0,73
- 0,56: 9,14 – 8,32 = 0,82

- 0,58: $9,71 - 8,81 = 0,90$
- 0,60: $10,33 - 9,34 = 0,99$
- 0,62: $11,01 - 9,90 = 1,11$
- 0,64: $11,74 - 10,52 = 1,22$
- 0,66: $12,54 - 11,18 = 1,36$
- 0,68: $13,42 - 11,91 = 1,51$
- 0,70: $14,39 - 12,72 = 1,67$
- 0,72: $15,48 - 13,61 = 1,87$
- 0,74: $16,70 - 14,62 = 2,08$
- 0,76: $18,09 - 15,75 = 2,34$
- 0,78: $19,69 - 17,04 = 2,65$
- 0,80: $21,55 - 18,54 = 3,01$
- 0,82: $23,76 - 20,31 = 3,45$

b. Hasil perhitungan luas Histeresis

Diketahui:

ΔA_w : 0,02

Ditanya: Luas Histeresis?

Jawab:

$$A = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta EMC_i + \Delta EMC_{i+1}}{2} \times \Delta A_w$$

$$0,50 - 0,52 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{0,60 + 0,66}{2} \times 0,02 = 0,0126$$

$$0,52 - 0,54 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{0,66 + 0,73}{2} \times 0,02 = 0,0139$$

$$0,54 - 0,56 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{0,73 + 0,82}{2} \times 0,02 = 0,0155$$

$$0,56 - 0,58 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{0,82 + 0,90}{2} \times 0,02 = 0,0172$$

$$0,58 - 0,60 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{0,90 + 0,99}{2} \times 0,02 = 0,0189$$

$$0,60 - 0,62 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{0,99 + 1,11}{2} \times 0,02 = 0,0210$$

$$0,62 - 0,64 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{1,11 + 1,22}{2} \times 0,02 = 0,0232$$

$$0,64 - 0,66 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{1,22 + 1,36}{2} \times 0,02 = 0,0258$$

$$0,66 - 0,68 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{1,36 + 1,51}{2} \times 0,02 = 0,0287$$

$$0,68 - 0,70 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{1,51 + 1,67}{2} \times 0,02 = 0,0318$$

$$0,70 - 0,72 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{1,67 + 1,87}{2} \times 0,02 = 0,0354$$

$$0,72 - 0,74 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{1,87 + 2,08}{2} \times 0,02 = 0,0395$$

$$0,74 - 0,76 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{2,08 + 2,34}{2} \times 0,02 = 0,0442$$

$$0,76 - 0,78 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{2,34 + 2,65}{2} \times 0,02 = 0,0499$$

$$0,78 - 0,80 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{2,65 + 3,01}{2} \times 0,02 = 0,0566$$

$$0,80 - 0,82 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{3,01 + 3,45}{2} \times 0,02 = 0,0646$$

$$\begin{aligned} A &= 0,0126 + 0,0139 + 0,0155 + 0,0172 + 0,0189 + 0,0210 + 0,0232 \\ &\quad + 0,0258 + 0,0287 + 0,0318 + 0,0354 + 0,0395 + 0,0442 + 0,0499 \\ &\quad + 0,0566 + 0,0646 \\ &= 0,4988 = 49,88 \% \text{bk} \end{aligned}$$

Lampiran H. Dokumentasi Analisis Kimia Beras Inpari 32



(A)



(B)

Keterangan:

A: Analisis Kimia Kadar Air (*Grain Moisture Meter LDS-1G*).

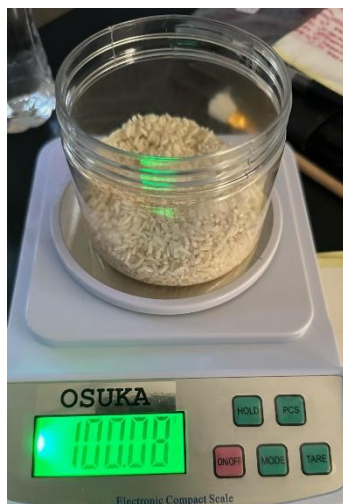
B: Analisis Kimia Aktivitas Air (*Activity Water Meter*).

Lampiran I. Dokumentasi Pengkondisian Beras Inpari 32 (Absorpsi)

(A)



(B)



(C)



(D)



(E)



(F)

Keterangan:

A: Pemerataan beras Inpari 32 ke *Tray*.

B: Pengeringan beras Inpari 32 Menggunakan *Dehydrator*.

C: Penimbangan Sampel

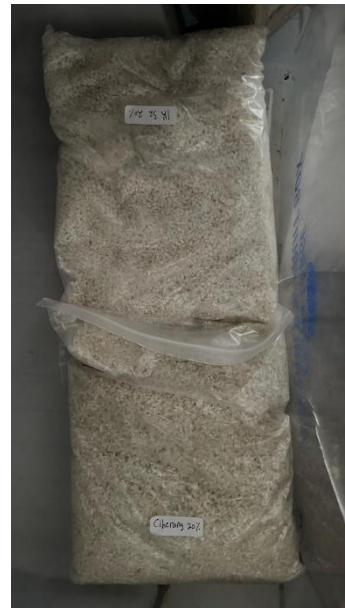
D: Penempatan beras ke dalam *Sealed Container* sesuai kadar air target

E: Penambahan air sesuai kadar air target

F: Inkubasi sampel (48 jam)

Lampiran J. Dokumentasi Pengkondisian Beras Inpari 32 (Desorpsi)

(A)



(B)



(C)



(D)

Keterangan:

A: Penambahan air hingga 20%

B: Penyimpanan pada *Chiller*

C: Pengeringan hingga kadar air target

D: Inkubasi sampel (48 jam)

Lampiran K. Dokumentasi Hasil Sampel Absorpsi

6%



8%



10%



11%



12%



13%



14%



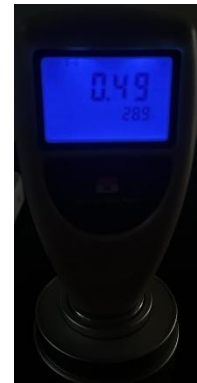
15%



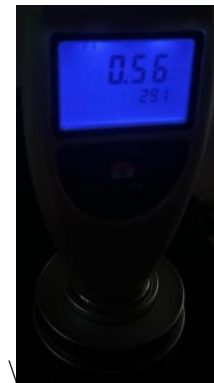
16%



18%

Lampiran L. Dokumentasi Hasil Sampel Desorpsi

6%



8%



10%



11%



12%



13%



14%



15%



16%



18%

Lampiran M. SNI 6128:2020 Beras.

5 Syarat mutu

Beras harus memenuhi persyaratan mutu umum dan mutu khusus.

5.1 Syarat umum

- a. bebas hama dan penyakit;
- b. bebas bau apak, asam atau bau asing lainnya;
- c. bebas dari campuran dedak dan bekatul, untuk beras sosoh;
- d. derajat sosoh minimal 95 %, untuk beras sosoh;
- e. kadar air maksimal 14 %;
- f. bebas dari bahan kimia yang membahayakan dan merugikan, serta aman bagi konsumen mengacu pada ketentuan peraturan yang berlaku.