

**KARAKTERISTIK SORPSI AIR BERAS SOSOH VARIETAS
CIHERANG 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 Pandu Munaadiyullah Asy-Syauqi
22.30.20.029**



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

ABSTRAK

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

Oleh

Muhammad Pandu Munaadiyullah Asy-Syauqi

NPM: 22.30.20.029

(Program Studi Teknologi Pangan)

Beras sosoh varietas Ciherang merupakan komoditas dominan pengadaan Perum BULOG di Jawa Barat, namun data karakteristik sorpsi air spesifik varietas ini pada zona penyimpanan gudang masih terbatas, padahal kadar air kesetimbangan (*Equilibrium Moisture Content/EMC*) lebih representatif dibanding kadar air aktual dalam menggambarkan risiko penurunan mutu selama penyimpanan. Penelitian ini bertujuan mengkarakterisasi kurva sorpsi air (absorpsi dan desorpsi) beras sosoh Ciherang pada rentang aktivitas air (A_w) 0,50–0,80 suhu 30°C, menentukan model isoterm terbaik antara GAB dan Oswin, serta mengestimasi EMC pada rentang kelembapan relatif (RH) aktual gudang BULOG. Sampel dipreparasi pada 10 taraf kadar air target (6–18%) dengan 2 ulangan untuk masing-masing lintasan sorpsi, kemudian nilai A_w dan EMC dianalisis menggunakan regresi nonlinear Levenberg-Marquardt. Hasil penelitian menunjukkan pola karakteristik isoterm sigmoid Tipe II pada zona A_w menengah–tinggi yang dikaji, dengan EMC meningkat dari 7,1 %bk (A_w 0,54) hingga 19,6 %bk (A_w 0,80) pada absorpsi, dan dari 5,7 %bk (A_w 0,53) hingga 21,5 %bk (A_w 0,80) pada desorpsi. Model isoterm Oswin dipilih sebagai model terbaik karena memenuhi kriteria *Mean Relative Deviation* (MRD) < 10% pada kedua lintasan (absorpsi 6,04%; desorpsi 9,74%) dengan parameter yang stabil secara fisik, sementara model GAB tidak memenuhi kriteria validasi pada lintasan absorpsi (MRD 11,27%), dan meskipun MRD desorpsi memenuhi kriteria, parameter kadar air monolayer yang dihasilkan ($M_0 = 178,13$ %bk) tidak realistis secara fisik akibat tidak tersedianya data pada zona monolayer. Fenomena histeresis teridentifikasi di seluruh rentang A_w yang dikaji, dengan ΔEMC meningkat monoton dari +1,03 %bk hingga +3,56 %bk dan luas area histeresis 0,51 %bk. Estimasi EMC menunjukkan beras Ciherang aman pada RH $\leq 70\%$ (EMC absorpsi 11,91 %bk; desorpsi 14,00 %bk), namun pada RH 75% EMC lintasan desorpsi (16,95 %bk) telah melampaui batas SNI 6128:2020 (16,28 %bk), dan pada RH 80% kedua lintasan telah melampaui batas tersebut. Riwayat kadar air beras (absorpsi vs desorpsi) terbukti memengaruhi EMC kesetimbangan secara konsisten pada RH gudang kritis. Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar ilmiah berbasis varietas untuk mendukung pengembangan sistem peringatan dini kualitas beras di gudang BULOG.

Kata kunci: beras sosoh Ciherang, *moisture sorption isotherm*, *equilibrium moisture content*, histeresis, model Oswin, gudang BULOG

ABSTRACT

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

By

Muhammad Pandu Munaadiyullah Asy-Syauqi

NIM: 22.30.20.029

(Department of Food Technology)

Milled Ciherang rice is a dominant commodity in Perum BULOG's procurement in West Java, yet variety-specific water sorption data within actual warehouse storage conditions remain limited, despite Equilibrium Moisture Content (EMC) being more representative than actual moisture content in describing quality deterioration risk during storage. This study aimed to characterize the water sorption curves (adsorption and desorption) of milled Ciherang rice within the water activity (A_w) range of 0.50–0.80 at 30°C, to determine the best-fit isotherm model between GAB and Oswin, and to estimate EMC across the actual relative humidity (RH) range of BULOG warehouses. Samples were prepared at 10 target moisture content levels (6–18%) with 2 replications for each sorption pathway, and A_w and EMC values were analyzed using Levenberg-Marquardt nonlinear regression. Results showed a Type II sigmoid isotherm pattern within the medium-to-high A_w zone studied, with EMC increasing from 7.1 %db (A_w 0.54) to 19.6 %db (A_w 0.80) for adsorption, and from 5.7 %db (A_w 0.53) to 21.5 %db (A_w 0.80) for desorption. The Oswin model was selected as the best-fit model, meeting the Mean Relative Deviation (MRD) < 10% criterion for both pathways (adsorption 6.04%; desorption 9.74%) with physically stable parameters, whereas the GAB model failed to meet the validation criterion for the adsorption pathway (MRD 11.27%), and although its desorption MRD met the criterion, the resulting monolayer moisture content parameter ($M_0 = 178.13$ %db) was physically unrealistic due to the absence of data within the monolayer zone. A hysteresis phenomenon was identified across the entire A_w range studied, with Δ EMC increasing monotonically from +1.03 %db to +3.56 %db and a hysteresis loop area of 0.51 %db. EMC estimation indicated that Ciherang rice remains safe at $RH \leq 70\%$ (adsorption EMC 11.91 %db; desorption EMC 14.00 %db), but at RH 75% the desorption EMC (16.95 %db) exceeded the SNI 6128:2020 threshold (16.28 %db), and at RH 80% both pathways exceeded this threshold. The rice's moisture history (adsorption vs. desorption) was shown to consistently affect the equilibrium moisture content at critical warehouse RH levels. These findings provide a variety-specific scientific basis to support the development of an early warning system for rice quality in BULOG warehouses.

Keywords: *Ciherang milled rice, moisture sorption isotherm, equilibrium moisture content, hysteresis, Oswin model, BULOG warehouse.*

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

Oleh:

Muhammad Pandu Munaadiyullah Asy-Syauqi

NPM: 22.30.20.029

(Program Studi Teknologi Pangan)

**Fakultas Teknik
Universitas Pasundan**

Menyetujui:

Tanggal.....13-9-2026.....

Dosen Pembimbing

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'R' followed by a series of loops and a long horizontal stroke.

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

**KARAKTERISTIK SORPSI AIR BERAS SOSOH VARIETAS
CIHERANG 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 Pandu Munaadiyullah Asy-Syauqi
NPM: 22.30.20.029
(Program Studi Teknologi Pangan)

**Fakultas Teknik
Universitas Pasundan**

Menyetujui:

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

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized 'R' followed by a horizontal line and a loop.

(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:

Asy-Syauqi, M. P. M. (2026): Karakteristik Sorpsi Air Beras Sosoh Varietas Ciherang Pada Zona Aktivitas Air Penyimpanan dan Implikasinya Terhadap Estimasi Kadar Air Keseimbangan Untuk Penyimpanan di Gudang BULOG, Tugas Akhir Program Sarjana, Universitas Pasundan.

Dan dalam Bahasa Inggris sebagai berikut:

Asy-Syauqi, M. P. M. (2026): *Moisture Sorption Characteristics of Ciherang 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.

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 CIHERANG PADA ZONA AKTIVITAS AIR PENYIMPANAN DAN IMPLIKASINYA TERHADAP ESTIMASI KADAR AIR KESETIMBANGAN UNTUK PENYIMPANAN DI GUDANG BULOG” dengan sebaik-baiknya.

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

1. Rini Triani, S,Si., M.,SC., Ph.D. selaku Dosen pembimbing utama yang telah membimbing dan memberikan ilmu yang bermanfaat bagi penulis selama penulisan usulan penelitian.
2. Nabila Marthia, S.T., M. SLP. dan Dr.Ir.Dian Risdianto, M.T. selaku Dosen Penguji yang telah memberikan saran dan pengetahuan tambahan bagi penulis selama penelitian dan penulisan tugas akhir.
3. Ibuku terkasih, izinkan aku mengucapkan semua beban yang bercampur bangga telah aku rengkuh, semua berpihak kepadaku, pasti doamu yang lancarkan upayaku, mesti doa yang meluncur dari bibirmu, dan yang aku tahu kau takkan pernah berhenti. Tumbuhku kini, semoga sesuai yang kau impi.

4. Kepada Saeful Ginanjar, Rully Rahmalia, dan Vilda Asyifa Dinurillah yang selalu memberikan dukungan doa, materi dan motivasi moral kepada Penulis selama penulisan tugas akhir.
5. Kepada perempuan yang lahir pada tanggal 7 Agustus 2003 dengan NPM akhir 110 yang selalu membersamai dan memberikan semangat kepada Penulis selama penulisan tugas akhir ini.
6. Teman Penulis yaitu Virgie, Gilang, Danis, Dandy, Dani, Mail, David, Calvin, Ridfa, Reistian, Kusna dan Rizky yang selalu membersamai dan memberi dukungan kepada penulis ketika penulisan tugas akhir.

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.

DAFTAR ISI

ABSTRAK	ii
<i>ABSTRACT</i>	iii
PEDOMAN PENGGUNAAN TUGAS AKHIR	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	6
1.3 Maksud dan Tujuan	6
1.4 Manfaat Penelitian	7
1.5 Kerangka Penelitian	8
1.6 Hipotesis.....	14
1.7 Waktu dan Tempat Penelitian	14
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	15
2.1 Beras sebagai Komoditas Pangan Strategis	15
2.2 Sifat Higroskopis Beras.....	17
2.3 Aktivitas Air.....	19
2.4 <i>Equilibrium Moisture Content</i> (EMC).....	20
2.5 <i>Moisture Sorption Isotherm</i> (MSI).....	22
2.5.1 Fenomena Histeresis	24
2.5.2 Model Isoterm MSI.....	25

2.6 Standar Mutu dan Kondisi Penyimpanan Beras di Gudang BULOG	27
III. METODOLOGI PENELITIAN.....	30
3.1 Bahan dan Alat Penelitian.....	30
3.1.1 Bahan – Bahan Penelitian	30
3.1.2 Alat Penelitian.....	30
3.2 Metode Penelitian.....	30
3.2.1 Rancangan Perlakuan	30
3.2.2 Rancangan Percobaan	31
3.2.3 Rancangan Analisis	31
3.2.4 Rancangan Respon	32
3.3 Prosedur Penelitian.....	33
3.3.1 Analisis Kimia Beras Ciherang.....	33
3.3.2 Preparasi Kadar Air Beras Ciherang	36
3.4 Analisis Data	40
3.4.1 Perhitungan <i>Equilibrium Moisture Content</i> (EMC).....	40
3.4.2 Penyusunan Kurva <i>Moisture Sorption Isotherm</i> (MSI)	40
3.4.3 Pemodelan <i>Moisture Sorption Isotherm</i> (MSI).....	41
3.4.4 Analisis Histeresis Sorpsi Air	43
3.4.5 Evaluasi Model <i>Moisture Sorption Isotherm</i> (MSI)	45
3.5 Jadwal Pelaksanaan Penelitian	47
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	55
4.1 Karakteristik Kimia Beras Ciherang	55
4.2 Preparasi Kadar Air Beras Ciherang	56
4.2.1 Preparasi Sampel Absorpsi	57
4.2.2 Preparasi Sampel Desorpsi.....	58
4.3 Penentuan <i>Equilibrium Moisture Content</i> (EMC) dan Karakteristik Kurva Sorpsi Air	60

4.3.1 Data EMC dan Aktivitas Air Hasil Pengukuran	60
4.3.2 Karakteristik Kurva Sorpsi Air Absorpsi dan Desorpsi Ciherang	61
4.4 Pemodelan Isoterm Kurva Sorpsi Air Beras Sosoh Ciherang.....	64
4.4.1 Pemodelan dan Evaluasi Model Isoterm GAB	65
4.4.2 Pemodelan dan Evaluasi Model Isoterm Oswin.	69
4.4.3 Pemilihan Model Isoterm Terbaik	74
4.5 Karakteristik Histeresis Sorpsi Air.....	75
4.6 Estimasi Kadar Air Keseimbangan pada Kondisi Gudang BULOG dan Implikasinya	80
4.6.1 Analisis EMC pada RH 70% (A_w 0,70)	82
4.6.2 Analisis EMC pada RH 75% (A_w 0,75)	82
4.6.3 Analisis EMC pada RH 80% (A_w 0,80)	83
4.6.4 Implikasi terhadap Sistem Pemantauan Pengelolaan Gudang	84
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	87
5.1 Kesimpulan	87
5.2 Saran.....	89
DAFTAR PUSTAKA	91
LAMPIRAN	97

DAFTAR TABEL

Tabel IV. 1 Karakteristik Kimia Beras Ciherang.....	55
Tabel IV. 2 Kadar Air Aktual dan Aktivitas Air Rerata Sampel Absorpsi (n=2). 57	
Tabel IV. 3 Kadar Air Aktual dan Aktivitas Air Rerata Sampel Desorpsi (n=2) . 58	
Tabel IV. 4 Data EMC (%bk) dan Aw Beras Sosoh Ciherang pada Suhu 30°C .. 60	
Tabel IV. 5 Parameter dan Kesesuaian Model Isoterm Beras Ciherang.....	64
Tabel IV. 6 Histeresis Sorpsi Air Beras Sosoh Ciherang Berdasarkan Perhitungan EMC Berbasis Persamaan Oswin.....	76
Tabel IV. 7 Estimasi EMC Kritis Beras Ciherang pada rentang RH/Aw Aktual Gudang BULOG Berdasarkan Model Isoterm Oswin.	81

DAFTAR GAMBAR

Gambar II 1. Beras Sosoh Ciherang.....	16
Gambar III. 1 Prosedur Analisis Kadar Air.	34
Gambar III. 2 Prosedur Analisis Aktivitas Air.	35
Gambar III. 3 Prosedur Preparasi Sampel Absorpsi	37
Gambar III. 4 Prosedur Preparasi Sampel Desorpsi.....	39
Gambar IV. 1 Kurva Moisture Sorpsi Isoterm (MSI) Hasil Pengamatan Beras Sosoh Ciherang.	62
Gambar IV. 2 Kurva Hasil Pemodelan Isoterm Sorpsi Air Proses Absorpsi Beras Sosoh Varietas Ciherang menggunakan Model GAB.....	66
Gambar IV. 3 Kurva Hasil Pemodelan Isoterm Sorpsi Air Proses Desorpsi Beras Sosoh Varietas Ciherang menggunakan Model GAB.....	68
Gambar IV. 4 Kurva Hasil Pemodelan Isoterm Sorpsi Air Proses Absorpsi Beras Sosoh Varietas Ciherang menggunakan Model Oswin.....	70
Gambar IV. 5 Kurva Hasil Pemodelan Isoterm Sorpsi Air Proses Desorpsi Beras Sosoh Varietas Ciherang menggunakan Model Oswin.....	72
Gambar IV. 6 Kurva Hubungan Aw dan EMC Hasil Evaluasi Model Oswin pada Titik Aktivitas Air Seragam untuk Analisis Histeresis	77
Gambar IV. 7. Prosedur Navigasi Keputusan Penyimpanan Beras.	86

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Hasil Pengamatan.....	97
Lampiran 2. Karakteristik Kimia Beras Ciherang.....	98
Lampiran 3. Perhitungan EMC (%bk) Absorpsi dan Desorpsi.....	100
Lampiran 4. Hasil Pemodelan Matematis MSI pada aplikasi OriginPro.....	102
Lampiran 5. Perhitungan Nilai MRD Berdasarkan Model Isoterm.....	103
Lampiran 6. Hasil Perhitungan EMC menggunakan Persamaan Model Isoterm Oswin Terpilih.	107
Lampiran 7. Nilai Parameter Model Oswin dan Hasil Fitting Curve untuk Nilai A_w yang ditentukan (0,54-0,80).	112
Lampiran 8. Dokumentasi Penelitian.....	113
Lampiran 9. SNI 6128:2020 Beras.	118

I. PENDAHULUAN

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

1.1 Latar belakang

Beras merupakan komoditas pangan strategis yang memiliki peran penting dalam sistem ketahanan pangan nasional Indonesia. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS, 2023), konsumsi beras per kapita penduduk Indonesia tercatat sekitar 94,9 kg per tahun atau setara dengan kurang lebih 260 gram per orang per hari, menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara dengan tingkat konsumsi beras per kapita tertinggi di dunia. Dengan jumlah penduduk yang mencapai lebih dari 278 juta jiwa pada tahun 2023, kebutuhan beras nasional secara keseluruhan diperkirakan mencapai lebih dari 30 juta ton per tahun (BPS, 2023). Besarnya skala kebutuhan ini menuntut ketersediaan cadangan beras yang tidak hanya memadai secara kuantitas, tetapi juga terjaga secara kualitas hingga beras tersebut sampai ke tangan konsumen

Dalam rangka memenuhi fungsi cadangan pangan tersebut, penyimpanan beras menjadi salah satu tahapan yang sangat menentukan dalam mempertahankan mutu hingga produk didistribusikan kepada masyarakat. Salah satu parameter yang harus dijaga selama penyimpanan adalah kadar air beras karena beras merupakan

bahan pangan higroskopis yang terus berinteraksi dengan lingkungan melalui proses absorpsi dan desorpsi uap air (Soekarto & Adawiyah, 2012)

Proses pertukaran uap air akan berlangsung hingga tercapai kondisi kesetimbangan higroskopis atau *Equilibrium Moisture Content* (EMC) (Soekarto & Adawiyah, 2012). Perubahan kadar air akibat fluktuasi kelembapan relatif (RH) gudang dapat meningkatkan laju respirasi bahan selama penyimpanan (Rahman, 2009). Kondisi tersebut juga dapat mempercepat pertumbuhan kapang dan serangga gudang sehingga mempercepat penurunan mutu produk (Bell & Labuza, 2000). Selain itu, perubahan kadar air yang berulang berpotensi memicu terjadinya retakan mikro (*micro-fissuring*) pada butir beras yang berdampak terhadap penurunan mutu fisik maupun fungsional selama penyimpanan (Changbandit dkk., 2024).

Kadar air merupakan salah satu parameter yang menentukan mutu dan keamanan beras, karena hampir seluruh proses degradasi fisik, kimia, dan biologis pada butir beras berkaitan langsung dengan besaran kadar airnya (Syarif & Halid, 1993). Populasi *Sitophilus zeamais* terbukti berkembang lebih cepat dan menimbulkan kerusakan yang lebih besar pada kadar air 14% (Putri dkk., 2023). Oleh karena itu, Standar Nasional Indonesia (SNI) menetapkan kadar air maksimum 14% (BSN, 2020) sebagai salah satu persyaratan mutu beras yang diterima di gudang BULOG untuk mempertahankan mutu dan memperpanjang masa simpan. Namun, nilai kadar air tersebut pada dasarnya merupakan batas praktis yang bersifat umum dan hanya menggambarkan jumlah air yang terkandung di dalam bahan pada saat pengukuran dilakukan serta belum mempertimbangkan

kondisi kesetimbangan antara beras dengan lingkungan selama penyimpanan maupun karakteristik higroskopis masing-masing varietas beras.

Beras merupakan bahan yang memiliki sifat higroskopis dan terus mengalami pertukaran uap air dengan udara di sekitarnya hingga mencapai kondisi kesetimbangan selama proses penyimpanan (Soekarto & Adawiyah, 2012). Oleh karena itu, kadar air kesetimbangan/*Equilibrium Moisture Content* (EMC) lebih representatif untuk menggambarkan kondisi penyimpanan dibandingkan kadar air, karena menunjukkan kadar air yang akan dicapai bahan pada suhu dan kelembapan relatif tertentu (Soekarto & Adawiyah, 2012; Kurniawan dkk., 2021). Informasi mengenai EMC memungkinkan prediksi kecenderungan beras menyerap atau melepaskan air selama penyimpanan sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan batas kadar air yang aman sesuai kondisi lingkungan gudang (Sugiyono dkk, 2010 ; Bell & Labuza, 2000).

Hubungan antara *Equilibrium Moisture Content* (EMC) dan aktivitas air (A_w) pada suhu tertentu dapat dijelaskan melalui pendekatan *Moisture Sorption Isotherm* (MSI) (Aini dkk., 2014). *Moisture Sorption Isotherm* digambarkan melalui kurva MSI (Adawiyah & Soekarto, 2010), yang menggambarkan perilaku higroskopis suatu bahan pangan terhadap perubahan aktivitas air, sehingga dapat digunakan untuk mengestimasi EMC pada berbagai kondisi lingkungan (Widowati dkk., 2010). Dalam penelitian ini, MSI diposisikan sebagai pendekatan ilmiah untuk mengkarakterisasi perilaku sorpsi air beras sosoh varietas Ciherang pada zona aktivitas air yang relevan terhadap penyimpanan.

Dalam konteks penyimpanan BULOG, suhu harian sekitar 28–34°C dan kelembapan relatif gudang berkisar antara 65–80%, setara dengan zona aktivitas air kesetimbangan sekitar A_w 0,65–0,80. Pada zona inilah perilaku sorpsi air beras paling menentukan risiko penurunan mutu, sehingga karakterisasi sorpsi air pada zona aktivitas air yang mencakup kondisi tersebut memiliki relevansi terhadap kondisi operasional gudang. Penelitian ini secara khusus mengkarakterisasi perilaku sorpsi pada rentang A_w 0,50–0,80, yang mencakup sebagian besar kondisi RH gudang aktual, sekaligus memberikan margin data pada A_w yang lebih rendah untuk memperkuat validitas pemodelan isoterm.

Pada kondisi RH di atas 70%, pertumbuhan kapang gudang seperti *Aspergillus* spp. dan *Penicillium* spp. yang berpotensi menghasilkan mikotoksin berbahaya, dan risiko tersebut meningkat tajam pada RH di atas 80% (Magan & Aldred, 2007). Kondisi ini menjadikan pengetahuan tentang nilai EMC beras pada suhu aktual gudang sebagai informasi yang sangat penting untuk pengelolaan gudang BULOG.

Varietas Ciherang merupakan varietas padi sawah inbrida hasil pemuliaan Balai Besar Penelitian Tanaman Padi pada tahun 2000 dan hingga kini menjadi varietas paling dominan ditanam di Indonesia, khususnya di Jawa Barat. Varietas Ciherang memiliki kadar amilosa sekitar 23% dan bobot 1.000 butir sekitar 27–28 gram (BPPSI Padi, 2018), sehingga menjadi penyumbang terbesar volume pengadaan beras BULOG di wilayah tersebut. Karakteristik komposisi kimia tersebut bukan sekadar atribut deskriptif, melainkan faktor yang secara langsung menentukan perilaku sorpsi uap air beras, karena perbedaan kadar amilosa dan

protein antarvarietas terbukti menghasilkan perbedaan nilai EMC pada kondisi RH dan suhu yang sama (Mousa dkk., 2014).

Meskipun berbagai penelitian mengenai isoterm sorpsi air pada beras telah dilakukan, sebagian besar penelitian masih berfokus pada karakterisasi isoterm secara umum atau menggunakan varietas serta bentuk bahan yang berbeda, seperti penelitian Wariyah (2010), menguji isoterm sorpsi untuk beras normal dan beras berkalsium, sedangkan Rahmawati dkk. (2025) hanya mencakup gabah, bukan beras sosoh.

Informasi mengenai karakteristik sorpsi air beras sosoh varietas Ciherang pada kondisi yang merepresentasikan penyimpanan aktual di gudang BULOG saat ini masih sangat terbatas. Padahal, proses penyosohan mengubah komposisi kimia permukaan butir secara signifikan yaitu menurunkan kadar lemak dan protein serta meningkatkan proporsi pati (Sasmitaloka dkk., 2022), sehingga berpotensi mengubah kapasitas sorpsi uap airnya. Oleh karena itu hasil penelitian pada varietas lain belum tentu dapat digunakan secara langsung untuk varietas lainnya. Keterbatasan data tersebut menyebabkan belum tersedianya informasi EMC yang spesifik sebagai dasar ilmiah dalam pengelolaan kadar air penyimpanan beras Ciherang di gudang BULOG.

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian mengenai pengembangan sistem peringatan dini (*Early Warning System*) kualitas beras di gudang BULOG. Dalam penelitian ini penelitian diarahkan untuk mengkarakterisasi perilaku sorpsi air beras sosoh varietas Ciherang 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 yang telah diuraikan, maka dapat diidentifikasi beberapa permasalahan sebagai berikut:

1. Belum diketahui karakteristik kurva sorpsi air untuk beras sosoh varietas Ciherang pada zona aktivitas air penyimpanan dengan suhu 30°C yang relevan terhadap kondisi gudang BULOG di Jawa Barat.
2. Belum diketahuinya model matematika isotherm yang paling tepat untuk mendeskripsikan kurva sorpsi air beras sosoh Ciherang pada zona penyimpanan.
3. Belum diketahui nilai *Equilibrium Moisture Content* (EMC) dan karakteristik histeresis beras sosoh varietas Ciherang pada rentang RH aktual gudang BULOG yang dapat digunakan sebagai acuan dasar dalam penyimpanan beras sosoh varietas Ciherang di gudang BULOG.

1.3 Maksud dan Tujuan

Maksud penelitian ini adalah menghasilkan data ilmiah mengenai perilaku sorpsi air beras sosoh Ciherang sebagai dasar praktis dalam pengelolaan mutu beras selama penyimpanan di gudang BULOG Jawa Barat. Adapun tujuan penelitian ini adalah:

1. Menyediakan data acuan berbasis varietas mengenai kecenderungan beras Ciherang menyerap atau melepaskan air pada kondisi RH gudang aktual, sebagai dasar evaluasi risiko penyimpanan yang lebih akurat dibanding hanya mengandalkan kadar air aktual.
2. Menghasilkan estimasi nilai Equilibrium Moisture Content (EMC) pada rentang RH kritis gudang (70%, 75%, 80%), sebagai acuan penentuan ambang batas kadar air operasional yang lebih presisi dibanding standar umum SNI 6128:2020.
3. Memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan sistem peringatan dini (Early Warning System) kualitas beras di gudang BULOG, khususnya terkait pengaruh riwayat kadar air (absorpsi vs desorpsi) terhadap risiko peningkatan kadar air selama penyimpanan.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi baik secara teoritis maupun praktis dalam bidang teknologi pascapanen pangan, antara lain:

1. Mengisi celah data sorpsi air beras sosoh varietas Ciherang pada zona penyimpanan yang belum tersedia dalam literatur, sehingga berkontribusi pada ilmu teknologi pangan pascapanen Indonesia.
2. Memberikan data referensi ambang kadar air berbasis varietas untuk mendukung pengembangan sistem peringatan dini (EWS) kualitas beras di gudang BULOG.
3. Menyediakan data ilmiah mengenai hubungan aktivitas air dan kadar air kesetimbangan beras sosoh varietas Ciherang yang dapat digunakan sebagai

dasar dalam penyusunan strategi pengelolaan penyimpanan beras, sehingga mendukung terjaganya mutu beras yang didistribusikan kepada Masyarakat.

1.5 Kerangka Penelitian

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan pada latar belakang, diperlukan suatu kerangka pemikiran yang menjelaskan mengenai beras, dan hubungan antara kurva MSI beras selama penyimpanan.

Beras sosoh (*milled rice*) merupakan produk beras yang mengalami proses penyosohan yang mengikis lapisan perikarp, tegmen, dan aleuron mengubah komposisi kimia permukaan butir beras secara signifikan proporsi pati (amilosa dan amilopektin) meningkat, sedangkan kandungan lemak dan protein menurun sehingga memengaruhi karakteristik higroskopis beras sosoh dibandingkan dengan gabah utuh (Sasmitaloka dkk., 2022)

Selama penyimpanan, beras sosoh yang bersifat higroskopis akan terus berinteraksi dengan lingkungannya melalui proses pertukaran uap air yang dikendalikan oleh perbedaan tekanan uap air antara permukaan butir beras direpresentasikan sebagai aktivitas air (A_w) dengan tekanan uap air udara sekitarnya yang ditunjukkan oleh kelembapan relatif (*Relative Humidity*/RH). Selama masih terdapat perbedaan tekanan uap air antara bahan dan lingkungan, molekul air akan berpindah hingga tercapai kondisi kesetimbangan (Van den Berg & Bruin, 1981; Soekarto & Adawiyah, 2012).

Ketika RH udara lebih tinggi daripada aktivitas air beras ($RH > A_w \times 100\%$), beras akan menyerap uap air dari udara melalui proses absorpsi sehingga kadar airnya meningkat (Soekarto & Adawiyah, 2012). Sebaliknya, apabila RH

udara lebih rendah daripada aktivitas air beras, air akan dilepaskan ke lingkungan melalui proses desorpsi yang menyebabkan penurunan kadar air beras (Labuza, 1984). Kondisi RH gudang penyimpanan BULOG berada pada kisaran 65–80% bergantung pada musim, menjadikan dinamika absorpsi dan desorpsi ini berlangsung nyata, berulang, dan berpotensi mendorong kadar air beras melampaui batas maksimum yang ditetapkan SNI 6128:2020 sebesar 14% (bb) (BSN, 2020)

Proses absorpsi maupun desorpsi akan berlangsung terus-menerus hingga tekanan uap air pada permukaan butir beras setara dengan tekanan uap air udara di sekitarnya. Pada kondisi kesetimbangan tersebut, aktivitas air bahan setara dengan *Equilibrium Relative Humidity* (ERH/100), sedangkan kadar air yang dimiliki bahan pada kondisi setimbang disebut *Equilibrium Moisture Content* (EMC) (Labuza, 1984; Van den Berg & Bruin, 1981). EMC merupakan parameter yang lebih representatif dibandingkan kadar air, karena EMC menggambarkan kadar air yang secara teoritis akan dicapai bahan apabila dibiarkan dalam kondisi suhu dan RH tertentu dalam waktu yang cukup lama selama proses penyimpanan (Widowati dkk., 2010).

Informasi EMC memungkinkan prediksi arah perubahan kadar air beras selama penyimpanan, apabila kadar air aktual beras lebih rendah dari nilai EMC pada kondisi RH gudang, maka beras cenderung menyerap uap air hingga kadar airnya meningkat mendekati nilai EMC tersebut, dan sebaliknya (Labuza, 1984 ; Sugiyono dkk., 2010). Dalam konteks pengelolaan gudang BULOG, nilai EMC pada berbagai tingkat RH aktual gudang merupakan parameter acuan untuk

mengetahui risiko peningkatan kadar air beras sebelum gejala kerusakan fisik muncul, evaluasi stabilitas produk, dan estimasi keamanan penyimpanan beras.

Hubungan antara aktivitas air dan kadar air kesetimbangan pada suhu konstan digambarkan melalui kurva *Moisture Sorption Isotherm* (MSI). Kurva MSI bersifat khas untuk setiap produk pangan karena sangat ditentukan oleh komposisi kimia, struktur fisik, dan suhu pengukurannya (Mousa dkk., 2014;Widowati dkk., 2010). Pada produk berbasis pati seperti beras, kurva MSI umumnya berbentuk sigmoid tipe II yang mencerminkan tiga zona sorpsi, yaitu zona Aw rendah dengan air terikat kuat pada permukaan sebagai monolayer, zona Aw menengah dengan formasi lapisan multilayer, dan zona Aw tinggi dengan air berperilaku menyerupai air bebas yang mendukung pertumbuhan mikroorganisme berbahaya (Sun, 1999). Dalam penelitian ini, MSI diposisikan sebagai pendekatan ilmiah untuk mendeskripsikan hubungan kuantitatif antara Aw dan EMC beras Ciherang bukan sebagai tujuan akhir penelitian, sehingga persamaan yang dihasilkan dapat digunakan untuk mengestimasi nilai EMC pada berbagai kondisi RH aktual gudang BULOG (Van den Berg & Bruin, 1981)

Salah satu karakteristik MSI yang dilaporkan pada produk pangan berbasis pati adalah fenomena histeresis, yaitu perbedaan nilai EMC antara kurva absorpsi dan kurva desorpsi pada nilai Aw yang sama. Histeresis terjadi akibat perbedaan mekanisme fisik antara proses pengikatan air pada permukaan bahan saat absorpsi dan pelepasan air dari struktur kapiler matriks polimer pati saat desorpsi yang mengakibatkan kedua lintasan isoterm tidak pernah sepenuhnya berhimpit (Mousa dkk., 2014).

Fenomena ini telah dilaporkan pada gabah dan beras, serta pada komponen-komponen penyusun utamanya seperti amilosa, amilopektin, protein, dan selulosa (Zeymer dkk., 2019). Fenomena histeresis menunjukkan adanya perbedaan nilai EMC antara lintasan absorpsi dan desorpsi pada aktivitas air yang sama, di mana kurva desorpsi selalu berada di atas kurva absorpsi (Zeymer dkk., 2019). Perbedaan tersebut dianalisis secara kuantitatif melalui nilai selisih kadar air kesetimbangan (ΔEMC), sedangkan luas area histeresis digunakan sebagai indikator kemampuan bahan mempertahankan kadar air ketika terjadi fluktuasi RH lingkungan. Semakin luas area histeresis, semakin lambat beras merespons perubahan kelembapan harian maupun musiman di dalam ruang simpan (Zeymer dkk., 2019).

Dari perspektif manajemen gudang BULOG, karakterisasi terpisah antara kurva absorpsi dan desorpsi sangat diperlukan karena merepresentasikan dua skenario penerimaan beras yang berbeda. Beras yang masuk gudang dengan kadar air di bawah 14% (bb) dan terpapar RH tinggi akan mengalami peningkatan kadar air mengikuti lintasan absorpsi. Sebaliknya, beras yang diterima dengan kadar air di atas ambang batas SNI dan mengalami pengeringan alami di dalam gudang akan mengikuti lintasan desorpsi. Kedua lintasan ini menghasilkan nilai kesetimbangan dan tingkat risiko kerusakan mutu yang berbeda pada RH udara yang sama.

Untuk menggambarkan hubungan A_w dengan EMC secara kuantitatif dan menghasilkan persamaan prediktif yang aplikatif, digunakan model matematika isotherm, pada penelitian ini menggunakan dua model isotherm, yaitu:

1. Model GAB (*Guggenheim–Anderson–de Boer*) merupakan pengembangan model BET dengan penambahan konstanta koreksi sorpsi multilayer (K)

sehingga valid pada rentang Aw yang lebih luas (0,05–0,90), dan terbukti memberikan kesesuaian terbaik untuk produk pangan berbasis pati dan sereal termasuk jagung (Samapundo dkk., 2007; Rukmawati dkk., 2017) dan beras (Sun, 1999).

2. Model Oswin merupakan model empiris dua parameter berbasis transformasi matematis kurva sigmoid yang terbukti memberikan kesesuaian terbaik untuk gabah varietas MR219 di Malaysia dibandingkan GAB dan BET (Mousa dkk., 2014), dan telah digunakan pada penelitian MSI gabah varietas lokal Indonesia (Rahmawati dkk., 2025).

Adapun model BET yang tidak digunakan dalam penelitian ini karena rentang validitasnya hanya mencakup Aw 0,05–0,45 (Van den Berg & Bruin, 1981; Lomauro & Labuza, 1985), sedangkan seluruh data penelitian ini berada pada zona Aw 0,50–0,80 yang merupakan rentang operasional aktual gudang beras. Pemilihan model terbaik didasarkan pada nilai koefisien determinasi (R^2) tertinggi mendekati 1 dan nilai *Mean Relative Deviation* (MRD) terendah, dengan $MRD < 10\%$ sebagai kriteria kesesuaian model yang baik (Adawiyah & Soekarto, 2010; Palupi dkk., 2024).

Penelitian ini secara sengaja memfokuskan pengukuran pada rentang aktivitas air 0,50–0,80, karena zona inilah yang relevan dengan kondisi penyimpanan beras di gudang tropis, termasuk gudang BULOG. Kondisi lingkungan gudang penyimpanan bahan pangan di wilayah tropis seperti Indonesia umumnya memiliki RH yang berfluktuasi antara 65–80% bergantung pada musim dan setara dengan nilai Aw kesetimbangan pada rentang 0,65–0,80. FAO (2011)

menetapkan kondisi ideal penyimpanan beras di iklim tropis memerlukan RH di bawah 70%, dan IRRI (2013) merekomendasikan kadar air aman jangka panjang pada 13–14% bb di suhu 25–30°C keduanya menunjukkan bahwa rentang A_w 0,65–0,75 adalah zona kritis yang perlu dipahami dalam konteks gudang konvensional tanpa pendingin aktif.

Secara biologis, zona A_w 0,70–0,75 merupakan ambang tumbuhnya kapang gudang xerofitik seperti *Aspergillus flavus* dan *A. parasiticus* yang menghasilkan aflatoxin berbahaya, dan pada A_w di atas 0,75 sebagian besar kapang gudang dapat tumbuh secara optimal (Magan & Aldred, 2007). Sebaliknya, zona A_w di bawah 0,50 secara praktis tidak pernah dijumpai di gudang beras konvensional tanpa sistem pendingin dan pengering aktif di wilayah tropis (FAO, 2011), sehingga data EMC pada zona tersebut tidak memiliki relevansi operasional langsung. Dengan demikian, pembatasan pengukuran pada zona A_w 0,50–0,80 merupakan keputusan desain penelitian yang disengaja untuk memaksimalkan relevansi dan nilai terapan hasil penelitian bagi pengelolaan gudang BULOG Jawa Barat.

Model sorpsi terpilih selanjutnya digunakan untuk mengestimasi nilai EMC beras Ciherang pada kondisi RH aktual yang umum dijumpai di gudang BULOG. Estimasi dilakukan pada tiga nilai RH kritis yaitu, 70% ambang peringatan menurut FAO (2011) dan 75–80% ambang kritis batas pertumbuhan optimal kapang gudang (Magan & Aldred, 2007). Nilai EMC yang dihasilkan dari estimasi ini dikonversi menjadi *threshold*/ambang batas kadar air kritis berbasis varietas, yaitu nilai kadar air beras Ciherang yang tidak boleh dilampaui pada masing-masing kondisi RH gudang agar A_w beras tidak memasuki zona pertumbuhan kapang.

Dengan demikian, data MSI yang dihasilkan dalam penelitian ini menjadi landasan ilmiah berbasis varietas bagi Perum BULOG untuk menetapkan ambang batas kadar air yang lebih akurat dalam sistem pemantauan mutu gudang, sebagai pelengkap yang lebih presisi dari standar umum SNI 6128:2020 yang belum mempertimbangkan karakteristik higroskopis spesifik per varietas (BSN, 2020).

1.6 Hipotesis

1. Diduga kurva absorpsi dan desorpsi beras sosoh varietas Ciherang menunjukkan fenomena histeresis yang ditandai oleh perbedaan nilai *Equilibrium Moisture Content* (EMC) pada zona aktivitas air penyimpanan.
2. Diduga model GAB merupakan model yang paling sesuai dalam mendeskripsikan kurva sorpsi air beras Ciherang pada zona aktivitas air penyimpanan dibandingkan model Oswin.
3. Diduga nilai *Equilibrium Moisture Content* (EMC) meningkat seiring dengan meningkatnya aktivitas air (A_w) pada beras sosoh varietas Ciherang.

1.7 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium External, Jln Pasir Impun Barat, Bandung. Penelitian berlangsung selama 5 (lima) minggu, mulai dari bulan Juni hingga Juli 2026.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini akan menguraikan mengenai: (2.1) Beras sebagai Komoditas Pangan Strategis, (2.2) Sifat Higroskopis Bahan Pangan Berbasis Pati, (2.3) Aktivitas Air, (2.4) *Equilibrium Moisture Content* (EMC), (2.5) *Moisture Sorption Isotherm* (MSI), dan (2.6) Standar Mutu dan Kondisi Penyimpanan Beras di Gudang BULOG.

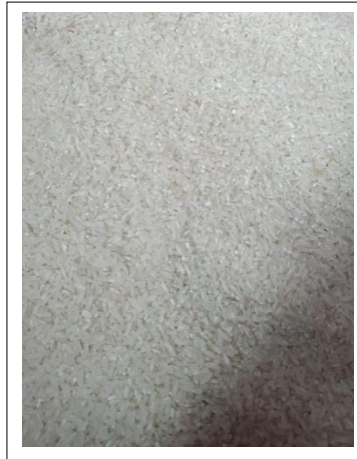
2.1 Beras sebagai Komoditas Pangan Strategis

Beras sosoh (*milled rice*) adalah beras pecah kulit yang telah disosoh untuk melepaskan lapisan perikarp, tegmen, dan aleuron yang kaya akan bekatul, sehingga dihasilkan butiran putih bersih dengan penampilan yang lebih disukai konsumen (Hasnelly dkk., 2020).

Proses penyosohan menyebabkan kandungan lemak, vitamin, mineral, dan serat pangan menurun karena sebagian besar komponen tersebut berada pada lapisan aleuron dan embrio (Juliano, 1993). Perubahan komposisi permukaan ini berpengaruh pada karakteristik higroskopis butir beras sosoh, yang dapat memengaruhi interaksi butir dengan uap air di lingkungan penyimpanan (Rahman, 2009).

Varietas Ciherang merupakan varietas unggul inbrida hasil pemuliaan Balai Besar Penelitian Tanaman Padi yang dilepas pada tahun 2000 dan hingga kini menjadi varietas padi sawah paling dominan ditanam di Indonesia, khususnya di Jawa Barat (BPPSI Padi, 2018). Varietas ini memiliki bentuk gabah panjang ramping, beras berwarna sedikit kecoklatan, tekstur nasi pulen, kadar amilosa

sekitar 23%, bobot 1.000 butir 27–28 gram, rata-rata hasil 5–7 ton/ha gabah kering giling, dan umur tanaman 116–125 hari setelah semai (BPPSI Padi, 2018).



Gambar II 1. Beras Sosoh Ciherang
Sumber: (Asy-Syauqi, 2026)

Secara kimia, beras sosoh tersusun atas sekitar 75–80% pati, 6–8% protein, 0,3–0,8% lemak, serta sejumlah kecil mineral dan air (Hasnelly dkk., 2020). Pati yang tersusun atas amilosa dan amilopektin berperan besar dalam menentukan kemampuan beras mengikat air, proses gelatinisasi, dan perilaku sorpsi selama penyimpanan (Taveesuvun dkk., 2022).

Kadar amilosa sebesar 23% menempatkan Ciherang dalam kategori amilosa sedang, yang berimplikasi pada kapasitas pengikatan air dan nilai kesetimbangan air (EMC) yang spesifik apabila dibandingkan dengan varietas beramilosa rendah maupun tinggi (Mousa dkk., 2014). Studi terhadap beras Indonesia menunjukkan bahwa variasi kandungan amilosa dan protein antar varietas turut menyebabkan perbedaan karakteristik sorpsi air yang spesifik per varietas (Susiyanti dkk., 2020). Selain pati, protein dan lemak juga menyediakan gugus hidrofilik yang mampu

mengikat molekul air melalui ikatan hidrogen sehingga memengaruhi kadar air kesetimbangan bahan (Van den Berg & Bruin, 1981).

Dalam sistem penyimpanan skala besar seperti di gudang BULOG, perubahan kadar air akibat interaksi antara beras dan lingkungan menjadi salah satu faktor yang menentukan keberhasilan penyimpanan jangka panjang (FAO, 2011). Kondisi suhu dan kelembapan relatif gudang yang berubah-ubah akan memengaruhi kadar air kesetimbangan (EMC) beras (Rahman, 2009). Oleh karena itu, karakterisasi hubungan antara kadar air dan aktivitas air melalui pendekatan *Moisture Sorption Isotherm* (MSI) diperlukan untuk memahami perilaku sorpsi air beras sosoh varietas Ciherang dan mendukung pengelolaan kadar air penyimpanan di Gudang BULOG secara lebih ilmiah.

2.2 Sifat Higroskopis Beras

Beras termasuk kelompok bahan pangan higroskopis, yaitu bahan yang memiliki kemampuan menyerap maupun melepaskan uap air 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 & Labuza, 1985). 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 (Susiyanti dkk., 2020).

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 (Soekarto & Adawiyah, 2012). 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 menyebabkan *micro-fissuring* atau retakan halus pada permukaan butir beras (Changbandit dkk., 2024 ;Cnossen & Siebenmorgen, 2000). 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 (Bell & Labuza, 2000).

2.3 Aktivitas Air

Aktivitas air/*water activity* (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). Dalam 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 penurunan mutu (Bell & Labuza, 2000).

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 kurang dari nilai ERH beras 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 (Soekarto & Adawiyah, 2012).

Dalam kajian stabilitas penyimpanan sereal, nilai A_w memiliki ambang-ambang kritis yang telah ditetapkan berdasarkan penelitian ekologi fungi. Pada Zona I ($A_w < 0,30$), molekul air terikat kuat pada gugus hidrofilik sehingga hampir semua proses penurunan mutu berlangsung sangat lambat (Labuza, 1984). Pada Zona II ($A_w 0,30-0,70$), 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 $A_w 0,75$ (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).

Peningkatan kadar air akibat kondisi RH gudang yang tinggi akan 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 mencerminkan ketersediaan air bebas untuk reaksi-reaksi deterioratif (penurunan mutu) 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 dengan 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 (Bell & Labuza, 2000). EMC bukan menggambarkan kadar air awal bahan, melainkan kadar air yang secara alami akan dicapai apabila bahan disimpan cukup lama pada kondisi lingkungan tertentu (Widowati dkk., 2010).

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, 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 (Sugiyono dkk., 2010). 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 aktual (Bell & Labuza, 2000). Hubungan antara Aw dan EMC tidak linier, melainkan mengikuti pola khas yang direpresentasikan oleh kurva *Moisture Sorption Isotherm* (MSI) (Adawiyah & Soekarto, 2010).

2.5 Moisture Sorption Isotherm (MSI)

Moisture Sorption Isotherm (MSI) adalah kurva yang menggambarkan hubungan kesetimbangan antara *Equilibrium Moisture Content* (EMC) dan aktivitas air (Aw) suatu bahan pangan pada suhu konstan (Lomauro & Labuza, 1985; Widowati dkk., 2010). Kurva MSI tidak sekadar menyatakan berapa banyak air yang terkandung dalam bahan, tetapi memberikan informasi tentang kekuatan keterikatan molekul air pada setiap tingkat aktivitas air, yang menentukan laju berbagai reaksi deteriorasi seperti pertumbuhan mikroorganisme, oksidasi lipid, dan reaksi pencoklatan non-enzimatis (Bell & Labuza, 2000). Dalam teknologi penyimpanan sereal, data MSI digunakan untuk menentukan kadar air monolayer, menetapkan kondisi penyimpanan aman, merancang proses pengeringan, menentukan spesifikasi kemasan, serta memprediksi perubahan kadar air selama distribusi (Aviara, 2020).

Kurva MSI bersifat khas untuk setiap produk pangan karena sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia, struktur fisik, dan suhu pengukurannya, oleh karena itu data MSI untuk satu varietas tertentu tidak dapat digeneralisasi untuk

varietas lain (Mousa dkk., 2014). Pada produk berbasis pati seperti beras, kurva MSI umumnya berbentuk sigmoid tipe II. Bentuk ini mencerminkan tiga zona sorpsi zona 1 yaitu aktivitas air rendah ($A_w < 0,30$) di mana air terikat kuat sebagai monolayer dengan mobilitas sangat rendah. Zona 2 yaitu aktivitas air menengah ($A_w 0,30-0,70$) di mana air mulai membentuk lapisan multilayer dan beberapa reaksi kimia mulai meningkat. Zona 3 yaitu aktivitas air tinggi ($A_w > 0,70$) di mana air berperilaku menyerupai air bebas, risiko pertumbuhan kapang meningkat signifikan, dan berbagai reaksi deteriorasi lainnya berlangsung lebih cepat (Magan & Aldred, 2007 ; Lee & Robertson., 2022).

Selain digunakan untuk menjelaskan karakteristik higroskopis bahan pangan, kurva MSI juga memiliki berbagai aplikasi praktis dalam bidang teknologi pangan. Data isoterm sorpsi digunakan untuk menentukan kadar air monolayer, mengevaluasi stabilitas penyimpanan, merancang proses pengeringan, menentukan spesifikasi kemasan, serta memprediksi perubahan kadar air selama distribusi dan penyimpanan (Bell & Labuza, 2000). Pada komoditas sereal, kurva MSI juga dimanfaatkan untuk mengestimasi *Equilibrium Moisture Content* (EMC) pada berbagai kondisi suhu dan kelembapan relatif sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan pengelolaan penyimpanan.

Dalam penelitian ini, kurva MSI disusun berdasarkan hubungan antara kadar air dan aktivitas air beras sosoh varietas Ciherang pada suhu 30°C menggunakan metode langsung berbasis A_w meter. Kurva absorpsi dan desorpsi yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi karakteristik sorpsi air, menganalisis fenomena histeresis, memilih model isoterm yang paling sesuai, serta

mengestimasi nilai EMC pada rentang kelembapan relatif aktual gudang BULOG. Dengan demikian, MSI pada penelitian ini tidak hanya berfungsi sebagai representasi hubungan antara kadar air dan aktivitas air, tetapi juga sebagai pendekatan ilmiah untuk mendukung interpretasi keamanan penyimpanan beras sosoh varietas Ciherang di gudang BULOG.

2.5.1 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 selalu berada di atas kurva absorpsi (Aviara, 2020). Fenomena ini telah dilaporkan pada gabah, beras sosoh, serta komponen penyusunnya seperti granula pati amilosa, amilopektin, protein, dan selulosa (Mousa dkk., 2014 ; Treeamnuk dkk., 2024). 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, lemak, ukuran pori, dan perubahan struktur mikro akibat proses pengeringan sebelumnya (Zeymer dkk., 2019). 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 (Bell & Labuza, 2000). 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 & Labuza, 1985).

Pada penelitian ini, karakteristik histeresis dianalisis berdasarkan perbedaan kurva absorpsi dan desorpsi beras sosoh varietas Ciherang 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 isotherm sorpsi air sehingga estimasi EMC pada kondisi kelembapan relatif aktual Gudang BULOG dapat dilakukan dengan dasar ilmiah yang lebih komprehensif.

2.5.2 Model Isotherm MSI

Data MSI yang diperoleh dari pengukuran eksperimental berbentuk diskrit, sehingga diperlukan model isotherm yang mampu merepresentasikan hubungan EMC dengan A_w secara kontinu. Model ini tidak hanya digunakan untuk menjelaskan karakteristik higroskopis bahan, tetapi juga untuk memprediksi nilai EMC pada berbagai kondisi A_w yang berada di antara atau di luar titik pengamatan selama masih dalam batas validitas model (Aviara, 2020), perancangan proses pengeringan, penentuan kondisi penyimpanan, simulasi perubahan kadar air selama distribusi, serta pengembangan sistem pengemasan (Rahman, 2009). Dengan

adanya model isotherm, interpretasi terhadap karakteristik sorpsi air menjadi lebih mudah dibandingkan hanya menggunakan data hasil pengukuran secara langsung.

Dalam penelitian ini, karakteristik sorpsi air beras sosoh varietas Ciherang dimodelkan menggunakan dua model isotherm yang banyak diterapkan pada bahan pangan, yaitu model isotherm GAB dan model isotherm Oswin:

1. Model isotherm GAB (Guggenheim–Anderson–de Boer) merupakan pengembangan model BET dengan penambahan faktor koreksi multilayer (K), sehingga valid pada rentang A_w yang lebih lebar (0,05–0,90). Model isotherm GAB dinyatakan dalam bentuk persamaan matematika sebagai berikut:

$$M = (M_0 \cdot C \cdot K \cdot A_w) / [(1 - K \cdot A_w)(1 - K \cdot A_w + C \cdot K \cdot A_w)]$$

M_0 sebagai kadar air monolayer, C sebagai konstanta Guggenheim yang berkaitan dengan panas sorpsi monolayer, dan K sebagai konstanta koreksi sorpsi multilayer. Dalam berbagai penelitian pada sereal dan produk pangan berbasis pati, model isotherm GAB terbukti memberikan kesesuaian terbaik (Toğrul & Arslan, 2006 ; Maftoon Azad dkk., 2023).

2. Model isotherm Oswin merupakan model empiris dua parameter berbasis transformasi matematis kurva sigmoid yang umum digunakan untuk produk sereal. Model isotherm Oswin dinyatakan dalam bentuk persamaan matematika sebagai berikut:

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

Penelitian pada gabah varietas MR219 Malaysia menunjukkan model isoterm Oswin memberikan kesesuaian terbaik dibandingkan model lain yang diuji termasuk GAB, BET, Henderson, dan Chung–Pfoest (Mousa dkk., 2014), serta produk tepung berbasis pati termasuk beras di Asia Tenggara (Setyawan dkk., 2022).

Kedua model tersebut dipilih karena mewakili pendekatan semi-empiris dan empiris yang umum digunakan dalam penelitian isoterm sorpsi beras maupun sereal lain.

Kesesuaian model isoterm dievaluasi menggunakan koefisien determinasi (R^2) dan *Mean Relative Deviation* (MRD). Nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan kemampuan model yang baik dalam menggambarkan hubungan EMC–Aw. Nilai MRD digunakan untuk mengukur rata-rata penyimpangan relatif antara nilai prediksi dan data eksperimen. Model isoterm yang terbaik dianggap memiliki kesesuaian baik apabila $MRD < 10\%$ (Labuza, 1984). Model isoterm yang paling sesuai dapat digunakan untuk mengestimasi nilai *Equilibrium Moisture Content* (EMC) pada rentang kelembapan relatif aktual Gudang BULOG.

2.6 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 (BSN, 2020). 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).

Hasil observasi dan pengukuran langsung yang dilakukan pada 29 April di Gudang Besar Baru (GBB) BULOG Cimahi, menghasilkan data suhu harian 28–34°C dengan RH yang berfluktuasi antara 65–80% 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 tidak terencana (insidental) dan berbasis pengukuran kadar air konvensional, sehingga belum mampu mendeteksi perubahan kondisi lingkungan yang dapat memicu penurunan mutu sebelum gejala fisik menjadi nyata (Lestari & Kurniawan, 2021). Informasi yang lebih komprehensif mengenai nilai EMC beras sosoh varietas Ciherang 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.

III. METODOLOGI PENELITIAN

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

3.1 Bahan dan Alat Penelitian

3.1.1 Bahan – Bahan Penelitian

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah beras sosoh varietas Ciherang yang diperoleh dari penggilingan padi di wilayah Cianjur, 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: Aw meter (akurasi $\pm 0,03$ Aw) sebagai instrumen pengukuran Aw, *Grain moisture meter portable* (akurasi $\pm 0,05\%$) untuk pengecekan kadar air, neraca analitik, Dehidrator (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. 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 rancangan penelitian deskriptif eksperimental menggunakan rancangan pengukuran (*measurement design*) dengan dua variabel bebas. Variabel pertama adalah tingkat kadar air sampel yang terdiri dari 10 taraf:

6%, 8%, 10%, 11%, 12%, 13%, 14%, 15%, 16%, dan 18% dan variabel kedua adalah jenis kurva (absorpsi dan desorpsi).

Dua set sampel independent masing-masing untuk lintasan absorpsi dan desorpsi dipreparasi menggunakan metode langsung, dengan titik awal kondisi kadar air yang berbeda untuk masing-masing lintasan (Subbab 3.3.2.1 dan 3.3.2.2) sehingga kedua rangkaian preparasi tidak saling bergantung satu sama lain. Preparasi kedua lintasan dilaksanakan dengan jadwal yang saling bertautan (*overlapping*), tahap awal preparasi sampel desorpsi (pembasahan hingga kadar air 20% dan penyimpanan pada *chiller* selama 48 jam) dimulai pada masa inkubasi 48 jam sampel absorpsi, sehingga total waktu pelaksanaan penelitian dapat lebih efisien. Nilai Aw masing-masing set kemudian diukur menggunakan Aw meter. Setiap titik diukur dalam duplo (2 ulangan).

3.2.2 Rancangan Percobaan

Rancangan yang digunakan adalah rancangan pengukuran (*measurement design*), untuk 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–Aw (Labuza, 1984).

3.2.3 Rancangan Analisis

Data EMC–Aw yang diperoleh dianalisis menggunakan dua model isotherm, yaitu GAB dan Oswin, melalui regresi nonlinear metode Levenberg-Marquardt menggunakan perangkat lunak OriginPro. Pemilihan model isotherm terbaik

dilakukan berdasarkan nilai R^2 tertinggi dan MRD terendah. Karakteristik histeresis dianalisis menggunakan pendekatan model isotherm terbaik yang diperoleh, nilai EMC kurva absorpsi dan desorpsi dihitung menggunakan persamaan model isotherm terbaik pada titik aktivitas air (A_w) yang telah ditetapkan dalam rentang 0,54–0,80 dengan interval 0,02, lalu selisih EMC antara kurva desorpsi dan absorpsi (ΔEMC) pada setiap titik aktivitas air digunakan sebagai indikator kuantitatif karakteristik histeresis sorpsi air. Selanjutnya, model isotherm terbaik digunakan untuk mengestimasi nilai EMC pada rentang RH gudang BULOG (70–80%) sebagai dasar penentuan ambang kadar air penyimpanan.

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 isotherm GAB yaitu nilai M_0 , C , K , dan nilai A dan B untuk model isotherm Oswin
4. Nilai R^2 dan MRD untuk pemilihan model isotherm terbaik.
5. Nilai selisih *Equilibrium Moisture Content* (ΔEMC) antara kurva desorpsi dan absorpsi yang dihitung menggunakan model isotherm terbaik pada titik aktivitas air (A_w) yang telah ditetapkan sebagai indikator kuantitatif karakteristik histeresis sorpsi air pada zona penyimpanan.
6. Nilai EMC pada A_w 0,70; 0,75; dan 0,80 sebagai EMC kritis pada rentang RH gudang BULOG.

3.3 Prosedur Penelitian

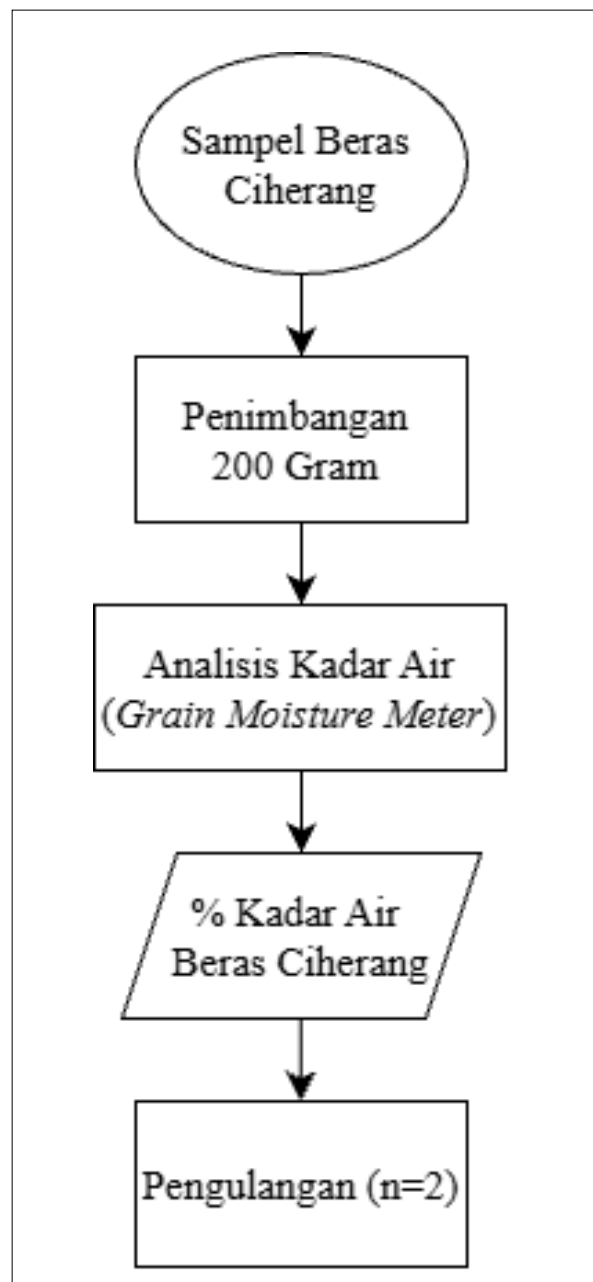
3.3.1 Analisis Kimia Beras Ciherang

Prosedur preparasi sampel meliputi:

3.3.1.1 Analisis Kadar Air

1. Siapkan sampel beras sosoh varietas Ciherang.
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

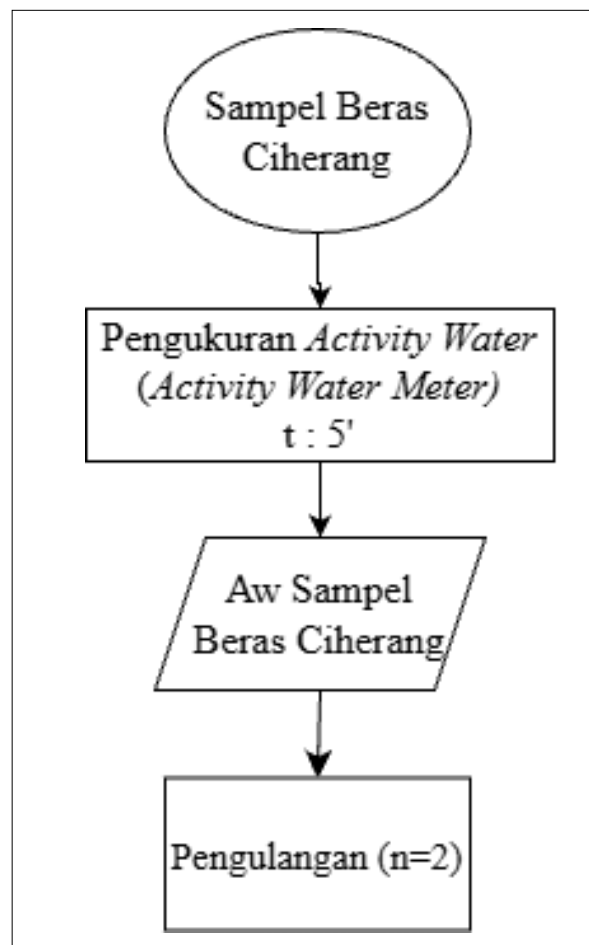


Gambar III. 1 Prosedur Analisis Kadar Air.

3.3.1.2 Analisis Aktivitas Air

1. Siapkan sampel beras sosoh varietas Ciherang.
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 Aktivitas Air.

3.3.2 Preparasi Kadar Air Beras Ciherang

Prosedur Pengkondisian Kadar air Beras Ciherang meliputi:

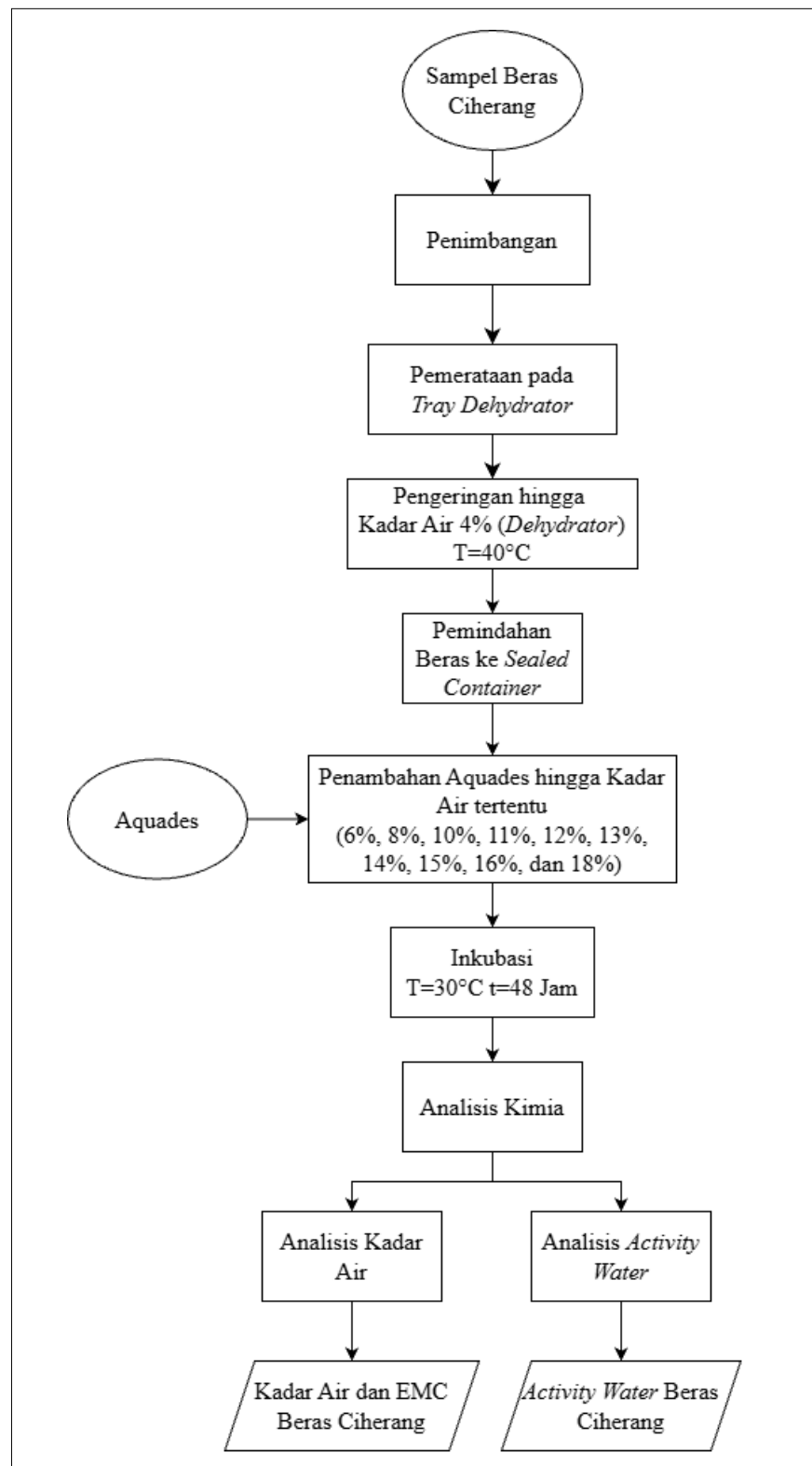
3.3.2.1 Preparasi Sampel Absorpsi

1. Siapkan Sampel, kemudian di timbang berat awal.
2. Sampel dikeringkan hingga mencapai kadar air rendah yaitu 4-5% sebagai kondisi awal homogen.
3. Setelah mencapai kadar air 4-5%, 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 kelembapan yang homogen.
5. Sampel diinkubasi pada suhu 30°C selama 48 jam untuk mencapai kesetimbangan kelembapan 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:

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

Secara skematik, prosedur dijelaskan pada gambar berikut III.3.

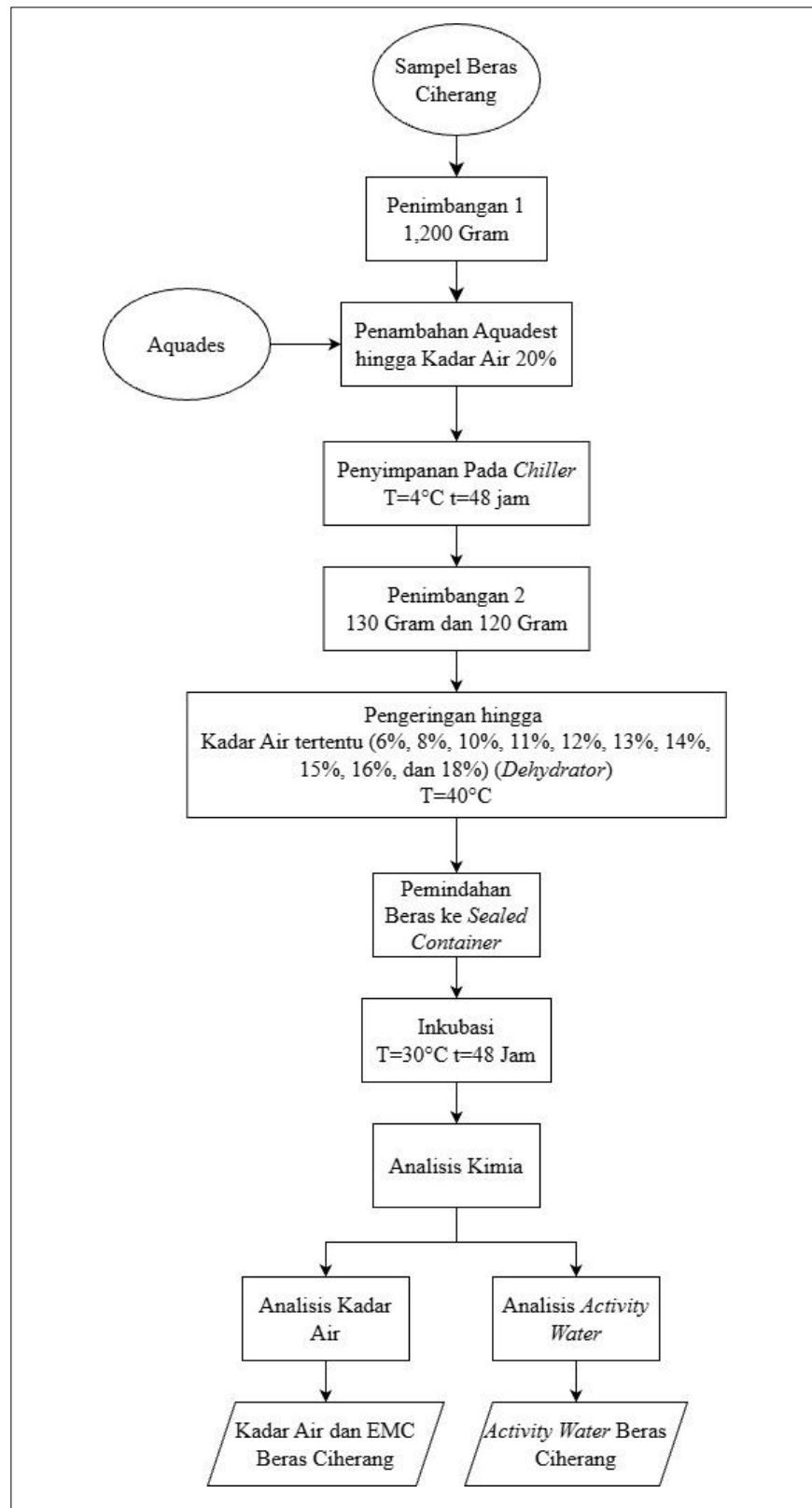


Gambar III. 3 Prosedur Preparasi Sampel Absorpsi.

3.3.2.2 Preparasi Sampel Desorpsi

1. Siapkan Sampel, kemudian di timbang berat awal.
2. Sampel beras Ciherang terlebih dahulu ditambahkan air hingga mencapai kadar air tinggi yaitu 20% sebagai kondisi awal homogen.
3. Sampel dimasukkan ke wadah kedap udara kemudian, didiamkan 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 kelembapan 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 Preparasi 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 isotherm sorpsi air menyatakan kadar air dalam satuan persen basis kering (%bk), sehingga hasil penelitian dapat dibandingkan dengan penelitian lain serta digunakan dalam proses pemodelan isotherm (Labuza, 1984).

Perhitungan EMC dilakukan menggunakan rumus berikut:

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

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 (Van den Berg & Bruin, 1981).

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 Ciherang 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) (Sun, 1999). 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 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 isoterm 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 0,05–0,90) dan direkomendasikan sebagai model standar dalam penelitian bahan pangan (Van den Berg & Bruin, 1981; Aviara, 2020). Sementara itu, model isoterm Oswin dipilih sebagai model empiris pembanding karena memiliki bentuk persamaan yang sederhana dan telah banyak diaplikasikan pada penelitian sereal serta bahan pangan berpati (Mousa dkk., 2014). Perhitungan Estimasi nilai parameter masing-masing model isoterm dilakukan menggunakan perangkat lunak OriginPro.

3.4.3.1 Model Isoterm Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB)

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

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

Keterangan:

- M = kadar air kesetimbangan (%bk)
- X_m / M_0 = kadar air monolayer (%bk)
- C = konstanta Guggenheim
- K = konstanta multilayer
- a_w = aktivitas air

3.4.3.2 Model Isoterm Oswin

Persamaan model isoterm Oswin dinyatakan sebagai berikut (Lomauro & Labuza, 1985):

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

Keterangan:

- M = kadar air kesetimbangan (%bk)
- a dan b = konstanta model
- a_w = aktivitas air

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

3.4.4 Analisis Histeresis Sorpsi Air

Analisis histeresis dilakukan untuk mengetahui perbedaan karakteristik sorpsi air antara proses absorpsi dan desorpsi pada beras sosoh varietas Ciherang. Fenomena histeresis merupakan kondisi ketika bahan yang mengalami proses desorpsi memiliki kadar air kesetimbangan (EMC) yang lebih tinggi dibandingkan bahan yang mengalami proses absorpsi pada nilai aktivitas air yang sama, akibat perbedaan mekanisme fisik pengikatan dan pelepasan air serta riwayat kadar air bahan (Van den Berg & Bruin, 1981; Zeymer dkk., 2019).

Dalam penelitian ini, nilai aktivitas air yang diperoleh dari proses absorpsi dan desorpsi tidak selalu berada pada titik yang sama. Oleh karena itu, analisis histeresis tidak dilakukan dengan membandingkan data mentah secara langsung,

melainkan menggunakan pendekatan model kontinu (*model-based approach*) berbasis persamaan Oswin terpilih. Pendekatan ini lebih digunakan secara metodologis karena persamaan model yang sudah diperoleh melalui regresi nonlinear dapat dievaluasi pada nilai A_w sembarang dalam rentang fitnya, sehingga ΔEMC dihitung dari fungsi yang halus dan tidak dipengaruhi oleh galat acak pengukuran individual pada titik-titik data mentah (Chapra & Canale, 2015).

Prosedur analisis histeresis mengikuti empat tahap berikut:

1. Gunakan persamaan Oswin terpilih sebagai fungsi kontinu untuk masing-masing lintasan: $f(A_w)$ untuk absorpsi dan $g(A_w)$ untuk desorpsi, sebagaimana diperoleh pada Subbab 3.4.4.
2. Evaluasi $f(A_w)$ dan $g(A_w)$ pada titik A_w yang ditetapkan secara seragam (interval $A_w = 0,02$) dalam rentang overlap data kedua lintasan, yaitu A_w 0,54–0,80.
3. Hitung selisih EMC pada setiap titik A_w menggunakan persamaan:

$$\Delta EMC(A_w) = g(A_w) - f(A_w)$$

4. Integralkan ΔEMC terhadap A_w secara numerik menggunakan aturan trapesium berdasarkan hasil evaluasi ΔEMC pada interval aktivitas air (A_w) yang telah ditetapkan, menggunakan persamaan:

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

untuk memperoleh luas area histeresis sebagai ukuran kuantitatif kekuatan histeresis dalam rentang zona penyimpanan yang dikaji (Chapra & Canale, 2015).

Nilai ΔEMC yang positif menunjukkan bahwa EMC lintasan desorpsi lebih tinggi dibandingkan lintasan absorpsi pada nilai A_w yang sama, sedangkan nilai ΔEMC yang semakin kecil menunjukkan bahwa perbedaan EMC antara kedua lintasan semakin berkurang sehingga tingkat histeresis menjadi semakin rendah.

3.4.5 Evaluasi Model *Moisture Sorption Isotherm* (MSI)

3.4.5.1 Koefisien Determinasi (R^2)

Koefisien determinasi (R^2) digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian antara data hasil pengamatan dan data hasil prediksi model isotherm. Nilai R^2 berkisar antara 0 hingga 1, di mana nilai yang semakin mendekati 1 menunjukkan bahwa model isotherm memiliki kemampuan yang semakin baik dalam menjelaskan hubungan antara aktivitas air dan kadar air kesetimbangan (Lomauro & Labuza, 1985). Nilai R^2 dihitung menggunakan persamaan berikut:

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

Keterangan:

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

3.4.5.2 Mean Relative Deviation (MRD)

Selain koefisien determinasi, ketepatan model isotherm 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 isotherm. Model isotherm dengan nilai MRD yang lebih kecil (<10%) memiliki tingkat akurasi prediksi yang lebih baik (Labuza, 1984). Nilai MRD dihitung menggunakan persamaan berikut:

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

Keterangan:

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

3.5 Jadwal Pelaksanaan Penelitian

No.	Uraian Kegiatan	Bulan					
		Feb	Mar	April	Mei	Juni	Juli
1.	TAHAP PERSIAPAN						
	• Diskusi mengenai topik penelitian						
	• Studi Pustaka						
2.	TAHAP BIMBINGAN						
	• Penulisan Proposal Usulan Penelitian						
	• Proses Bimbingan dengan Pembimbing						
3.	TAHAP PERSIAPAN SEMINAR USULAN PENELITIAN						
	• Pengurusan Syarat SUP						
	• Distribusi Draf Proposal dan Undangan SUP						
	• Pelaksanaan Seminar Usulan Penelitian						
4.	PELAKSANAAN PENELITIAN						
5.	PENGOLAHAN DATA dan PENYUSUNAN TUGAS AKHIR						
	• Bimbingan Tugas Akhir						
	• Pendaftaran Sidang Tugas Akhir						
	• Pelaksanaan Sidang Tugas Akhir						
	• Revisi Pasca Sidang						

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Kimia Beras Ciherang

Sebelum dilakukan preparasi sampel pada berbagai tingkat kadar air, beras sosoh varietas Ciherang yang digunakan sebagai bahan baku penelitian terlebih dahulu dikarakterisasi untuk mengetahui kadar air dan aktivitas air (A_w) awalnya. Hasil karakterisasi disajikan pada Tabel IV.1.

Tabel IV. 1 Karakteristik Kimia Beras Ciherang

Karakteristik Kimia	Nilai
Kadar Air (%bb)	15,1 %
Aktivitas Air (A_w)	0,70

Kadar air awal beras sosoh Ciherang sebesar 15,1% (bb), sebagaimana tercantum pada Tabel IV.1, berada tepat di atas batas maksimum yang dipersyaratkan SNI 6128:2020, yaitu 14% (bb) (BSN, 2020). Nilai ini konsisten dengan kondisi umum beras hasil penggilingan yang belum mengalami pengeringan lanjutan maupun penyimpanan dalam kondisi terkendali.

Nilai aktivitas air awal sebesar 0,70 berada pada zona aktivitas air menengah tinggi yang menjadi fokus penelitian ini (A_w 0,50–0,80), dan secara biologis telah mendekati ambang A_w 0,65–0,70 yang dilaporkan sebagai batas bawah pertumbuhan kapang gudang xerofitik seperti *Aspergillus flavus* dan *Aspergillus parasiticus* (Magan & Aldred, 2007). Temuan ini memperkuat urgensi penelitian, karena beras dengan karakteristik awal seperti ini berada pada kondisi

yang rentan terhadap peningkatan kadar air apabila terekspos RH gudang yang tinggi selama penyimpanan.

Secara keseluruhan, karakteristik kimia beras sosoh varietas Ciherang yang diperoleh pada penelitian ini memberikan gambaran mengenai sifat dasar bahan yang menjadi objek penelitian. Komponen penyusun seperti pati, protein, dan lemak berperan dalam menentukan jumlah serta kekuatan gugus hidrofilik yang berinteraksi dengan molekul air, sehingga secara langsung memengaruhi perilaku sorpsi selama penyimpanan.

4.2 Preparasi Kadar Air Beras Ciherang

Tahap preparasi sampel memiliki peran penting dalam penelitian ini karena menentukan keberhasilan pembentukan kondisi kesetimbangan higroskopis pada setiap tingkat kadar air yang telah ditetapkan. Pengendalian kadar air awal memungkinkan setiap sampel mengalami proses absorpsi maupun desorpsi secara terarah, sehingga hubungan antara aktivitas air dan kadar air kesetimbangan yang dihasilkan benar-benar mencerminkan karakteristik sorpsi beras Ciherang. Kualitas data pada tahap berikutnya, karenanya, sangat ditentukan oleh keberhasilan proses preparasi sampel ini.

Untuk proses absorpsi kadar air awal 15,1% (bb) tersebut selanjutnya diturunkan melalui pengeringan menggunakan dehidrator pada suhu 40°C hingga mencapai kadar air rendah (4-5%) sebagai kondisi awal yang homogen, sebelum sampel dibagi menjadi 10 kelompok dengan kadar air target berbeda untuk preparasi kurva absorpsi (sesuai yang dijelaskan pada Subbab 3.3.2.1).

Untuk preparasi kurva desorpsi, sampel terlebih dahulu dibasahi hingga kadar air 20% sebagai kondisi awal homogen (Subbab 3.3.2.2). Prosedur ini

memastikan bahwa kedua lintasan sorpsi yaitu absorpsi dan desorpsi dimulai dari kondisi awal yang seragam, sehingga perbedaan EMC yang teramati pada nilai A_w yang sama dapat diatribusikan pada riwayat sorpsi (*moisture history*) dan bukan pada variasi kondisi awal sampel (Van den Berg & Bruin, 1981).

Preparasi sampel selanjutnya dilakukan pada 10 taraf kadar air target (6%, 8%, 10%, 11%, 12%, 13%, 14%, 15%, 16%, dan 18%) untuk masing-masing lintasan absorpsi dan desorpsi, dengan dua kali ulangan (*duplo*) pada setiap taraf. Setelah inkubasi pada suhu 30°C selama 48 jam, dilakukan pengecekan kadar air aktual dan aktivitas air menggunakan *grain moisture meter* dan A_w meter.

Nilai rata-rata kadar air aktual dan A_w hasil *duplo* pada setiap taraf target disajikan pada Tabel IV.2 absorpsi dan Tabel IV.3 desorpsi.

4.2.1 Preparasi Sampel Absorpsi

Tabel IV. 2 Kadar Air Aktual dan Aktivitas Air Rerata Sampel Absorpsi (n=2)

Target Kadar Air (%)	Berat Awal (g)	Air yang Ditambahkan (ml)	Kadar Air Aktual (%)	A_w
6	100	1,17	6,7	0,54
8	100	3,37	8,2	0,58
10	100	5,67	9,2	0,63
11	100	6,85	10,2	0,67
12	100	8,07	10,7	0,70
13	100	9,31	10,8	0,72
14	100	10,58	11,2	0,73
15	100	11,88	12	0,76
16	100	13,21	13,1	0,78
18	100	15,98	16,4	0,80

Penambahan air secara presisi menggunakan pipet, mengikuti persamaan pada Subbab 3.3.2.1, secara umum berhasil mengarahkan kadar air aktual sampel mendekati target (Tabel IV.2), meskipun pada taraf target kadar air tinggi (16% dan 18%) terdapat deviasi yang lebih besar antara kadar air target dan aktual (13,1% dan 16,4%, berturut-turut).

Deviasi ini diduga berkaitan dengan kapasitas penyerapan air beras yang menurun relatif terhadap volume air yang ditambahkan pada kondisi mendekati saturasi, serta variabilitas distribusi kelembapan di dalam wadah kedap udara selama inkubasi 48 jam. Pola peningkatan A_w yang searah dengan peningkatan kadar air aktual terlihat konsisten di seluruh taraf, mengonfirmasi hubungan positif antara kadar air dan aktivitas air sebagaimana lazim dilaporkan pada bahan pangan higroskopis (Labuza., 1984; Rahman., 2009).

4.2.2 Preparasi Sampel Desorpsi

Tabel IV. 3 Kadar Air Aktual dan Aktivitas Air Rerata Sampel Desorpsi (n=2)

Target Kadar Air (%)	Berat Awal (g)	Kadar Air Aktual (%)	A_w
6	130	5,4	0,53
8	130	7,4	0,56
10	120	9,6	0,61
11	120	10,9	0,63
12	120	11,7	0,65
13	120	12,6	0,68
14	120	13,8	0,74
15	120	14,8	0,77
16	120	15,9	0,78
18	120	17,7	0,80

Pada lintasan desorpsi (Tabel IV.3), sampel yang dibasahi hingga 20% (bb) kemudian dikeringkan secara bertahap menuju 10 taraf kadar air target. Pola yang sama dengan lintasan absorpsi teramati, kadar air aktual dan A_w meningkat secara beriringan, dengan kesesuaian yang relatif baik antara target dan aktual pada taraf rendah-menengah, namun mulai menyimpang pada taraf tinggi (16% dan 18%, dengan kadar air aktual 15,9% dan 17,7%). Pada rentang kadar air aktual 13–14% (bb), terjadi lompatan nilai A_w yang relatif tajam dari 0,68 menjadi 0,74, sementara peningkatan kadar air aktualnya relatif kecil (12,6% menjadi 13,8%). Pola ini menjadi indikasi awal bahwa zona A_w 0,70–0,75 kemungkinan merupakan titik transisi penting dalam perilaku sorpsi beras sosoh Ciherang, karakteristik zona transisi ini akan dibahas lebih rinci pada Subbab 4.3.2.

Suhu pengukuran A_w pada seluruh proses preparasi terjaga pada kisaran 27,1–29,5°C, mendekati suhu target penelitian sebesar 30°C. Rentang suhu terukur ini berada pada bagian bawah hingga menengah dari kisaran suhu harian gudang BULOG yang berkisar 28–34°C, sehingga data EMC dan A_w yang diperoleh dapat dianggap merepresentasikan kondisi termal gudang pada kondisi suhu relatif rendah hingga menengah di gudang BULOG Jawa Barat. Dengan demikian, penerapan hasil penelitian ini pada kondisi gudang bersuhu lebih tinggi, khususnya mendekati batas atas 34°C, perlu mempertimbangkan bahwa isotherm sorpsi bersifat sensitif terhadap suhu, sehingga nilai EMC aktual pada suhu tersebut berpotensi sedikit berbeda dari estimasi yang dihasilkan pada suhu 30°C dalam penelitian ini.

4.3 Penentuan *Equilibrium Moisture Content* (EMC) dan Karakteristik Kurva Sorpsi Air

4.3.1 Data EMC dan Aktivitas Air Hasil Pengukuran

Tabel IV. 4 Data EMC (%bk) dan Aw Beras Sosoh Ciherang pada Suhu 30°C

Aw Absorpsi	EMC Absorpsi (%bk)	Aw Desorpsi	EMC Desorpsi (%bk)
0,54	7,1	0,53	5,7
0,58	8,9	0,56	8
0,63	10,1	0,61	10,6
0,67	11,3	0,63	12,2
0,70	12	0,65	13,3
0,72	12,1	0,68	14,4
0,73	12,5	0,74	16
0,76	13,6	0,77	17,4
0,78	15,1	0,78	18,9
0,80	19,6	0,80	21,5

EMC dan Aw meningkat secara bersamaan pada kedua lintasan sorpsi (Tabel IV.4), sejalan dengan hubungan positif antara kadar air kesetimbangan dan aktivitas air yang telah banyak dilaporkan pada beras dan sereal lain (Mousa dkk., 2014; Treeamnuik dkk., 2024). Pada kurva absorpsi, EMC meningkat dari 7,1 %bk pada Aw 0,54 hingga 19,6 %bk pada Aw 0,80. Pada kurva desorpsi, EMC berkisar dari 5,7 %bk (Aw 0,53) hingga 21,5 %bk (Aw 0,80). Pada seluruh titik pengukuran yang berdekatan, nilai EMC desorpsi lebih tinggi daripada EMC absorpsi pada Aw yang sebanding, yang menjadi indikasi awal keberadaan fenomena histeresis yang akan dianalisis lebih rinci pada Subbab 4.5.

Pada kurva absorpsi, laju kenaikan EMC melambat secara nyata di sekitar A_w 0,70–0,72, di mana EMC hanya meningkat dari 12,0 %bk menjadi 12,1 %bk meskipun A_w meningkat sebesar 0,02. Kenaikan sebesar 0,1 %bk ini jauh lebih kecil dibandingkan laju kenaikan EMC pada interval A_w lain yang berdekatan, sehingga titik ini tetap menunjukkan adanya perlambatan, meskipun tidak sepenuhnya berupa plateau datar sempurna. Pola ini hanya didukung oleh dua titik pengamatan yang berdekatan, oleh karena itu interpretasinya perlu dilakukan secara hati-hati.

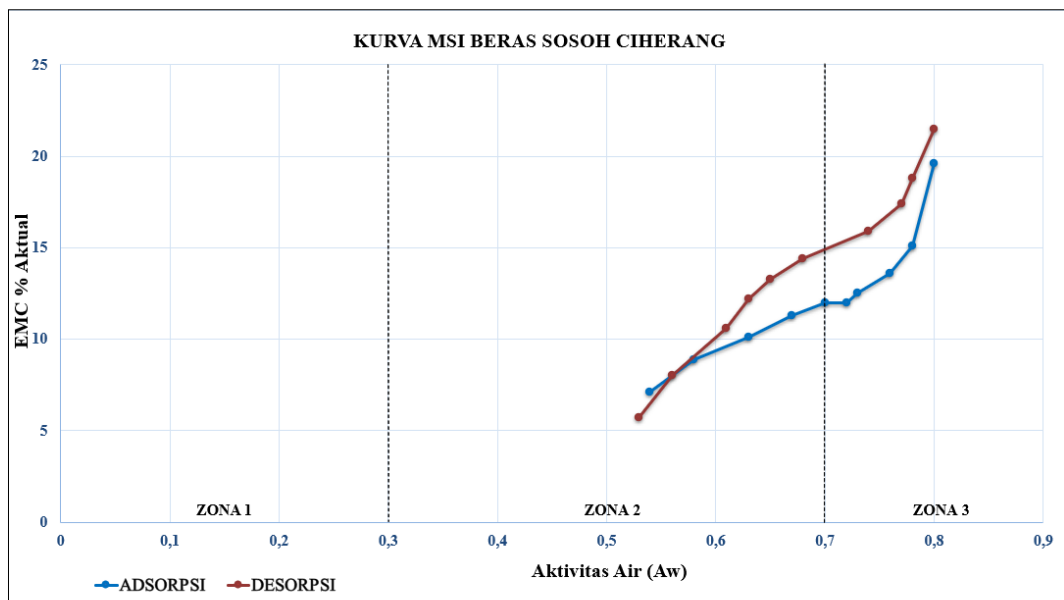
Pola yang berbeda justru teramati pada kurva desorpsi, pada rentang A_w 0,74–0,80, laju kenaikan EMC terhadap A_w meningkat dan tidak menunjukkan zona pelandaian yang sebanding dengan yang teramati pada lintasan absorpsi. Perbedaan pola ini mengarah pada dugaan bahwa transisi menuju dominasi mekanisme kondensasi kapiler berlangsung lebih bertahap pada lintasan absorpsi dibandingkan pada lintasan desorpsi. Dugaan ini diuji lebih lanjut melalui pendekatan histeresis berbasis model kontinu pada Subbab 4.5.

4.3.2 Karakteristik Kurva Sorpsi Air Beras Sosoh Ciherang

Kedua kurva sorpsi air beras sosoh Ciherang (absorpsi dan desorpsi) menunjukkan pola kenaikan EMC yang relatif landai pada zona A_w rendah-menengah (0,53–0,73) dan semakin tajam pada zona A_w tinggi ($>0,76$), dengan akselerasi paling jelas terjadi di atas A_w 0,78. Pola tersebut khas untuk produk pangan berbasis pati dan secara teoritis termasuk dalam klasifikasi isoterm Tipe II (sigmoid) (Brunauer dkk., 1940).

Berdasarkan data hasil pengamatan yang diperoleh pada Subbab 4.3.1, hubungan antara aktivitas air (A_w) dan *Equilibrium Moisture Content* (EMC) pada

proses absorpsi dan desorpsi selanjutnya divisualisasikan dalam bentuk kurva isoterm sorpsi air sebagaimana disajikan pada Gambar IV.1.



Gambar IV. 1 Kurva Moisture Sorpsi Isoterm (MSI) Hasil Pengamatan Beras Sosoh Ciherang.

Isoterm Tipe II mencerminkan tiga zona sorpsi yang dapat dibedakan secara konseptual, yaitu zona 1 A_w rendah dengan pembentukan lapisan monolayer terikat kuat pada gugus hidrofilik, zona 2 A_w menengah dengan pembentukan lapisan multilayer, dan zona 3 A_w tinggi dengan dominasi kondensasi kapiler serta air yang berperilaku menyerupai air bebas (Bell & Labuza, 2000). Mengingat rentang pengukuran penelitian ini secara sengaja dibatasi pada A_w 0,50–0,80 (Subbab 1.5), data yang diperoleh mencakup dominan pada zona II dan awal zona III isoterm sigmoid tersebut, yaitu rentang yang paling relevan dengan kondisi penyimpanan aktual di gudang beras tropis.

Kurva desorpsi selalu berada di atas kurva absorpsi pada seluruh rentang aktivitas air yang diukur (Tabel IV.4), artinya pada nilai A_w yang

berdekatan/sebanding, beras yang sedang dalam proses pelepasan air (desorpsi) cenderung memiliki kadar air kesetimbangan yang lebih tinggi. Pola ini akan dikonfirmasi secara kuantitatif melalui pendekatan model kontinu pada Subbab 4.5, mengingat titik-titik A_w hasil pengukuran pada kedua lintasan tidak sepenuhnya sejajar.

Pola serupa telah dilaporkan pada beras dan sereal lain, termasuk gabah Malaysia varietas MR219 (Mousa dkk., 2014) dan gabah Thailand varietas Khao Dawk Mali 105 (Treeamnuk dkk., 2024), sehingga temuan pada beras sosoh Ciherang ini konsisten dengan pola umum yang telah mapan dalam literatur sorpsi air bahan pangan berbasis pati.

Implikasi praktis dari karakteristik kurva ini relevan langsung bagi pengelolaan gudang BULOG. Pada zona $A_w > 0,76$, baik kurva absorpsi maupun desorpsi menunjukkan kepekaan EMC yang tinggi terhadap perubahan A_w , sehingga fluktuasi RH gudang yang relatif kecil pada zona ini berpotensi menimbulkan perubahan kadar air beras yang signifikan dalam waktu relatif singkat. Mengingat RH gudang BULOG Jawa Barat dapat mencapai $>80\%$ pada musim hujan, kondisi ini memiliki konsekuensi langsung terhadap risiko peningkatan kadar air beras melampaui batas aman SNI 6128:2020 sebesar 14% (bb) atau setara $16,28\%$ (bk) (BSN, 2020)

Hubungan antara aktivitas air dan *Equilibrium Moisture Content* (EMC) yang diperoleh pada penelitian ini merupakan inti dari karakterisasi sorpsi air beras Ciherang. Peningkatan EMC seiring meningkatnya aktivitas air menunjukkan bahwa perubahan kelembapan lingkungan akan diikuti oleh perubahan kadar air

kesetimbangan bahan hingga tercapai kondisi setimbang. Informasi ini penting karena memberikan gambaran mengenai respons higroskopis beras terhadap fluktuasi kelembapan relatif selama penyimpanan. Namun demikian, hubungan tersebut masih berupa data hasil pengukuran pada titik-titik tertentu, sehingga diperlukan suatu model matematis agar hubungan EMC dan aktivitas air dapat direpresentasikan secara kontinu serta digunakan untuk melakukan prediksi pada kondisi yang tidak diamati secara langsung.

4.4 Pemodelan Isoterm Kurva Sorpsi Air Beras Sosoh Ciherang

Data EMC dan A_w yang tercantum pada Tabel IV.4 selanjutnya digunakan sebagai data masukan dalam proses regresi nonlinear menggunakan algoritma Levenberg-Marquardt pada perangkat lunak OriginPro. Metode optimasi iteratif ini dipilih untuk meminimalkan jumlah kuadrat galat (*residual sum of squares*), sehingga diperoleh parameter model isoterm GAB dan Oswin yang paling representatif sesuai dengan rancangan analisis pada Subbab 3.2.3.

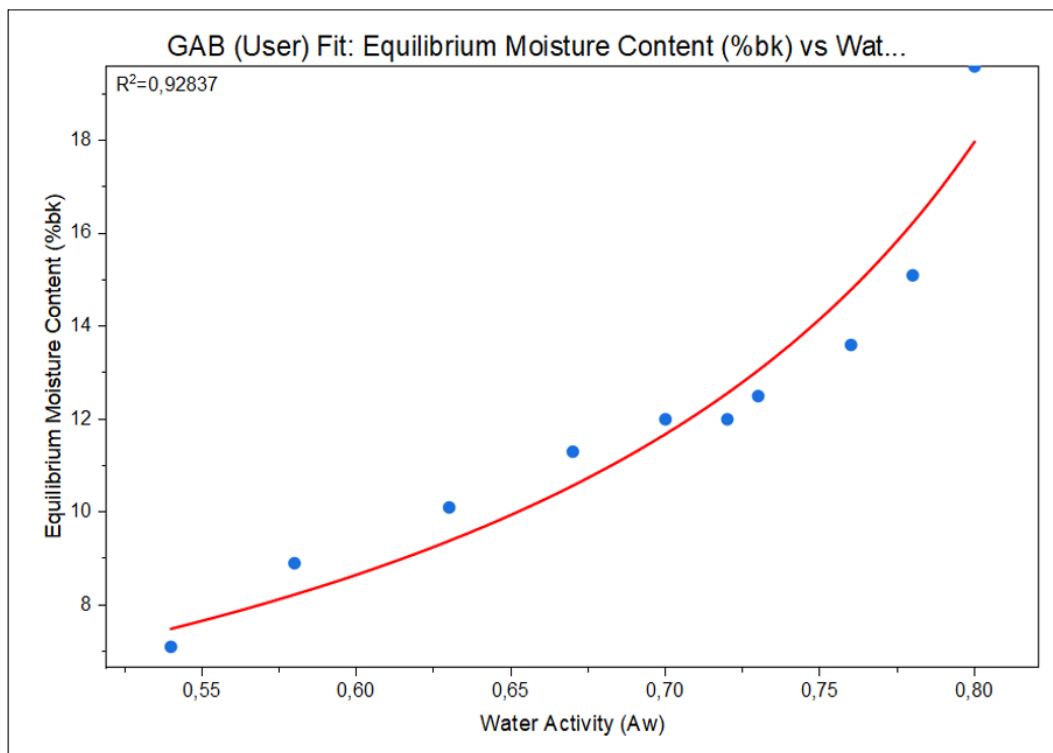
Sementara itu, model isoterm BET tidak diikutsertakan dalam evaluasi ini karena rentang validitas teoretisnya hanya mencakup area absorpsi multilapis pada A_w 0,05–0,45 (Van den Berg & Bruin, 1981; Lomauro & Labuza, 1985). Rentang tersebut tidak tumpang tindih dengan observasi penelitian ini yang berada pada kondisi kelembapan tinggi (A_w 0,53–0,80), sehingga penerapan model BET berpotensi menghasilkan penyimpangan matematis. Rangkuman parameter hasil *fitting* beserta kriteria evaluasi statistik—yang meliputi nilai koefisien determinasi (R^2) sebagai indikator kebaikan suai (*goodness of fit*) dan *Mean Relative Deviation* (MRD) untuk menilai akurasi prediksi terhadap data eksperimental—disajikan secara lengkap pada Tabel IV.5.

Tabel IV. 5 Parameter dan Kesesuaian Model Isoterm Beras Ciherang

Model – Kurva	Parameter Hasil Fitting	R ²	MRD (%)	Kriteria MRD<10%
GAB – Absorpsi	M ₀ =3,38; C=3,501; K=1,015	0,9284	11,27	Tidak terpenuhi
GAB – Desorpsi	M ₀ =178,13; C=0,062; K=0,628	0,9819	9,24	Terpenuhi
Oswin – Absorpsi	A=6,474; B=0,719	0,9156	6,04	Terpenuhi
Oswin – Desorpsi	A=7,347; B=0,761	0,9372	9,74	Terpenuhi

4.4.1 Pemodelan dan Evaluasi Model Isoterm GAB

Hubungan antara aktivitas air (A_w) dan *Equilibrium Moisture Content* (EMC) pada proses absorpsi selanjutnya dimodelkan menggunakan persamaan GAB (*Guggenheim-Anderson-de Boer*) untuk memperoleh kurva isoterm sorpsi yang mewakili data hasil pengamatan. Penerapan model GAB pada tahap ini tidak hanya berfungsi sebagai alat *fitting* statistik semata, tetapi juga untuk melihat teori sorpsi air secara fisik, baik pada lapisan terikat kuat (*monolayer*) maupun lapisan sekunder (*multilayer*) di dalam matriks pati beras. Perbandingan visual antara titik data eksperimental absorpsi dan garis kurva kontinu hasil pemodelan GAB disajikan secara rinci pada Gambar IV.2 berikut.



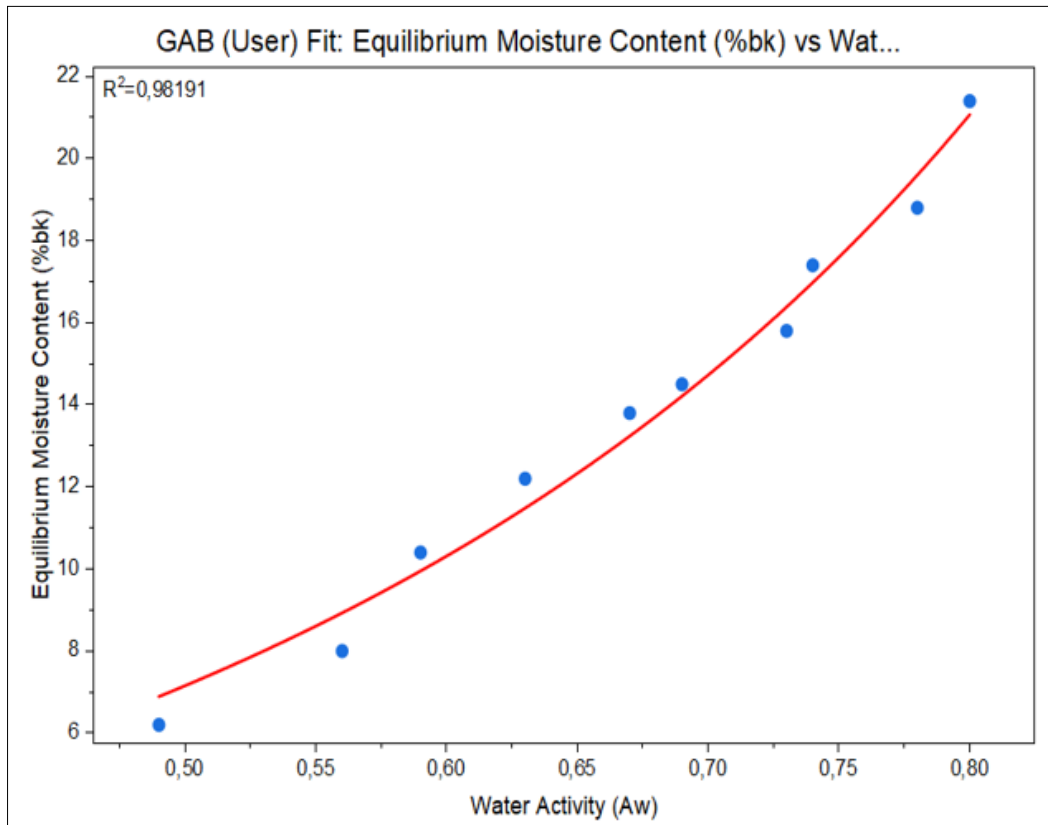
Gambar IV. 2 Kurva Hasil Pemodelan Isoterm Sorpsi Air Proses Absorpsi Beras Sosoh Varietas Ciherang menggunakan Model GAB.

Model isoterm GAB untuk kurva absorpsi menghasilkan parameter $M_0 = 3,38$ %bk, $C = 3,501$, dan $K = 1,015$, dengan $R^2 = 0,9284$ dan $MRD = 11,27\%$. Pada Gambar IV.2, kurva GAB terlihat memiliki kesesuaian yang relatif baik pada zona A_w 0,54–0,73, namun mulai menyimpang dari titik-titik data pengamatan pada zona A_w tinggi ($>0,73$), khususnya di titik A_w 0,76 dan 0,80 di mana kurva GAB memprediksi nilai EMC yang lebih rendah dari pengamatan. Penyimpangan sistematis di zona atas inilah yang mendorong nilai MRD mencapai 11,27%, melampaui ambang batas kelayakan 10% yang ditetapkan oleh (Labuza, 1984), sehingga model GAB dikategorikan tidak memenuhi kriteria kesesuaian untuk kurva absorpsi penelitian ini.

Nilai $M_0 = 3,38$ %bk masih dapat diinterpretasikan sebagai kadar air monolayer beras, karena kisaran M_0 GAB yang dilaporkan untuk sereal umumnya berada pada 3–8 %bk (Mousa dkk., 2014). Namun nilai $K = 1,015$ perlu dicermati karena melampaui batas teoritis $K < 1$ yang dipersyaratkan agar persamaan GAB tetap stabil secara matematis di seluruh rentang A_w , nilai $K \geq 1$ menandakan model berada di titik singularitas yang menyerupai perilaku model BET yang tidak valid pada A_w tinggi (Van den Berg & Bruin, 1981).

Kondisi ini bukan kebetulan, karena data absorpsi hanya mencakup zona A_w 0,54–0,80 tanpa satu pun titik di zona monolayer ($A_w < 0,30$), algoritme Levenberg-Marquardt tidak memiliki cukup informasi untuk mengunci parameter K pada nilai yang stabil, sehingga solusi numerik yang diperoleh meskipun meminimalkan galat kuadrat namun berada di luar domain validitas model GAB (Lomauro & Labuza, 1985). Kondisi $K > 1$ berarti kurva GAB "memaksa" bentuk yang terlalu curam pada zona A_w tinggi, yang justru menyebabkan prediksi EMC di zona tersebut menjadi kurang akurat dan berkontribusi langsung terhadap nilai MRD yang melampaui ambang batas.

Hubungan antara aktivitas air (A_w) dan *Equilibrium Moisture Content* (EMC) untuk kurva desorpsi selanjutnya dimodelkan menggunakan persamaan GAB untuk memperoleh kurva isotherm sorpsi yang mewakili data hasil pengamatan. Kurva hasil pemodelan GAB desorpsi disajikan pada Gambar IV.3.



Gambar IV. 3 Kurva Hasil Pemodelan Isoterm Sorpsi Air Proses Desorpsi Beras Sosoh Varietas Ciherang menggunakan Model GAB.

Kurva GAB pada Gambar IV.3 mengikuti tren data desorpsi dengan relatif baik dan, secara statistik, menghasilkan kesesuaian terbaik di antara seluruh kombinasi model dan kurva yang diuji, $R^2 = 0,9819$ dan $MRD = 9,24\%$, yang memenuhi kriteria $MRD < 10\%$ (Palupi dkk, 2024; Labuza, 1984). Kesesuaian statistik yang baik ini menyimpan masalah yang lebih mendasar pada level interpretasi parameter.

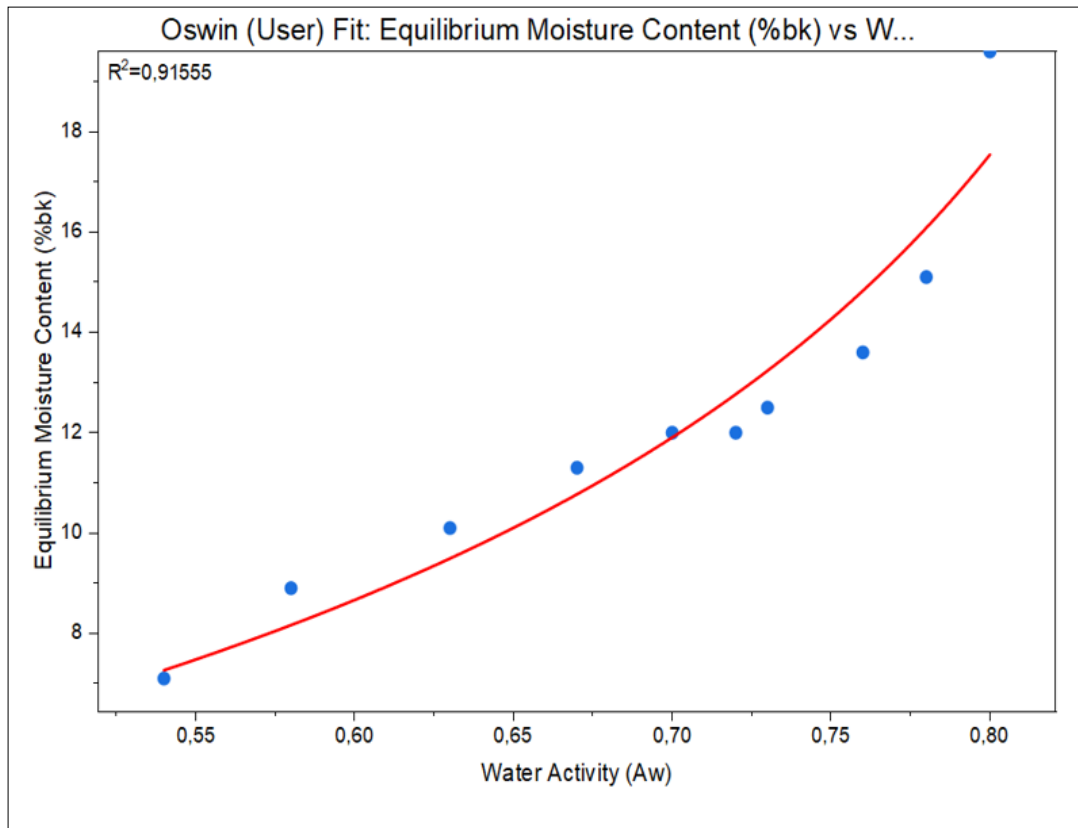
Parameter yang diperoleh adalah $M_0 = 178,13$ %bk, $C = 0,062$, dan $K = 0,628$. Nilai M_0 sebesar 178,13 %bk sama sekali tidak sesuai secara fisik sebagai kadar air monolayer beras sosoh bahkan kadar air beras yang direndam penuh dalam air pun tidak melampaui 30–35 %bk. Parameter ini merupakan konsekuensi

numerik dari proses optimasi nonlinear yang dipaksa mencari solusi terbaik pada data yang tidak mencakup zona monolayer sesungguhnya, tanpa titik data di $A_w < 0,50$ yang menjadi "jangkar" bagi parameter M_0 dan C , algoritme mengarahkan M_0 ke nilai ekstrem yang tidak bermakna secara fisik meskipun secara numerik meminimalkan galat kuadrat (Lomauro & Labuza, 1985).

Fenomena ini konsisten dengan temuan bahwa model GAB cenderung tidak teridentifikasi dengan baik, ketika data fitting hanya mencakup zona A_w menengah-tinggi tanpa representasi zona monolayer, karena algoritme optimasi tidak memiliki cukup informasi untuk mengunci nilai M_0 dan K (Lomauro & Labuza, 1985). Kesesuaian visual dan statistik yang baik pada kurva GAB desorpsi ini pada akhirnya tidak dapat menutupi persoalan mendasar pada parameternya: nilai-nilai tersebut tidak memiliki dasar interpretasi fisik yang valid, sehingga penggunaannya untuk ekstrapolasi di luar rentang data berisiko menghasilkan prediksi yang menyesatkan.

4.4.2 Pemodelan dan Evaluasi Model Isoterm Oswin.

Hubungan antara aktivitas air (A_w) dan *Equilibrium Moisture Content* (EMC) pada proses absorpsi selanjutnya dimodelkan menggunakan persamaan Oswin untuk memperoleh kurva isoterm sorpsi yang mewakili data hasil pengamatan. Perbandingan visual antara titik data eksperimental absorpsi dan garis kurva kontinu hasil pemodelan Oswin disajikan secara rinci pada Gambar IV.2 berikut.



Gambar IV. 4 Kurva Hasil Pemodelan Isoterm Sorpsi Air Proses Absorpsi Beras Sosoh Varietas Ciherang menggunakan Model Oswin.

Model isoterm Oswin untuk kurva absorpsi menghasilkan parameter $A = 6,474$ dan $B = 0,719$, dengan $R^2 = 0,9156$ dan $MRD = 6,04\%$. Gambar IV.4 memperlihatkan kesesuaian yang konsisten antara kurva Oswin dan data pengamatan di seluruh rentang A_w 0,54–0,80, tidak ada penyimpangan sistematis di zona A_w tertentu, dan titik-titik data pengamatan terdistribusi relatif merata di sekitar kurva prediksi tanpa pola residual yang jelas. Nilai MRD 6,04% berada jauh di bawah ambang batas 10% (Labuza, 1984), menjadikan model Oswin sebagai model dengan kesesuaian terbaik untuk kurva absorpsi di antara seluruh kombinasi yang diuji.

Parameter $A = 6,474$ mencerminkan skala kapasitas sorpsi air beras pada rentang A_w yang diukur, sementara parameter $B = 0,719$ menggambarkan

kelengkungan (*curvature*) kurva isotherm yang mencerminkan laju perubahan EMC terhadap A_w . Nilai $B < 1$ mengindikasikan bahwa kurva isotherm bersifat konkaf ke atas (cekung), konsisten dengan bentuk sigmoid Tipe II yang telah dikonfirmasi pada Subbab 4.3.2 (Brunauer dkk., 1940).

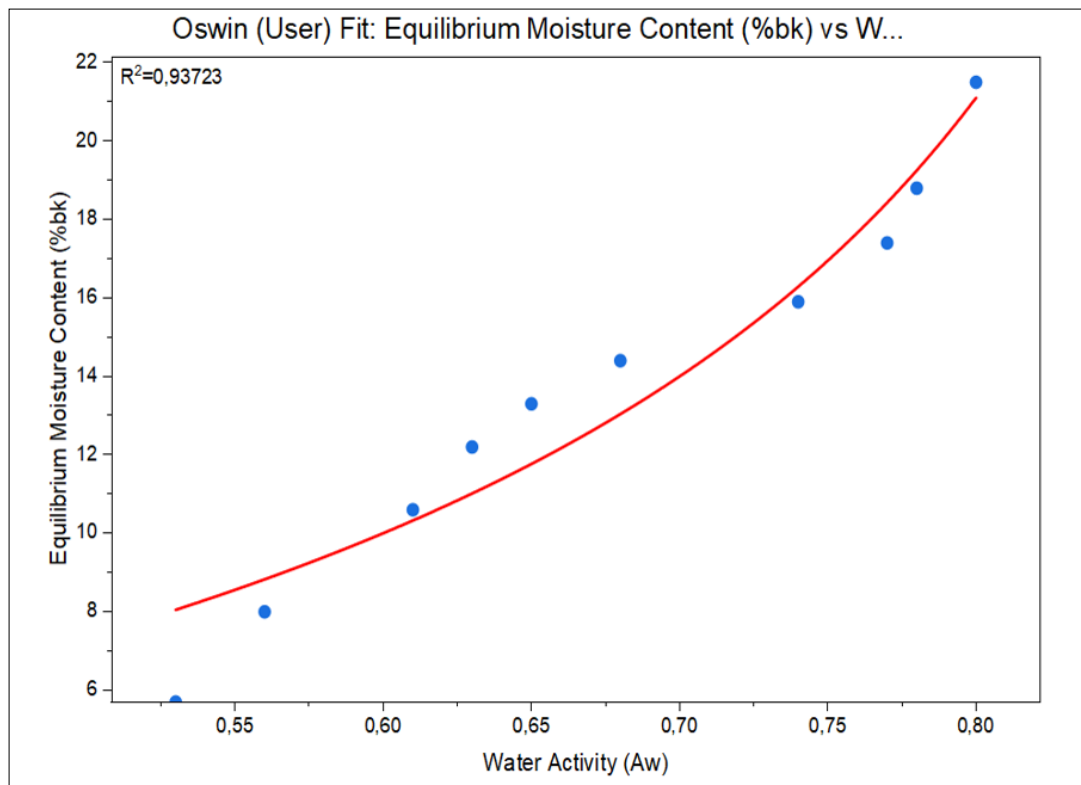
Nilai A dan B tidak dihitung lewat rumus aljabar langsung, karena persamaan Oswin bersifat nonlinear (parameter B berada di posisi pangkat), sehingga tidak ada solusi tertutup untuk menghitungnya secara manual. Nilai A dan B diperoleh melalui proses regresi nonlinear menggunakan algoritma Levenberg-Marquardt, 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.

Prosesnya iteratif dimulai dari nilai tebakan awal, lalu diperbaiki bertahap sampai mencapai solusi yang paling meminimalkan galat tersebut. OriginPro menjalankan proses iteratif ini secara otomatis, dan hasilnya tercatat di Lampiran 4 misalnya untuk Oswin absorpsi, proses ini konvergen setelah 5 iterasi, menghasilkan $A=6,474$ dan $B=0,719$ dengan galat kuadrat (Reduced Chi-Sqr) terkecil yang bisa dicapai.

Nilai A dan B yang diperoleh sebanding dengan yang dilaporkan untuk beras dan sereal lain dalam kondisi sorpsi serupa sebagai pembanding, Mousa et al. (2014) melaporkan parameter Oswin untuk gabah varietas MR219 pada rentang A_w yang *overlapping*, dengan nilai A dan B yang berada dalam orde yang sama, mengkonfirmasi bahwa hasil fitting pada penelitian ini berada dalam rentang yang masuk akal secara komparatif. Berbeda dengan model GAB, parameter A dan B

tidak terikat asumsi fisik monolayer-multilayer sehingga tidak rentan terhadap masalah ketidakstabilan parameter ketika data tidak mencakup zona A_w rendah, menjadikan model Oswin lebih sesuai untuk data pada zona A_w menengah-tinggi seperti dalam penelitian ini (Shimizu & Matubayasi, 2021).

Hubungan antara aktivitas air (A_w) dan *Equilibrium Moisture Content* (EMC) untuk kurva desorpsi selanjutnya dimodelkan menggunakan persamaan Oswin untuk memperoleh kurva isoterm sorpsi yang mewakili data hasil pengamatan. Kurva hasil pemodelan Oswin disajikan pada Gambar IV.5.



Gambar IV. 5 Kurva Hasil Pemodelan Isoterm Sorpsi Air Proses Desorpsi Beras Sosoh Varietas Ciherang menggunakan Model Oswin.

Untuk kurva desorpsi, model Oswin menghasilkan parameter $A = 7,347$ dan $B = 0,761$, dengan $R^2 = 0,9372$ dan $MRD = 9,74\%$. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar IV.5, kurva Oswin mengikuti tren data desorpsi dengan baik di seluruh

rentang A_w yang diukur, meskipun terdapat sedikit penyimpangan pada titik A_w 0,74 dan 0,77 di zona menengah-atas.

Nilai MRD 9,74% berada tepat di bawah ambang batas 10% sehingga model dikategorikan layak atau memiliki kesesuaian yang baik (Palupi dkk, 2024), namun lebih marginal dibandingkan kurva absorpsi (MRD 6,04%), mencerminkan variabilitas yang lebih besar pada data desorpsi akibat prosedur pengeringan bertahap yang lebih sulit dikendalikan dibandingkan penambahan air langsung pada lintasan absorpsi

Perbandingan parameter antara kurva absorpsi ($A = 6,474$; $B = 0,719$) dan desorpsi ($A = 7,347$; $B = 0,761$) mengungkapkan pola yang bermakna. Nilai A yang lebih tinggi pada desorpsi (7,347 vs. 6,474) mencerminkan bahwa pada A_w yang sama, kurva desorpsi memprediksi EMC yang lebih tinggi dibandingkan absorpsi secara langsung merepresentasikan fenomena histeresis dalam bentuk parameter model.

Nilai B yang sedikit lebih tinggi pada desorpsi (0,761 vs. 0,719) menunjukkan bahwa kurva desorpsi memiliki kelengkungan yang sedikit lebih besar, artinya laju kenaikan EMC terhadap A_w pada lintasan desorpsi sedikit lebih cepat dibandingkan lintasan absorpsi pada zona A_w yang sama, konsisten dengan mekanisme kondensasi kapiler yang lebih dominan pada proses pelepasan air dari pori-pori matriks beras (Bell & Labuza, 2000). Perbedaan parameter A dan B antara kedua lintasan ini menjadi dasar kuantitatif untuk analisis histeresis pada Subbab 4.5.

Keunggulan ini berkaitan dengan sifat model Oswin yang bersifat empiris. Berbeda dengan model GAB yang didasarkan pada konsep absorpsi monolayer dan multilayer serta memiliki parameter yang bermakna secara fisik, model Oswin menggunakan dua parameter empiris untuk menggambarkan hubungan antara aktivitas air dan kadar air kesetimbangan tanpa mengasumsikan mekanisme sorpsi tertentu (Shimizu & Matubayasi, 2021). Oleh karena itu, model Oswin cenderung lebih fleksibel dalam menyesuaikan data pada rentang aktivitas air yang terbatas, seperti zona penyimpanan aktual (A_w 0,50–0,80) yang digunakan pada penelitian ini.

Keunggulan model isoterm Oswin untuk produk sereal dan bahan pangan berpati pada kondisi serupa juga dilaporkan oleh Mousa dkk. (2014), yang menyimpulkan bahwa model isoterm Oswin memberikan kesesuaian terbaik untuk gabah Malaysia varietas MR219 dibandingkan tujuh model lain yang diuji, termasuk GAB dan BET.

4.4.3 Pemilihan Model Isoterm Terbaik

Mengacu pada tujuan penelitian (Subbab 1.3) yang menetapkan pemilihan model isoterm terbaik berdasarkan nilai R^2 tertinggi dan MRD terendah pada kedua kurva, hasil evaluasi pada Tabel IV.5 menunjukkan bahwa model isoterm GAB hanya memenuhi kriteria $MRD < 10\%$ pada kurva desorpsi, namun gagal memenuhi kriteria tersebut pada kurva absorpsi ($MRD = 11,27\%$).

Sebaliknya, model isoterm Oswin memenuhi kriteria $MRD < 10\%$ model isoterm Oswin memenuhi kriteria $MRD < 10\%$ pada kedua kurva sekaligus (6,04% untuk absorpsi dan 9,74% untuk desorpsi). Mengingat penelitian ini memerlukan satu model isoterm yang dapat diaplikasikan untuk mendeskripsikan baik lintasan

absorpsi maupun desorpsi sekaligus sebagai dasar estimasi EMC pada Subbab 4.6, dan mengingat parameter model isoterm GAB desorpsi ($M_0=178,13$ %bk) terbukti tidak realistis secara fisik meskipun unggul secara statistik, maka model isoterm Oswin dipilih sebagai model isoterm terbaik untuk mendeskripsikan karakteristik sorpsi air beras sosoh varietas Ciherang pada zona penyimpanan (A_w 0,50–0,80) dalam penelitian ini.

Perlu ditegaskan bahwa pemilihan ini bukan berarti model isoterm GAB tidak berlaku sama sekali, pada kurva desorpsi model isoterm GAB memberikan kesesuaian yang sedikit lebih baik ($R^2= 0,9819$ vs. $0,9372$). Akan tetapi, karena tujuan akhir penelitian adalah menghasilkan persamaan tunggal yang konsisten dan dapat diandalkan untuk kedua arah sorpsi sekaligus memiliki parameter yang dapat diinterpretasikan secara fisik, model isoterm Oswin merupakan pilihan yang lebih sesuai dan lebih aman digunakan sebagai dasar estimasi EMC pada kondisi RH aktual gudang BULOG. Persamaan Oswin terpilih untuk digunakan pada Subbab 4.5 dan 4.6 adalah sebagai berikut:

$$\begin{array}{l} \text{Absorpsi: } M = 6,474 \times (A_w / (1 - A_w))^{0,719} \\ \text{Desorpsi: } M = 7,347 \times (A_w / (1 - A_w))^{0,761} \end{array}$$

dengan M adalah EMC (%bk) dan A_w adalah aktivitas air pada rentang 0,50–0,80, sesuai dengan rentang data yang digunakan dalam proses regresi nonlinear.

4.5 Karakteristik Histeresis Sorpsi Air

Analisis histeresis sorpsi air pada penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan model kontinu berbasis persamaan Oswin yang telah dipilih sebagai model isoterm terbaik pada Subbab 4.4.3. Pendekatan ini lebih ilmiah dibandingkan

interpolasi linear titik demi titik konvensional karena dua alasan mendasar sebagai berikut:

1. Titik-titik A_w pada lintasan absorpsi dan desorpsi dalam penelitian ini tidak sejajar (absorpsi: A_w 0,54–0,80, dan desorpsi: A_w 0,53–0,80), sehingga perbandingan $\Delta EMC = g(A_w) - f(A_w)$ secara langsung antar titik yang tidak berpadanan akan menghasilkan galat posisi A_w yang tidak dapat dihindari.
2. Model kontinu yang sudah tervalidasi dapat dievaluasi pada nilai A_w sembarang dalam rentang fitnya, sehingga ΔEMC dihitung dari fungsi yang halus dan bebas galat pengukuran individual berbeda dengan interpolasi linear yang memindahkan galat pengukuran data mentah ke dalam perhitungan histeresis.

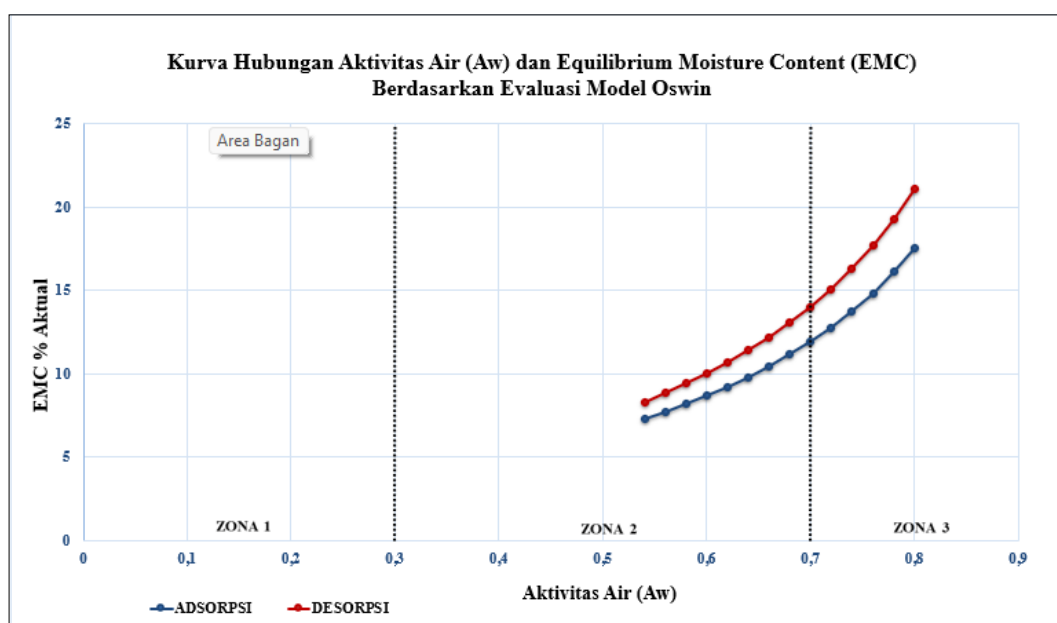
Prosedur analisis mengikuti empat tahap yang telah ditentukan pada Subbab 3.4.4, sehingga hasil evaluasi model pada A_w 0,54–0,80 dengan interval 0,02 disajikan pada Tabel IV.6.

Tabel IV. 6 Histeresis Sorpsi Air Beras Sosoh Ciherang Berdasarkan Perhitungan EMC Berbasis Persamaan Oswin.

Aktivitas Air (A_w)	EMC Absorpsi, $f(A_w)$ (%bk)	EMC Desorpsi, $g(A_w)$ (%bk)	ΔEMC (%bk)
0,54	7,27	8,30	+1,03
0,56	7,70	8,83	+1,13
0,58	8,17	9,39	+1,23
0,60	8,67	10,00	+1,34
0,62	9,21	10,66	+1,46

Aktivitas Air (Aw)	EMC Absorpsi, f(Aw) (%bk)	EMC Desorpsi, g(Aw) (%bk)	Δ EMC (%bk)
0,64	9,79	11,38	+1,59
0,66	10,43	12,17	+1,74
0,68	11,13	13,04	+1,91
0,70	11,91	14,00	+2,10
0,72	12,77	15,07	+2,31
0,74	13,73	16,29	+2,55
0,76	14,83	17,66	+2,84
0,78	16,08	19,25	+3,17
0,80	17,54	21,10	+3,56

Kurva hubungan antara aktivitas air (A_w) dan Equilibrium Moisture Content (EMC) hasil evaluasi model Oswin pada titik A_w yang telah ditetapkan secara seragam disajikan untuk menggambarkan perbedaan lintasan absorpsi dan desorpsi sebagai dasar analisis histeresis sorpsi air, sesuai dengan gambar IV.6.



Gambar IV. 6 Kurva Hubungan A_w dan EMC Hasil Evaluasi Model Oswin pada Titik Aktivitas Air Seragam untuk Analisis Histeresis

Data pada Tabel IV.6 menunjukkan bahwa selisih EMC antara lintasan desorpsi dan absorpsi (ΔEMC) bernilai positif pada seluruh 14 titik A_w yang dievaluasi (A_w 0,54–0,80), mengonfirmasi keberadaan fenomena histeresis sorpsi air beras sosoh Ciherang di seluruh rentang A_w yang dikaji. Pola ini berbeda dari hasil pendekatan interpolasi linear konvensional yang menghasilkan ΔEMC negatif pada A_w 0,54 (–0,63 %bk), suatu anomali yang merupakan hasil sensitivitas interpolasi linear terhadap galat pengukuran pada zona A_w yang sempit dan bukan refleksi fenomena fisik sesungguhnya. Pendekatan model isoterm Oswin mengeliminasi anomali tersebut karena proses regresi nonlinear sudah meratakan galat pengukuran data ke dalam parameter A dan B, sehingga kurva yang dihasilkan secara matematis halus dan monoton.

Nilai ΔEMC menunjukkan tren peningkatan monoton dari +1,03 %bk pada A_w 0,54 hingga +3,56 %bk pada A_w 0,80. Pola monoton ini secara teoritis sejalan dengan mekanisme kondensasi kapiler yang semakin dominan pada zona A_w menengah tinggi, semakin tinggi A_w , semakin banyak pori kapiler yang terisi air selama absorpsi dan semakin besar hambatan pengosongan pori selama desorpsi akibat efek *ink-bottle* (botol tinta), yaitu kondisi ketika pori berukuran besar hanya dapat mengosongkan air melalui pori berukuran lebih kecil yang menyempit di bagian mulutnya, sehingga pengosongan menjadi lebih sulit dibandingkan pengisiannya (Bell & Labuza, 2000), sehingga ΔEMC terus melebar sejalan dengan kenaikan A_w (Bell & Labuza., 2000; Zeymer dkk., 2019). Dalam rentang data penelitian ini (A_w 0,54–0,80), kurva histeresis berada pada bagian "tubuh" loop yang terbuka lebar, sebelum konvergensi kedua lintasan yang secara teoritis baru

terjadi mendekati kondisi saturasi (A_w menuju 1) yang berada di luar rentang pengukuran (Van den Berg & Bruin, 1981).

Luas area histeresis merupakan ukuran kuantitatif yang mencerminkan kemampuan bahan mempertahankan kadar air ketika terjadi perubahan RH lingkungan, semakin luas area histeresis, semakin lambat beras merespons fluktuasi kelembapan di gudang (Zeymer dkk., 2019). Perhitungan luas area histeresis menggunakan aturan trapesium yang menghasilkan nilai sebesar 0,51 %bk pada rentang aktivitas air 0,54–0,80.

Dari perspektif manajemen gudang BULOG, nilai luas histeresis 0,51%bk dan pola ΔEMC yang terus melebar menunjukkan bahwa beras yang memasuki gudang dalam kondisi desorpsi (hasil pengeringan alami dari kadar air tinggi) akan mempertahankan kadar air kesetimbangan yang lebih tinggi pada setiap nilai RH gudang dibandingkan beras yang baru menyerap air dari kondisi kering.

Pada zona RH gudang 70–78% yang merupakan zona kritis pertumbuhan kapang gudang (Subbab 1.1), ΔEMC berkisar antara 2,10–3,17 %bk (Tabel IV.6), artinya beras dengan riwayat kadar air tinggi dapat memiliki EMC kesetimbangan 2–3 %bk lebih tinggi dari yang diperkirakan jika hanya menggunakan kurva absorpsi sebagai acuan. Riwayat kadar air beras sebelum masuk gudang merupakan informasi yang relevan untuk dipertimbangkan dalam kebijakan penerimaan dan pengelolaan penyimpanan beras di gudang BULOG.

Fenomena histeresis yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan bahwa perilaku sorpsi air beras tidak hanya dipengaruhi oleh kondisi lingkungan saat

pengukuran, tetapi juga oleh riwayat perubahan kadar air yang dialami sebelumnya. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa lintasan absorpsi dan desorpsi menghasilkan respons kesetimbangan yang berbeda meskipun berada pada aktivitas air yang sama. Dari sudut pandang penyimpanan, informasi ini penting karena perubahan kadar air beras selama penyimpanan tidak selalu mengikuti satu lintasan yang seragam.

4.6 Estimasi Kadar Air Kesetimbangan pada Kondisi Gudang BULOG dan Implikasinya

Setelah diperoleh model isoterm yang memiliki tingkat kesesuaian terbaik, langkah berikutnya adalah memanfaatkan model tersebut untuk mengestimasi nilai *Equilibrium Moisture Content* (EMC) pada kondisi kelembapan relatif yang umum dijumpai di gudang BULOG. Tahap ini merupakan bentuk penerapan hasil karakterisasi sorpsi air yang telah dilakukan pada subbab sebelumnya. Berbeda dengan data eksperimen yang hanya menggambarkan kondisi pada titik pengamatan tertentu, model isoterm memungkinkan prediksi EMC pada kondisi kelembapan relatif yang relevan dengan penyimpanan aktual. Hasil penelitian ini pun tidak berhenti pada deskripsi hubungan antara aktivitas air dan kadar air kesetimbangan, melainkan menghasilkan informasi yang dapat dijadikan dasar untuk mengevaluasi potensi perubahan kadar air beras selama penyimpanan.

Fenomena histeresis sorpsi air yang teridentifikasi pada Subbab 4.5 menunjukkan bahwa riwayat kadar air beras perlu diperhitungkan dalam menilai risiko penyimpanan, sehingga estimasi EMC berikut ini disajikan untuk kedua

lintasan sorpsi secara terpisah agar dapat menangkap perbedaan risiko tersebut secara kuantitatif.

Sesuai dengan rancangan respon penelitian (Subbab 3.2.4), persamaan Oswin terpilih (Subbab 4.4.3) digunakan untuk mengestimasi nilai EMC beras sosoh Ciherang pada tiga titik aktivitas air yang merepresentasikan rentang RH aktual gudang BULOG: Aw 0,70; 0,75; dan 0,80. Ketiga titik ini dipilih karena mewakili tahapan risiko operasional yang berbeda: Aw 0,70 mendekati ambang bawah pertumbuhan kapang gudang xerofitik (Magan & Aldred, 2007), Aw 0,75 merepresentasikan kondisi RH yang umum tercatat pada penyimpanan gudang BULOG, sedangkan Aw 0,80 merepresentasikan kondisi RH tinggi yang berpotensi terjadi pada musim hujan. Estimasi pada ketiga titik ini memungkinkan evaluasi secara bertahap terhadap peningkatan risiko kualitas beras seiring kenaikan RH gudang, alih-alih hanya membandingkan satu kondisi tunggal terhadap batas aman SNI. Hasil estimasi pada kedua lintasan sorpsi, beserta status kadar airnya terhadap batas aman SNI 6128:2020 (14% bb, setara 16,28 %bk), disajikan pada Tabel IV.7.

Tabel IV. 7 Estimasi EMC Kritis Beras Ciherang pada rentang RH/Aw Aktual Gudang BULOG Berdasarkan Model Isoterm Oswin.

RH/Aw Gudang	EMC Absorpsi (%bk)	EMC Absorpsi (%bb)	EMC Desorpsi (%bk)	EMC Desorpsi (%bb)	Status Keamanan
70% (0,70)	11,91	10,64	14,00	12,28	Aman (kedua lintasan)
75% (0,75)	14,26	12,48	16,95	14,49	Waspada (desorpsi melampaui)

RH/Aw Gudang	EMC Absorpsi (%bk)	EMC Absorpsi (%bb)	EMC Desorpsi (%bk)	EMC Desorpsi (%bb)	Status Keamanan
80% (0,80)	17,54	14,92	21,10	17,42	Melampaui (kedua lintasan)

4.6.1 Analisis EMC pada RH 70% (Aw 0,70)

Pada RH 70% (Aw 0,70) ambang peringatan, estimasi EMC absorpsi beras sosoh Ciherang adalah 11,91 %bk (10,64 %bb), berada cukup jauh di bawah batas aman SNI 16,28 %bk (14% bb), dengan *buffer* keamanan sebesar 4,37 %bk. Dari lintasan desorpsi, EMC pada Aw yang sama adalah 14,00 %bk (12,28 %bb), juga masih di bawah batas SNI dengan *buffer* 2,28 %bk. Dengan demikian, pada RH gudang 70%, beras sosoh Ciherang relatif berisiko rendah terhadap peningkatan kadar air kesetimbangan yang melampaui batas SNI 6128:2020, pada kedua lintasan sorpsi. Temuan ini konsisten dengan rekomendasi FAO (2011) yang menetapkan $RH < 70\%$ sebagai kondisi ideal penyimpanan beras di iklim tropis, serta dengan ambang Aw 0,65–0,70 yang dilaporkan sebagai batas bawah pertumbuhan kapang gudang xerofitik (Magan & Aldred, 2007).

4.6.2 Analisis EMC pada RH 75% (Aw 0,75)

Pada RH 75% (Aw 0,75) ambang kritis, estimasi EMC absorpsi adalah 14,26 %bk (12,48 %bb), secara nominal masih di bawah batas SNI, namun *buffer* keamanannya telah menyempit drastis menjadi hanya 2,02 %bk dibandingkan 4,37 %bk pada RH 70%. Yang lebih kritis, estimasi EMC desorpsi pada RH 75% telah mencapai 16,95 %bk (14,49 %bb), melampaui batas SNI 16,28 %bk dengan selisih

0,67 %bk. Artinya, beras yang sedang mengalami pelepasan air (lintasan desorpsi) pada kondisi RH gudang 75% akan mencapai kesetimbangan pada kadar air yang telah melampaui batas aman SNI 6128:2020, meskipun kadar air aktualnya saat masuk gudang berada pada atau di bawah 14% (bb).

Temuan ini menjadikan RH 75% sebagai ambang kewaspadaan berbasis varietas (*variety-specific warning threshold*) bagi beras sosoh Ciherang, yang berbeda dengan ambang umum RH 70% yang direkomendasikan FAO (2011) untuk beras. Perbedaan ini mencerminkan pentingnya karakterisasi sorpsi berbasis varietas, karena beras sosoh Ciherang dengan kadar amilosa sekitar 23% (BPPSI Padi, 2018), memiliki kapasitas sorpsi air yang spesifik dan tidak dapat diasumsikan identik dengan varietas beras lain (Mousa dkk., 2014). Pada RH 75%, beras yang diterima gudang BULOG dengan kadar air mendekati 14% (bb) dan berasal dari proses pengeringan alami (mengikuti lintasan desorpsi) memerlukan perhatian khusus karena risiko peningkatan kadar air kesetimbangan secara nominal melampaui ambang aman SNI.

4.6.3 Analisis EMC pada RH 80% (A_w 0,80)

Pada RH 80% (A_w 0,80) ambang bahaya, kedua lintasan sorpsi menunjukkan EMC yang telah melampaui batas SNI: EMC absorpsi mencapai 17,54 %bk (14,92 %bb), melampaui SNI sebesar 1,26 %bk dan EMC desorpsi mencapai 21,10 %bk (17,42 %bb), melampaui SNI sebesar 4,82 %bk. Eskalasi tajam EMC pada $A_w > 0,78$ ini konsisten dengan pengamatan pada Subbab 4.3.2 mengenai dominasi mekanisme kondensasi kapiler pada zona A_w tinggi, di mana

peningkatan Aw yang relatif kecil menghasilkan penambahan EMC yang jauh lebih besar (Aviara, 2020).

Kondisi RH 80% di gudang BULOG dapat terjadi pada musim hujan di wilayah Jawa Barat, menjadikan risiko ini bersifat operasional dan bukan sekadar skenario teoretis. Pada zona $Aw > 0,75$, risiko biologis juga meningkat tajam: sebagian besar kapang gudang dapat tumbuh secara optimal pada $Aw > 0,75$, dan pada $Aw 0,80$ hampir seluruh spesies kapang penghasil mikotoksin, termasuk *Aspergillus flavus* dan *Aspergillus parasiticus*, dapat berkembang dengan cepat (Magan & Aldred, 2007). Populasi hama gudang seperti *Sitophilus zeamais* juga dilaporkan berkembang lebih cepat pada kadar air beras 14% (bb) (Putri dkk., 2023), kondisi yang menurut data penelitian ini dapat tercapai secara kesetimbangan bahkan pada RH 80% melalui lintasan absorpsi sekalipun.

4.6.4 Implikasi terhadap Sistem Pemantauan Pengelolaan Gudang

Hasil estimasi EMC dalam penelitian ini memberikan landasan ilmiah berbasis varietas yang dapat mendukung pengembangan sistem peringatan dini (*Early Warning System/EWS*) kualitas beras sosoh Ciherang di gudang BULOG, sejalan dengan konteks penelitian payung yang disebutkan pada Subbab 1.1.

Berdasarkan data yang diperoleh, dapat diusulkan tiga ambang batas operasional. Pertama, $RH \leq 70\%$ sebagai zona aman, di mana EMC kesetimbangan beras Ciherang pada kedua lintasan sorpsi berada cukup jauh di bawah batas SNI, sehingga risiko penurunan mutu akibat penyerapan air relatif minimal. Kedua, RH 70–75% sebagai zona waspada, di mana buffer keamanan menyempit signifikan

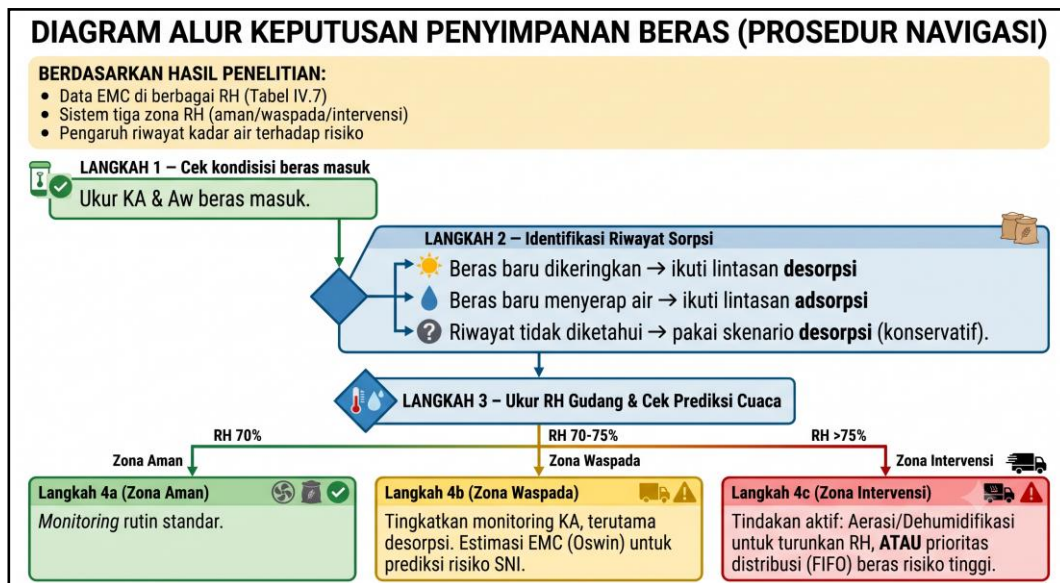
dan EMC lintasan desorpsi mulai mendekati atau melampaui batas SNI; pemantauan RH dan kadar air beras pada zona ini perlu diintensifkan, khususnya untuk beras yang diterima dengan riwayat kadar air tinggi. Ketiga, $RH > 75\%$ sebagai zona intervensi, di mana langkah aktif seperti aerasi, dehumidifikasi, atau evaluasi prioritas distribusi (*first-in-first-out*) perlu segera dipertimbangkan karena EMC kesetimbangan pada zona ini melampaui batas aman SNI pada kedua lintasan sorpsi.

Temuan ini bersifat melengkapi, bukan menggantikan, SNI 6128:2020 yang menetapkan batas kadar air maksimum 14% (bb) tanpa mempertimbangkan karakteristik higroskopis per varietas maupun riwayat kadar air bahan. Data EMC berbasis varietas ini dapat menjadi pertimbangan tambahan dalam keputusan operasional gudang BULOG, khususnya saat RH mendekati atau melampaui 70%, dan berpotensi menjadi input bagi model prediksi perubahan kadar air beras selama penyimpanan jangka panjang (IRRI, 2013).

Fenomena histeresis dengan luas area 0,51 %bk menunjukkan bahwa respons kadar air beras terhadap perubahan kelembapan lingkungan dipengaruhi oleh riwayat sorpsi bahan, bukan hanya nilai RH sesaat. Informasi ini relevan bagi pengembangan sistem pemantauan berbasis sensor di masa depan, di mana ambang peringatan dapat disusun dengan mempertimbangkan kecenderungan perubahan kadar air, bukan sekadar pembacaan sensor real-time.

Secara keseluruhan, estimasi EMC ini memungkinkan sistem pemantauan gudang difokuskan pada pengendalian batas kritis RH dan suhu, sehingga pengelola

dapat mengambil tindakan preventif seperti aerasi atau dehumidifikasi secara tepat waktu sebelum kadar air beras mencapai titik kritis yang memicu risiko deteriorasi sebagaimana digambarkan pada gambar berikut:



Gambar IV. 7. Prosedur Navigasi Keputusan Penyimpanan Beras.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai karakteristik sorpsi air beras sosoh varietas Ciherang pada zona aktivitas air penyimpanan (A_w 0,50–0,80) suhu 30°C, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Kurva sorpsi air beras sosoh Ciherang pada lintasan absorpsi maupun desorpsi menunjukkan pola Tipe II (sigmoid) yang khas produk pangan berbasis pati. EMC meningkat dari 7,1 %bk (A_w 0,54) menjadi 19,6 %bk (A_w 0,80) pada absorpsi, dan dari 5,7 %bk (A_w 0,53) menjadi 21,5 %bk (A_w 0,80) pada desorpsi. Peningkatan EMC relatif landai pada zona A_w rendah-menengah (0,53–0,73), lalu semakin tajam pada A_w tinggi ($>0,76$), dengan akselerasi paling nyata di atas A_w 0,78 seiring mulai dominannya mekanisme kondensasi kapiler.
2. Model Oswin terpilih sebagai model terbaik untuk menggambarkan sorpsi air beras sosoh Ciherang karena konsisten memenuhi kriteria $MRD < 10\%$ pada kedua lintasan (absorpsi 6,04%; desorpsi 9,74%) dengan parameter yang stabil dan bermakna fisik (Absorpsi: $A=6,474$, $B=0,719$; Desorpsi: $A=7,347$, $B=0,761$). Sebaliknya, model GAB hanya memenuhi kriteria MRD pada desorpsi dan gagal pada absorpsi ($MRD=11,27\%$); meskipun R^2 desorpsi GAB tertinggi (0,9819), nilai M_0 yang dihasilkan (178,13 %bk) tidak realistis karena tidak adanya titik data pada zona monolayer (A_w rendah). Dengan demikian, hipotesis kedua yang menduga GAB lebih unggul dari Oswin tidak terbukti.

3. Fenomena histeresis sorpsi air terjadi di seluruh rentang A_w yang diteliti (0,54–0,80), dengan ΔEMC selalu positif dan meningkat monoton dari +1,03 %bk (A_w 0,54) hingga +3,56 %bk (A_w 0,80), serta luas area histeresis sebesar 0,51 %bk. Temuan ini membuktikan hipotesis pertama, yaitu adanya perbedaan nyata EMC antara kurva absorpsi dan desorpsi pada A_w yang sama.
4. EMC beras sosoh Ciherang meningkat konsisten seiring naiknya A_w pada kedua lintasan sorpsi, sebagaimana ditunjukkan kurva sorpsi (Subbab 4.3) dan persamaan Oswin terpilih (Subbab 4.4.3). Temuan ini membuktikan hipotesis ketiga mengenai hubungan positif antara A_w dan EMC.
5. Estimasi EMC pada kondisi RH aktual gudang BULOG menggunakan model Oswin menunjukkan beras masih aman pada $RH \leq 70\%$ (EMC absorpsi 11,91 %bk; desorpsi 14,00 %bk; keduanya di bawah batas SNI 16,28 %bk). Pada RH 75%, EMC desorpsi (16,95 %bk) sudah melampaui batas SNI meski EMC absorpsi belum, menjadikan RH 75% sebagai ambang kewaspadaan khusus varietas Ciherang. Pada RH 80%, kedua lintasan telah melampaui batas SNI.
6. Riwayat kadar air beras sebelum masuk gudang (absorpsi vs desorpsi) terbukti memengaruhi EMC kesetimbangan pada RH yang sama, dengan selisih mencapai 2,10–3,17 %bk pada zona RH kritis pertumbuhan kapang (70–78%). Temuan ini relevan sebagai pelengkap SNI 6128:2020 yang belum mempertimbangkan riwayat kadar air maupun karakteristik

higroskopis spesifik varietas dalam kebijakan penerimaan dan penyimpanan beras di gudang BULOG.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil dan keterbatasan penelitian ini, beberapa saran diajukan sebagai berikut:

1. Bagi Perum BULOG, hasil estimasi EMC dan ambang RH kritis (70%, 75%, 80%) dapat menjadi data pendukung berbasis varietas dalam penyusunan *Early Warning System* kualitas beras sosoh Ciherang, terutama untuk beras berkadar air tinggi (jalur desorpsi) pada RH gudang mendekati atau melebihi 70%.
2. Penelitian lanjutan disarankan memperluas rentang kadar air hingga di bawah 6% (mendekati 2–3%) agar menjangkau zona monolayer ($A_w < 0,30$), sehingga parameter GAB (M_0 dan K) dapat teridentifikasi dan bermakna secara fisik.
3. Penelitian lanjutan disarankan untuk menguji validitas persamaan Oswin terpilih menggunakan data independen (validasi eksternal) di luar data yang digunakan untuk *fitting curve*, sehingga dapat memastikan keandalan model dalam mengestimasi EMC pada kondisi lapangan yang sesungguhnya.
4. Mengingat penelitian hanya menggunakan suhu tunggal (30°C), kajian lanjutan perlu menguji pengaruh variasi suhu harian gudang BULOG (28–34°C) terhadap parameter isoterm dan karakteristik histeresis.
5. Penelitian lanjutan disarankan pula untuk mengkaji varietas beras lain yang umum diterima gudang BULOG selain Ciherang, guna memperkaya basis

data EMC berbasis varietas yang dapat mendukung pengembangan sistem peringatan dini kualitas beras secara lebih komprehensif.

6. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengkaji hubungan antara data isotherm sorpsi hasil penelitian ini dengan umur simpan (*shelf life*) beras sosoh Ciherang secara lebih komprehensif pada kondisi RH gudang aktual, untuk mengetahui estimasi jangka waktu penyimpanan aman berdasarkan data EMC dan ambang RH kritis yang telah diidentifikasi dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Adawiyah, D. R., & Soekarto, S. T. (2010). Pemodelan Isotermis Sorpsi Air Pada Model Pangan. *Jurnal Teknologi Dan Industri Pangan*.
- Aini, N., Prihananto, V., & Wijonarko, G. (2014). Karakteristik Kurva Isotherm Sorpsi Air Tepung Jagung Instan. *AGRITECH* (Vol. 34, Nomor 1).
- Aviara, N. A. (2020). Moisture Sorption Isotherms and Isotherm Model Performance Evaluation for Food and Agricultural Products. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87996>
- Bell, L., & Labuza, T. (2000). Moisture Sorption : Practical Aspects of Isotherm Measurement and Use. Amer Assn of Cereal Chemists.
- BPPSI Padi. (2018). Deskripsi Varietas Unggulan Ciherang.
- BPS. (2023). Konsumsi Rata-rata per Kapita Seminggu Beberapa Macam Bahan Makanan Penting. Badan Pusat Statistik. Jakarta.
- 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.
- BSN. (2020). SNI 6128:2020 Beras. *Badan Standardisasi Nasional*. Jakarta
- Changbandit, P., Santalunai, S., Thongsopa, C., & Phahom, T. (2024). Identification of water transitions using a combination of moisture sorption characteristics and dielectric properties of different parts of jasmine rice (*Oryza sativa*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(13), 8343–8355. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13669>

- Chapra, S., & Canale, R. (2015). *Numerical Methods for Engineers* (7th Edition). McGraw-Hill.
- Cnossen, A. G., & Siebenmorgen, T. J. (2000). The Glass Transition Temperature Concept In Rice Drying and Tempering: Effect on Milling Quality. *Transactions of the ASABE*, 43(6), 1661–1667.
- FAO. (2011). Guide to Efficient Post-Harvest Management of Rice in the Tropics.
- Hasnelly, H., Fitriani, E., Ayu, S. P., & Hervelly, H. (2020). Pengaruh Drajat Penyosohan terhadap Mutu Fisik dan Nilai Gizi Beberapa Jenis Beras. *agriTECH*, 40(3), 182. <https://doi.org/10.22146/agritech.47487>
- IRRI. (2013). Rice Postharvest Management. Los Baños, Philippines. *International Rice Research Institute*.
- Juliano, B. O. . (1993). Rice in human nutrition. *Published with the cooperation of the International Rice Research Institute, Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Kurniawan, Y., Pakpahan, N., Purwanto, A., Purwati, N., & Budijanto, S. (2021). Stabilitas Beras Analog Berdasarkan Pola Kadar Air Keseimbangan. *Jurnal Pangan*, Vol.30 No. 2.
- Labuza, T. P. (1984). Moisture Sorption: Practical Aspects of Isotherm Measurement and Use. AACC International Publishing.
- Lee, D. S., & Robertson, G. L. (2022). Shelf-life estimation of packaged dried foods as affected by choice of moisture sorption isotherm models. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(3). <https://doi.org/10.1111/jfpp.16335>

- 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>
- Lomauro, C. J., & Labuza, T. P. (1985). Evaluation of Food Moisture Sorption Isotherm Equations. *Journal Food Science and Nutrition*, 18 (2).
- 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). <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104761>
- Magan, N., & Aldred, D. (2007). Post-Harvest Control Strategies. *Internasional Journal Of Food Microbiology*, 119, 162–169.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.117357>
- Palupi, N. S., Husna, A., Kusnandar, F., & Sitanggang, A. B. (2024). Formulasi Serbuk Wedang Tahu dan Pendugaan Umur Simpan Menggunakan Metode Kadar Air Kritis. *Jurnal Mutu Pangan : Indonesian Journal of Food Quality*, 11(2), 121–132. <https://doi.org/10.29244/jmpi.2024.11.2.121>

- Putri, N. P., Yunaida, Hendrival, Wirda, Z., & Munauwar, M. M. (2023). Effect of Moisture Content and Storage Period Rice on Population *Sitophilus zeamais* and Damage Rice. *Jurnal Agrium*. <https://ojs.unimal.ac.id/index.php/agrium>
- Rahman, M. S. (2009). *Food Properties Handbook* (2nd ed.). CRC Press.
- Rahmawati, Y., Muhidong, J., & Haerani. (2025). Isotherm Curve Model of Ciherang and Ciliwung Grain Varieties. *Salaga Journal*, 18–26. <https://doi.org/10.70124/salaga.v3i1.1808>
- Rukmawati, Y. E. A., Hartini, S., & Cahyanti, M. N. (2017). Isoterm Sorpsi Air pada Tepung Ubi Jalar Terfermentasi dengan Angkak. *Jurnal Kimia VALENSI*, 3(1). <https://doi.org/10.15408/jkv.v0i0.4814>
- Samapundo, S., Devlieghere, F., Meulenaer, B. De, Atukwase, A., Lamboni, Y., & Debevere, J. M. (2007). Sorption Isotherms and Isosteric Heats of Sorption of Whole Yellow Dent Corn. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.040>
- 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>
- Setyawan, N., Clarissa, Purwani, E. Y., & Budiyanto, A. (2022). Moisture Sorption Isotherm Characteristic of Composite Flour (Cassava, Rice, Sorghum, and Sago) at Various Fitting Models. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1024(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1024/1/012053>

- Shimizu, S., & Matubayasi, N. (2021). Sorption: A Statistical Thermodynamic Fluctuation Theory. *Langmuir*, 37(24), 7380–7391. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c00742>
- Soekarto, S. T., & Adawiyah, D. R. (2012). Keterkaitan Berbagai Konsep Interaksi Air dalam Produl Pangan. Dalam *Ulasan Ilmiah J. Teknol. dan Industri Pangan: XXIII*.
- Sugiyono, S., Satyagraha, H., Joelijani, W., & Syamsir, E. (2010). Pendugaan Umur Simpan Produk Granula Ubi Kayu Menggunakan Model Isoterm Sorpsi Air . 21(3), 233–244.
- Sun, D. W. (1999). Moisture Sorption Isotherms of Rice. *Journal of Food Engineering*, 39, 23–36.
- Susiyanti, Rusmana, Maryani, Y., Sjaifuddin, Krisdianto, N., & Syabana, M. A. (2020). The Physicochemical Properties of Several Indonesian Rice Varieties. *Biotropia*, 27(1), 41–50. <https://doi.org/10.11598/btb.2020.27.1.1030>
- Syarif, & Halid. (1993). *Teknologi Penyimpanan Pangan*. Penerbit Arcan.
- 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). <https://doi.org/10.48048/tis.2022.4950>
- Toğrul, H., & Arslan, N. (2006). Moisture Sorption Behaviour and Thermodynamic Characteristics of Rice stored in a Chamber under Controlled Humidity. *Biosystems Engineering*, 95(2), 181–195. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.06.011>

- Treamnuk, T., Pengprakhon, T., & Treamnuk, K. (2024). Effect of Temperature on Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Thai Jasmine Paddy (Khao Dawk Mali 105). *LWT*, 210. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116871>
- Van den Berg, C., & Bruin, S. (1981). Water activity and its estimation in food systems. In: Water Activity: Influences on Food Quality. *Academic Press*.
- Wariyah, C. (2010). Isoterm Sorpsi Lembab Beras Berkalsium. Dalam *AGRITECH* (Vol. 30, Nomor 4).
- Widowati, S., Herawati, H., Syarief, R., Suyatma, N. E., Prasetia, H. A. (2010). Pengaruh Isoterm Sorpsi Air Terhadap Stabilitas Beras Ubi. Dalam *Hasil Penelitian J.Teknol. dan Industri Pangan: XXI* (Nomor 2).
- 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 Agricola*, 39(4), 524–532. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39n4p524-532/2019>.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Hasil Pengamatan

1. Data Hasil Pengamatan untuk Absorpsi.

Ulangan	Target KA (%bb)	KA Aktual (%bb)	Aw	Suhu Aw	RATA RATA KA	RATA RATA AW	EMC AKHIR	STANDAR DEVIASI KADAR AIR
1	6	6,7	0,54	28,3	6,7	0,54	7,1	0,071
2	6	6,6	0,53	28,4				
1	8	8,3	0,58	28,6	8,2	0,58	8,9	0,212
2	8	8	0,58	28,6				
1	10	9,2	0,63	28,7	9,2	0,63	10,1	0,000
2	10	9,2	0,63	28,7				
1	11	10,3	0,67	28,9	10,2	0,67	11,3	0,212
2	11	10	0,67	28,9				
1	12	10,8	0,7	28,9	10,7	0,70	12,0	0,141
2	12	10,6	0,7	29				
1	13	10,8	0,71	29,1	10,8	0,72	12,1	0,071
2	13	10,7	0,72	29,2				
1	14	11	0,73	29,2	11,2	0,73	12,6	0,212
2	14	11,3	0,73	29,1				
1	15	12,1	0,76	29	12,0	0,76	13,6	0,212
2	15	11,8	0,75	29				
1	16	13,1	0,78	29,2	13,1	0,78	15,1	0,000
2	16	13,1	0,77	29,2				
1	18	16,3	0,79	28,6	16,4	0,80	19,6	0,141
2	18	16,5	0,8	28,7				

2. Data Hasil Pengamatan untuk Desorpsi.

Ulangan	Target KA (%bb)	KA Aktual (%bb)	Aw	Suhu Aw	RATA-RATA KA	RATA-RATA AW	EMC AKHIR	STANDAR DEVIASI KADAR AIR
1	6	5,4	0,53	27,1	5,4	0,53	5,7	0,071
2	6	5,3	0,52	27,6				
1	8	7,5	0,55	28,3	7,4	0,56	8,0	0,141
2	8	7,3	0,56	28,4				
1	10	9,5	0,61	28,1	9,6	0,61	10,6	0,071
2	10	9,6	0,61	28,2				
1	11	10,9	0,63	29,4	10,9	0,63	12,2	0,071
2	11	10,8	0,62	29,5				
1	12	11,5	0,65	28,7	11,7	0,65	13,3	0,283
2	12	11,9	0,64	28,8				
1	13	12,7	0,67	29	12,6	0,68	14,4	0,141
2	13	12,5	0,68	29				
1	14	13,6	0,75	28,7	13,8	0,74	16,0	0,212
2	14	13,9	0,73	28,8				
1	15	14,7	0,76	29,1	14,8	0,77	17,4	0,141
2	15	14,9	0,77	29,2				
1	16	15,8	0,78	29,4	15,9	0,78	18,9	0,071
2	16	15,9	0,78	29,3				
1	18	17,8	0,8	29,3	17,7	0,80	21,5	0,141
2	18	17,6	0,8	29,2				

Lampiran 2. Karakteristik Kimia Beras Ciherang.

Diketahui:

1. Kadar Air: 15% ; 15,1%
2. Aktivitas Air: 0,71 ; 0,69

$$\frac{n1 + n2}{n}$$

$$Kadar\ Air = \frac{15\% + 15,1\%}{2} = 15,1\%$$

$$Aktivitas\ Air = \frac{0,71 + 0,69}{2} = 0,70$$

1. Lampiran Preparasi Sampel Absorpsi.

Diketahui:

Kadar Air Setelah Pengeringan= 4,9%

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

Ditanya: Berapa mL air yang harus ditambahkan untuk mencapai target?

Jawab:

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

$$1. Volume\ Air\ (ml) = \left(\frac{6\% - 4,9\%}{100 - 6\%} \right) \times 100\ gram = 1,17\ ml$$

$$2. Volume\ Air\ (ml) = \left(\frac{8\% - 4,9\%}{100 - 8\%} \right) \times 100\ gram = 3,37\ ml$$

$$3. Volume\ Air\ (ml) = \left(\frac{10\% - 4,9\%}{100 - 10\%} \right) \times 100\ gram = 5,67\ ml$$

$$4. Volume\ Air\ (ml) = \left(\frac{11\% - 4,9\%}{100 - 11\%} \right) \times 100\ gram = 6,85\ ml$$

$$5. \text{Volume Air (ml)} = \left(\frac{12\% - 4,9\%}{100 - 12\%} \right) \times 100 \text{ gram} = 8,07 \text{ ml}$$

$$6. \text{Volume Air (ml)} = \left(\frac{13\% - 4,9\%}{100 - 13\%} \right) \times 100 \text{ gram} = 9,31 \text{ ml}$$

$$7. \text{Volume Air (ml)} = \left(\frac{14\% - 4,9\%}{100 - 14\%} \right) \times 100 \text{ gram} = 10,58 \text{ ml}$$

$$8. \text{Volume Air (ml)} = \left(\frac{15\% - 4,9\%}{100 - 15\%} \right) \times 100 \text{ gram} = 11,88 \text{ ml}$$

$$9. \text{Volume Air (ml)} = \left(\frac{16\% - 4,9\%}{100 - 16\%} \right) \times 100 \text{ gram} = 13,21 \text{ ml}$$

$$10. \text{Volume Air (ml)} = \left(\frac{18\% - 4,9\%}{100 - 18\%} \right) \times 100 \text{ gram} = 15,98 \text{ ml}$$

2. Lampiran Preparasi Sampel Desorpsi.

Diketahui

Berat sampel: 1.200 gram

Kadar air awal: 15,1%

Kadar air target: 20%

Ditanya: berapa mL air yang ditambah untuk mencapai Kadar air target

Jawab:

$$\text{Volume Air (ml)} = \left(\frac{20\% - 15,1\%}{100 - 20\%} \right) \times 1200 \text{ gram} = 73,50 \text{ ml}$$

Lampiran 3. Perhitungan EMC (%bk) Absorpsi dan Desorpsi.

Diketahui:

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

Ditanya: EMC?

a. Kadar air aktual Absorpsi: 6,7; 8,2; 9,2; 10,2; 10,7; 10,8; 11,2; 12; 13,1; 16,4

$$1. EMC (\%bk) = \left(\frac{6,7}{100 - 6,7} \right) \times 100 = 7,1 \%bk$$

$$2. EMC (\%bk) = \left(\frac{8,2}{100 - 8,2} \right) \times 100 = 8,9 \%bk$$

$$3. EMC (\%bk) = \left(\frac{9,2}{100 - 9,2} \right) \times 100 = 10,1 \%bk$$

$$4. EMC (\%bk) = \left(\frac{10,2}{100 - 10,2} \right) \times 100 = 11,3 \%bk$$

$$5. EMC (\%bk) = \left(\frac{10,7}{100 - 10,7} \right) \times 100 = 12 \%bk$$

$$6. EMC (\%bk) = \left(\frac{10,8}{100 - 10,8} \right) \times 100 = 12,1 \%bk$$

$$7. EMC (\%bk) = \left(\frac{11,2}{100 - 11,2} \right) \times 100 = 12,6 \%bk$$

$$8. EMC (\%bk) = \left(\frac{12}{100 - 12} \right) \times 100 = 13,6 \%bk$$

$$9. EMC (\%bk) = \left(\frac{13,1}{100 - 13,1} \right) \times 100 = 15,1 \%bk$$

$$10. EMC (\%bk) = \left(\frac{16,4}{100 - 16,4} \right) \times 100 = 19,6 \%bk$$

b. Kadar air aktual Desorpsi: 5,4; 7,4; 9,6; 10,9; 11,7; 12,6; 13,8; 14,8; 15,9; 17,7

$$1. EMC (\%bk) = \left(\frac{5,4}{100 - 5,4} \right) \times 100 = 5,7 \%bk$$

$$2. EMC (\%bk) = \left(\frac{7,4}{100 - 7,4} \right) \times 100 = 8 \%bk$$

$$3. EMC (\%bk) = \left(\frac{9,6}{100 - 9,6} \right) \times 100 = 10,6 \%bk$$

$$4. EMC (\%bk) = \left(\frac{10,9}{100 - 10,9} \right) \times 100 = 12,2 \%bk$$

$$5. EMC (\%bk) = \left(\frac{11,7}{100 - 11,7} \right) \times 100 = 13,3 \%bk$$

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

$$7. EMC (\%bk) = \left(\frac{13,8}{100 - 13,8} \right) \times 100 = 16 \%bk$$

$$8. EMC (\%bk) = \left(\frac{14,8}{100 - 14,8} \right) \times 100 = 17,4 \%bk$$

$$9. EMC (\%bk) = \left(\frac{15,9}{100 - 15,9} \right) \times 100 = 18,9 \%bk$$

$$10. EMC (\%bk) = \left(\frac{17,7}{100 - 17,7} \right) \times 100 = 21,5 \%bk$$

c. EMC Kadar air aktual SNI 14%

$$EMC (\%bk) = \left(\frac{14}{100 - 14} \right) \times 100 = 16,28 \%bk$$

4. Hasil Pemodelan Matematis Pada Model Isoterm Oswin untuk Desorpsi.

Lampiran 5. Perhitungan Nilai MRD Berdasarkan Model Isoterm

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

1. Perhitungan Nilai MRD Absorpsi Model Isoterm GAB

No.	Aw	EMC Aktual (%bk)	EMC PREDIKSI	MRD
1	0,54	7,1	6,06	14,69
2	0,58	8,9	6,85	22,99
3	0,63	10,1	8,08	20,02
4	0,67	11,3	9,32	17,56
5	0,7	12	10,46	12,83
6	0,72	12	11,36	5,31
7	0,73	12,5	11,87	5,08
8	0,76	13,6	13,63	0,24
9	0,78	15,1	15,09	0,05
10	0,8	19,6	16,86	13,98

Keterangan: EMC prediksi didapat dari rumus pemodelan GAB.

$$\begin{aligned}
 1. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{7,1 - 6,06}{7,1} \right| = 14,69 & 6. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{12 - 11,36}{12} \right| = 5,31 \\
 2. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{8,9 - 6,85}{8,9} \right| = 22,99 & 7. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{12,5 - 11,87}{12,5} \right| = 5,08 \\
 3. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{10,1 - 8,08}{10,1} \right| = 20,02 & 8. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{13,6 - 13,63}{13,6} \right| = 0,24 \\
 4. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{11,3 - 9,32}{11,3} \right| = 17,56 & 9. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{15,1 - 15,09}{15,1} \right| = 0,05 \\
 5. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{12 - 10,46}{12} \right| = 12,83 & 10. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{19,6 - 16,86}{19,6} \right| = 13,98
 \end{aligned}$$

$$\frac{MRD_1 + MRD_2 + \dots + MRD_{10}}{n}$$

$$\begin{aligned}
 &14,69 + 22,99 + 20,02 + 17,56 + 12,83 + 5,31 + 5,08 + 0,24 \\
 &+ 0,05 + 13,98 \\
 = &\frac{}{10}
 \end{aligned}$$

$$MRD = 11,27 \%$$

2. Perhitungan Nilai MRD Desorpsi Model Isoterm GAB

No.	Aw	EMC Aktual (%bk)	EMC PREDIKSI	MRD
1	0,53	5,7	8,00	40,34
2	0,56	8	8,93	11,59
3	0,61	10,6	10,69	0,85
4	0,63	12,2	11,48	5,89
5	0,65	13,3	12,33	7,30
6	0,68	14,4	13,72	4,75
7	0,74	15,9	16,98	6,79
8	0,77	17,4	18,91	8,65
9	0,78	18,8	19,60	4,25
10	0,8	21,5	21,07	2,01

Keterangan: EMC prediksi didapat dari rumus pemodelan GAB.

$$\begin{aligned}
 1. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{5,7 - 8}{5,7} \right| = 40,34 & 6. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{14,4 - 13,72}{14,4} \right| = 4,75 \\
 2. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{8 - 8,93}{8} \right| = 11,59 & 7. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{15,9 - 16,98}{15,9} \right| = 6,79 \\
 3. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{10,6 - 10,69}{10,6} \right| = 0,85 & 8. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{17,4 - 18,91}{17,4} \right| = 8,65 \\
 4. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{12,2 - 11,48}{12,2} \right| = 5,89 & 9. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{18,8 - 19,60}{18,8} \right| = 4,25 \\
 5. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{13,3 - 12,33}{13,3} \right| = 7,30 & 10. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{21,5 - 21,07}{21,5} \right| = 2,01
 \end{aligned}$$

$$\frac{MRD_1 + MRD_2 + \dots + MRD_{10}}{n}$$

$$\begin{aligned}
 &40,34 + 11,59 + 0,85 + 5,89 + 7,30 + 4,75 + 6,79 + 8,65 \\
 &+ 4,25 + 2,01 \\
 = &\frac{\quad}{10}
 \end{aligned}$$

$$MRD = 9,24 \%$$

3. Perhitungan Nilai MRD Absorpsi Model Isoterm Oswin.

No.	Aw	EMC Aktual (%bk)	EMC PREDIKSI	MRD
1	0,54	7,1	7,27	2,33
2	0,58	8,9	8,17	8,26
3	0,63	10,1	9,49	6,02
4	0,67	11,3	10,77	4,67
5	0,7	12	11,91	0,79
6	0,72	12	12,77	6,39
7	0,73	12,5	13,24	5,88
8	0,76	13,6	14,83	9,03
9	0,78	15,1	16,08	6,51
10	0,8	19,6	17,54	10,51

Keterangan: EMC prediksi didapat dari rumus pemodelan Oswin.

$$\begin{aligned}
 1. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{7,1 - 7,27}{7,1} \right| = 2,33 & 6. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{12 - 12,77}{12} \right| = 6,39 \\
 2. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{8,9 - 8,17}{8,9} \right| = 8,26 & 7. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{12,5 - 13,24}{12,5} \right| = 5,88 \\
 3. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{10,1 - 9,49}{10,1} \right| = 6,02 & 8. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{13,6 - 14,83}{13,6} \right| = 9,03 \\
 4. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{11,3 - 10,77}{11,3} \right| = 4,67 & 9. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{15,1 - 16,08}{15,1} \right| = 6,51 \\
 5. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{12 - 11,91}{12} \right| = 0,79 & 10. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{19,6 - 17,54}{19,6} \right| = 10,51
 \end{aligned}$$

$$\frac{MRD_1 + MRD_2 + \dots + MRD_{10}}{n}$$

$$\begin{aligned}
 &2,33 + 8,26 + 6,02 + 4,67 + 0,79 + 6,39 + 5,88 + 9,03 \\
 &+ 6,51 + 10,51 \\
 = &\frac{}{10}
 \end{aligned}$$

$$MRD = 6,04 \%$$

4. Perhitungan Nilai MRD Desorpsi Model Isoterm Oswin.

No.	Aw	EMC Aktual (%bk)	EMC PREDIKSI	MRD
1	0,53	5,7	8,05	41,24
2	0,56	8	8,83	10,34
3	0,61	10,6	10,33	2,58
4	0,63	12,2	11,02	9,71
5	0,65	13,3	11,77	11,52
6	0,68	14,4	13,04	9,45
7	0,74	15,9	16,29	2,43
8	0,77	17,4	18,43	5,90
9	0,78	18,8	19,25	2,39
10	0,8	21,5	21,10	1,86

Keterangan: EMC prediksi didapat dari rumus pemodelan Oswin.

$$\begin{aligned}
 1. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{5,7 - 8,05}{5,7} \right| = 41,24 & 6. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{14,4 - 13,04}{14,4} \right| = 9,45 \\
 2. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{8 - 8,83}{8} \right| = 10,34 & 7. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{15,9 - 16,29}{15,9} \right| = 2,43 \\
 3. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{10,6 - 10,33}{10,6} \right| = 2,58 & 8. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{17,4 - 18,43}{17,4} \right| \\
 & & &= 5,90 \\
 4. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{12,2 - 11,02}{12,2} \right| = 9,71 & 9. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{18,8 - 19,25}{18,8} \right| = 2,39 \\
 5. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{13,3 - 11,77}{13,3} \right| = 11,52 & 10. &= \frac{100}{10} \sum_{i=1}^{10} \left| \frac{21,5 - 21,10}{21,5} \right| = 1,86
 \end{aligned}$$

$$\frac{MRD_1 + MRD_2 + \dots + MRD_{10}}{n}$$

$$= \frac{41,24 + 10,34 + 2,58 + 9,71 + 11,52 + 9,45 + 2,43 + 5,90 + 2,39 + 1,86}{10}$$

$$MRD = 9,74\%$$

Lampiran 6. Hasil Perhitungan EMC menggunakan Persamaan Model Isoterm Oswin Terpilih.

$$\left(A \times \left(\frac{A_w}{1 - A_w} \right) \right)^B$$

1. Hasil Perhitungan %EMC Absorpsi menggunakan A_w yang telah ditentukan.

Diketahui:

Nilai A: 6,474

Nilai B: 0,719

Ditanya: Nilai %EMC Absorpsi?

Jawab:

$$1. \left(6,474 \times \left(\frac{0,54}{1-0,54} \right) \right)^{0,719} = 7,27 \%bk$$

$$2. \left(6,474 \times \left(\frac{0,56}{1-0,56} \right) \right)^{0,719} = 7,70 \%bk$$

$$3. \left(6,474 \times \left(\frac{0,58}{1-0,58} \right) \right)^{0,719} = 8,17 \%bk$$

$$4. \left(6,474 \times \left(\frac{0,60}{1-0,60} \right) \right)^{0,719} = 8,67 \%bk$$

$$5. \left(6,474 \times \left(\frac{0,62}{1-0,62} \right) \right)^{0,719} = 9,21 \%bk$$

$$6. \left(6,474 \times \left(\frac{0,64}{1-0,64} \right) \right)^{0,719} = 9,43 \%bk$$

$$7. \left(6,474 \times \left(\frac{0,66}{1-0,66} \right) \right)^{0,719} = 10,43 \%bk$$

$$8. \left(6,474 \times \left(\frac{0,68}{1-0,68} \right) \right)^{0,719} = 11,13 \%bk$$

$$9. \left(6,474 \times \left(\frac{0,70}{1-0,70} \right) \right)^{0,719} = 11,91 \%bk$$

$$10. \left(6,474 \times \left(\frac{0,72}{1-0,72} \right) \right)^{0,719} = 12,77 \%bk$$

$$11. \left(6,474 \times \left(\frac{0,74}{1-0,74} \right) \right)^{0,719} = 13,73 \%bk$$

$$12. \left(6,474 \times \left(\frac{0,76}{1-0,76} \right) \right)^{0,719} = 14,83 \%bk$$

$$13. \left(6,474 \times \left(\frac{0,78}{1-0,78} \right) \right)^{0,719} = 16,08 \%bk$$

$$14. \left(6,474 \times \left(\frac{0,80}{1-0,80} \right) \right)^{0,719} = 17,54 \%bk$$

15. Interpolasi Rh 75% (Aw 0,75)

$$= \left(6,474 \times \left(\frac{0,75}{1-0,75} \right) \right)^{0,719} = 14,26 \%bk$$

2. Hasil Perhitungan %EMC Desorpsi menggunakan data Aw yang telah ditentukan.

Diketahui:

Nilai A: 7,347

Nilai B: 0,761

Ditanya: Nilai %EMC Desorpsi?

Jawab:

$$1. \left(7,347 \times \left(\frac{0,54}{1-0,54} \right) \right)^{0,761} = 8,30 \%bk$$

$$2. \left(7,347 \times \left(\frac{0,56}{1-0,56} \right) \right)^{0,761} = 8,83 \%bk$$

$$3. \left(7,347 \times \left(\frac{0,58}{1-0,58} \right) \right)^{0,761} = 9,39 \%bk$$

$$4. \left(7,347 \times \left(\frac{0,60}{1-0,60} \right) \right)^{0,761} = 10 \%bk$$

$$5. \left(7,347 \times \left(\frac{0,62}{1-0,62} \right) \right)^{0,761} = 10,66 \%bk$$

$$6. \left(7,347 \times \left(\frac{0,64}{1-0,64} \right) \right)^{0,761} = 11,38 \%bk$$

$$7. \left(7,347 \times \left(\frac{0,66}{1-0,66} \right) \right)^{0,761} = 12,17 \%bk$$

$$8. \left(7,347 \times \left(\frac{0,68}{1-0,68} \right) \right)^{0,761} = 13,04 \%bk$$

$$9. \left(7,347 \times \left(\frac{0,70}{1-0,70} \right) \right)^{0,761} = 14 \%bk$$

$$10. \left(7,347 \times \left(\frac{0,72}{1-0,72} \right) \right)^{0,761} = 15,07 \%bk$$

$$11. \left(7,347 \times \left(\frac{0,74}{1-0,74} \right) \right)^{0,761} = 16,29 \%bk$$

$$12. \left(7,347 \times \left(\frac{0,76}{1-0,76} \right) \right)^{0,761} = 17,66 \%bk$$

$$13. \left(7,347 \times \left(\frac{0,78}{1-0,78} \right) \right)^{0,761} = 19,25 \%bk$$

$$14. \left(7,347 \times \left(\frac{0,80}{1-0,80} \right) \right)^{0,761} = 21,10 \%bk$$

15. Interpolasi Rh 75% (Aw 0,75)

$$= \left(7,347 \times \left(\frac{0,75}{1-0,75} \right) \right)^{0,761} = 16,95 \%bk$$

3. Hasil Selisih EMC (ΔEMC) Pada Setiap Titik Aw untuk Kedua Kurva.

$\Delta EMC(Aw) = g(Aw) - f(Aw)$

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • 0.54= 8,30 – 7,27 = 1,03 • 0.56= 8,83 – 7,70 = 1,13 • 0.58= 9,39 – 8,17 = 1,23 • 0.60= 10 – 8,67 = 1,34 • 0.62= 10,66 – 9,21 = 1,46 • 0.64= 11,38 – 9,79 = 1,59 • 0.66= 12,17 – 10,43 = 1,74 | <ul style="list-style-type: none"> • 0.68= 13,04 – 11,13 = 1,91 • 0.70= 14 – 11,91 = 2,10 • 0.72= 15,07 – 12,77 = 2,31 • 0.74= 16,29 – 13,73 = 2,55 • 0.76= 17,66 – 14,83 = 2,84 • 0.78= 19,25 – 16,08 = 3,17 • 0.80= 21,10 – 17,54 = 3,56 |
|--|---|

4. Hasil Perhitungan Luas Histeresis.

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

Diketahui:

ΔAw : 0,02

Ditanya: Luas Histeresis?

Jawab:

$$0,54 - 0,56 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{1,03 + 1,13}{2} \times 0,02 = 0,0216$$

$$0,56 - 0,58 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{1,13 + 1,23}{2} \times 0,02 = 0,0236$$

$$0,58 - 0,60 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{1,23 + 1,34}{2} \times 0,02 = 0,0257$$

$$0,60 - 0,62 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{1,34 + 1,46}{2} \times 0,02 = 0,0280$$

$$0,62 - 0,64 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{1,46 + 1,59}{2} \times 0,02 = 0,0305$$

$$0,64 - 0,66 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{1,59 + 1,74}{2} \times 0,02 = 0,0333$$

$$0,66 - 0,68 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{1,74 + 1,91}{2} \times 0,02 = 0,0365$$

$$0,68 - 0,70 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{1,91 + 2,10}{2} \times 0,02 = 0,0401$$

$$0,70 - 0,72 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{2,10 + 2,31}{2} \times 0,02 = 0,0441$$

$$0,72 - 0,74 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{2,31 + 2,55}{2} x 0,02 = 0,0486$$

$$0,74 - 0,76 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{2,55 + 2,84}{2} x 0,02 = 0,0539$$

$$0,76 - 0,78 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{2,84 + 3,17}{2} x 0,02 = 0,0601$$

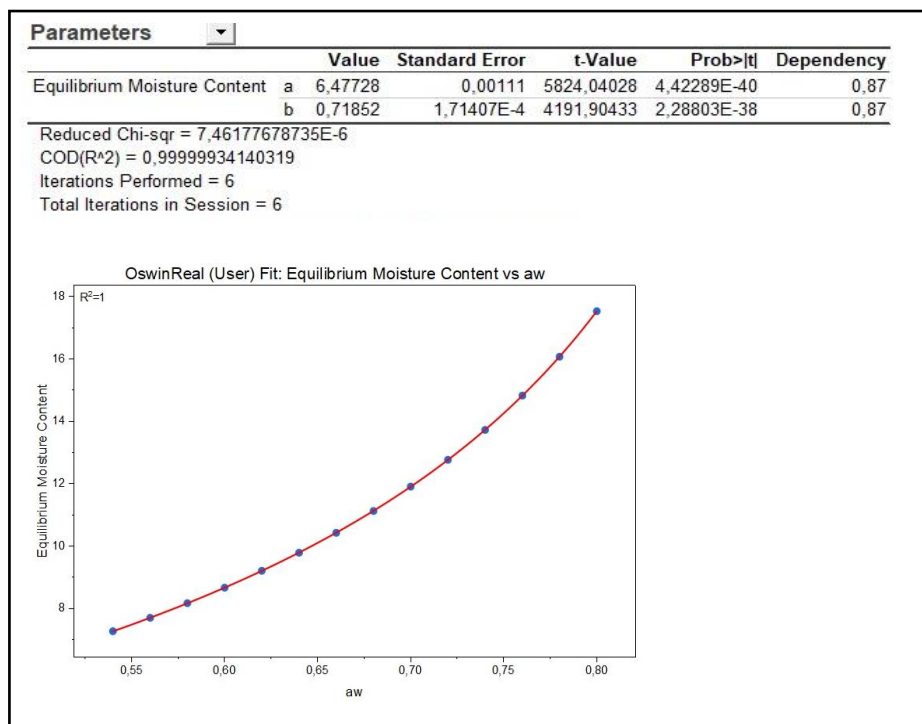
$$0,78 - 0,80 = \sum_{i=1}^{2-1} \frac{3,17 + 3,56}{2} x 0,02 = 0,0673$$

$$A = 0,0216 + 0,0236 + 0,0257 + 0,0280 + 0,0305 + 0,0333 + 0,0365 \\ + 0,0401 + 0,0441 + 0,0486 + 0,0539 + 0,0601 + 0,0673$$

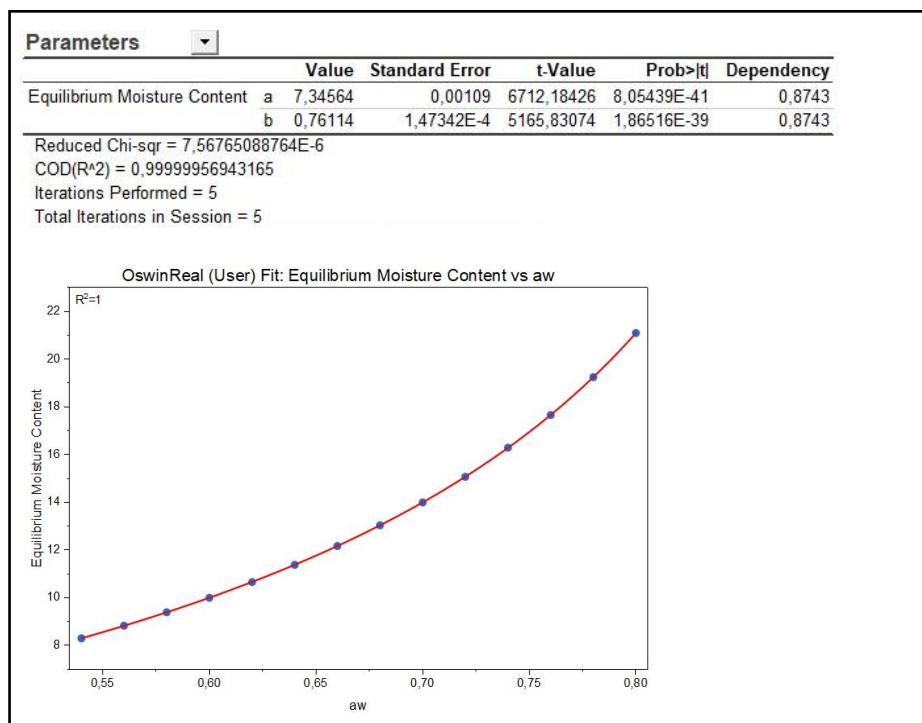
$$= 0,5133 = 0,51 \% \text{bk}$$

Lampiran 7. Nilai Parameter Model Oswin dan Hasil Fitting Curve untuk Nilai a_w yang ditentukan (0,54-0,80).

1. Nilai Parameter dan Fitting Kurva Mode Oswin Absorpsi.



2. Nilai Parameter dan Fitting Kurva Mode Oswin Desorpsi.



Lampiran 8. Dokumentasi Penelitian.

1. Dokumentasi Karakterisasi Sampel Ciherang.



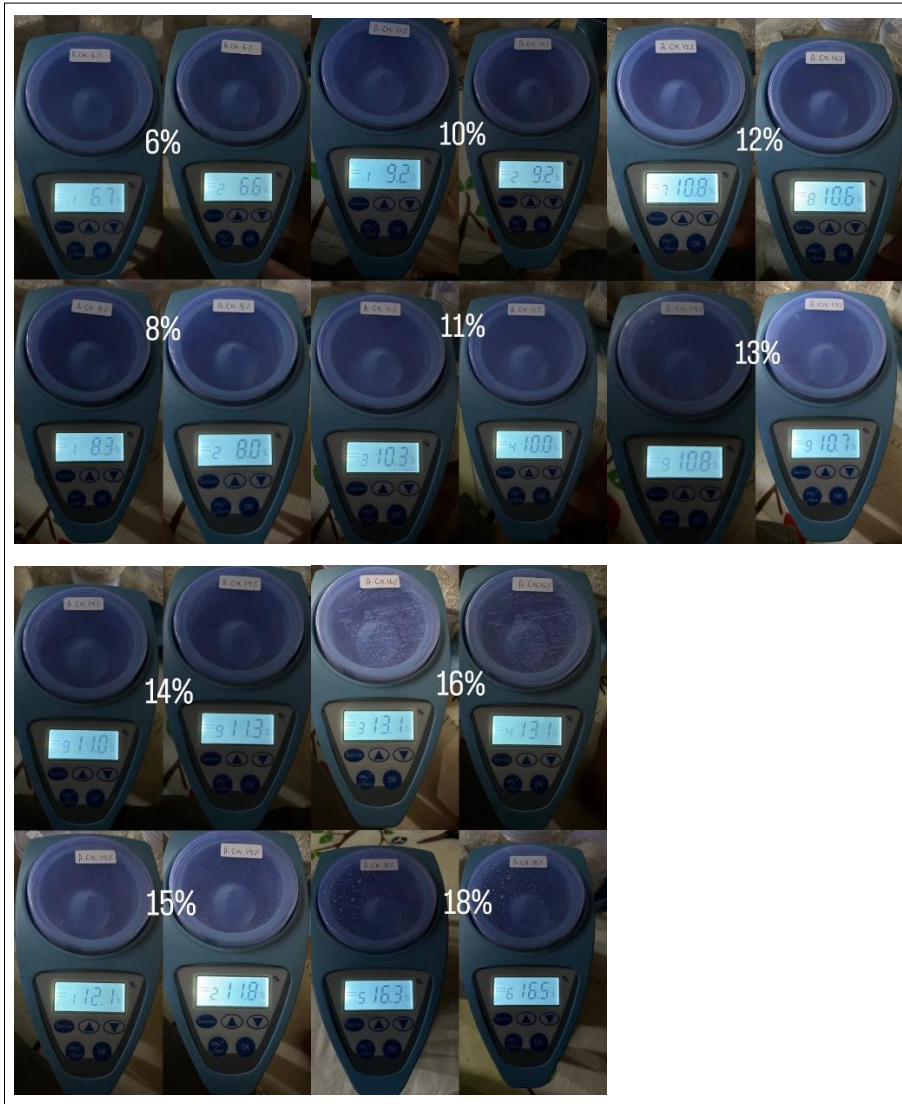
2. Preparasi Sampel Absorpsi.



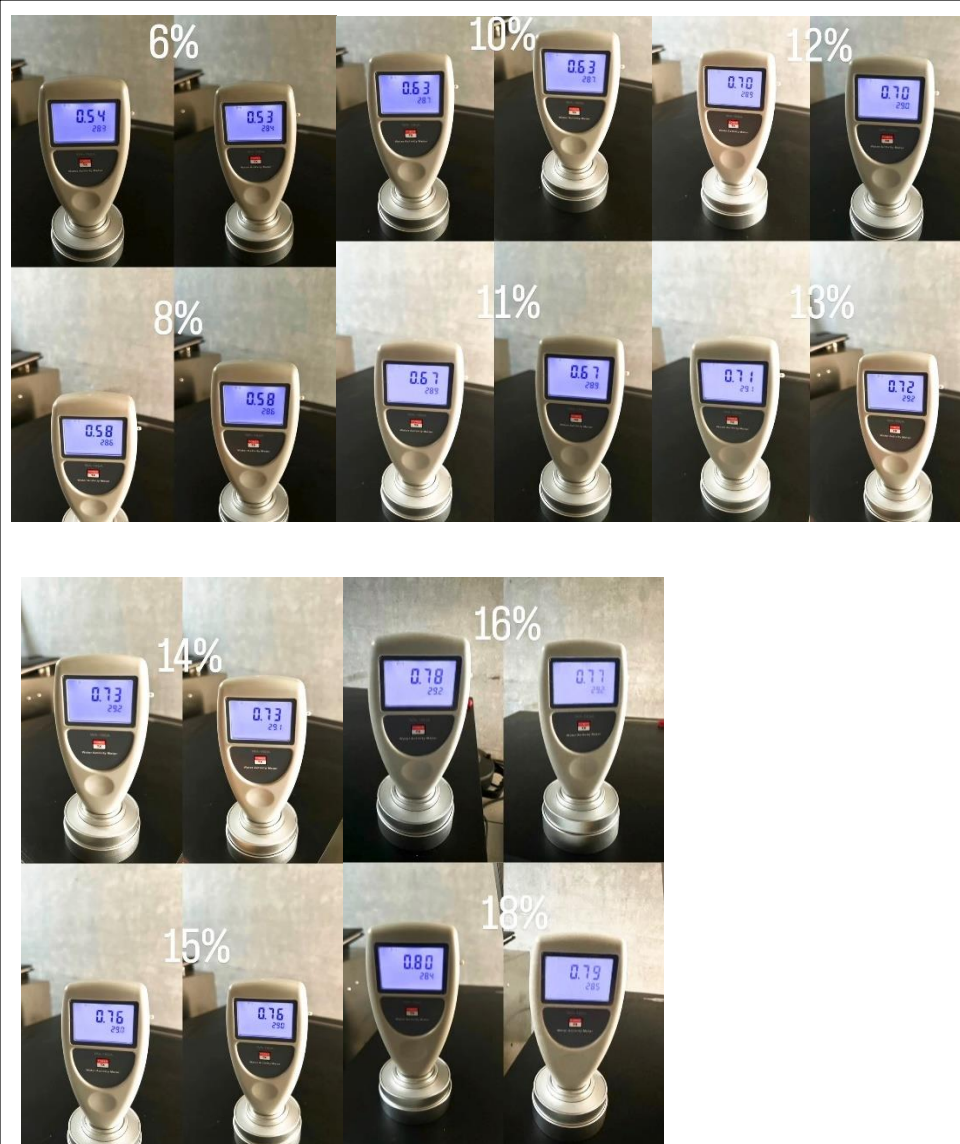
3. Proses Penambahan Aquadest dan Inkubasi Sampel Absorpsi.



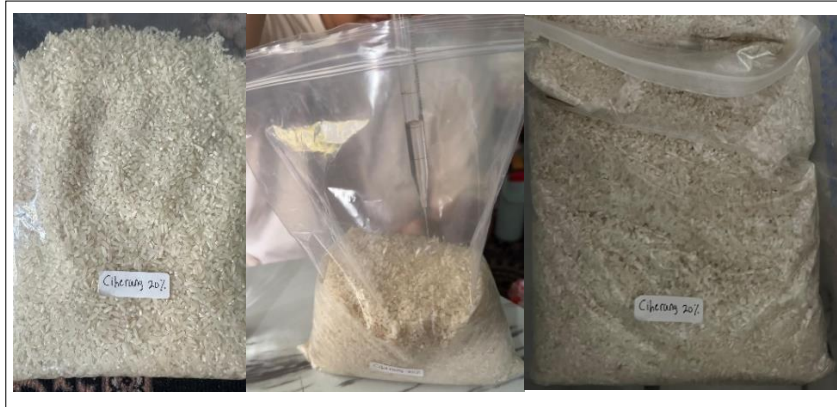
4. Hasil Pengukuran Kadar Air Aktual Sampel Absorpsi.



5. Hasil Pengukuran Aktivitas Air (Aw) Sampel Absorpsi.



6. Preparasi Sampel Desorpsi.



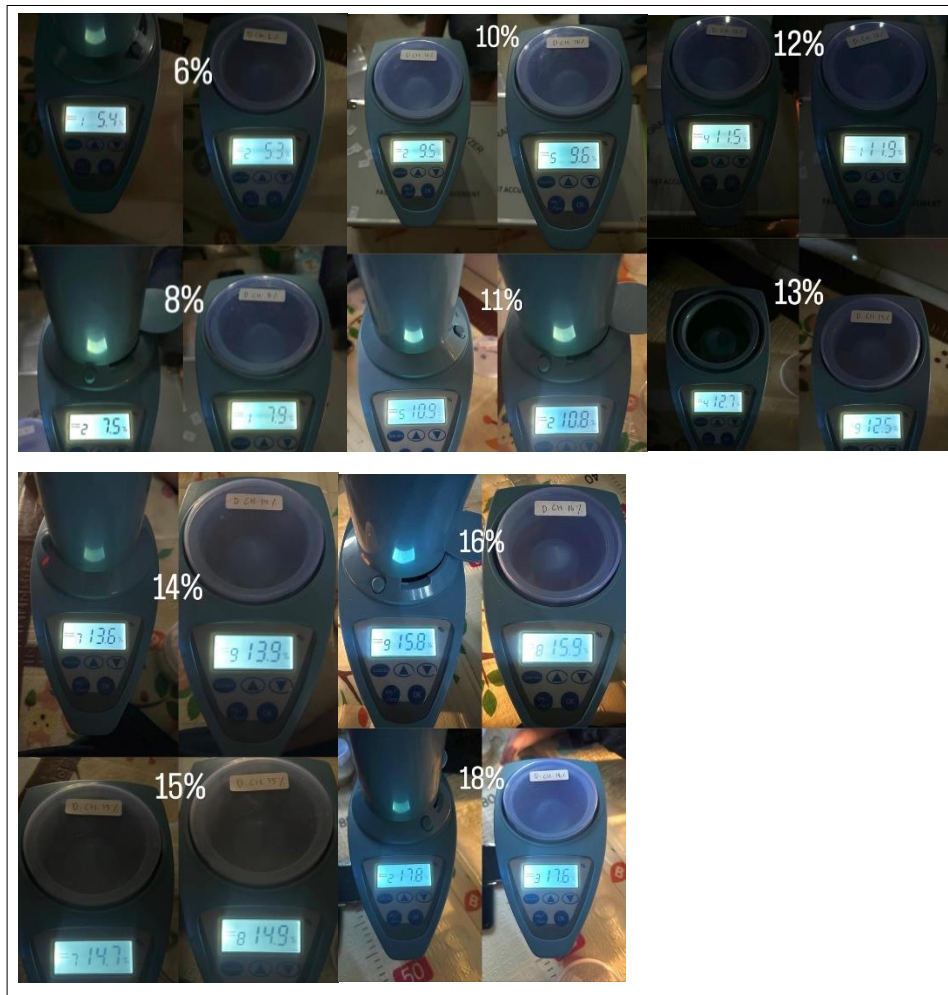
7. Pengukuran Kadar Air Awal Desorpsi.



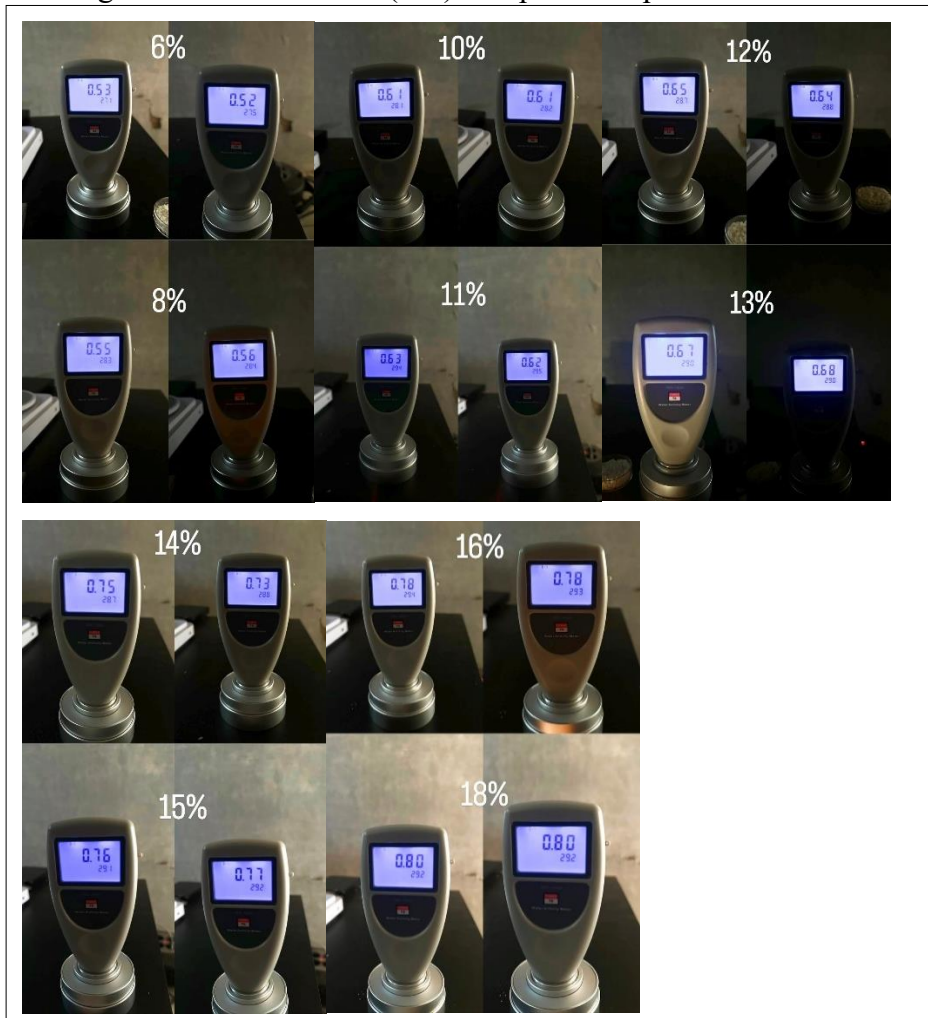
8. Inkubasi Desorpsi dan Pengeringan Sampel hingga sesuai Taraf.



9. Hasil Pengukuran Kadar Air Aktual Sampel Desorpsi.



10. Hasil Pengukuran Aktivitas Air (Aw) Sampel Desorpsi.



Lampiran 9. SNI 6128:2020 Beras.

5 Syarat mutu

Beras harus memenuhi persyaratan mutu umum dan mutu khusus.

5.1 Syarat umum

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