

Model Sorpsi Isotermis sebagai Dasar Pendugaan Masa Simpan Biji Pala (*Myristica fragrans*)

Isothermal Sorption Model for Predicting and Estimating Shelf Life of Nutmeg Seeds

Jamalludin^{1*}, Sarifah Nurjanah¹, Tita Rialita¹, Rienoviar², S. Rosalinda¹

¹Magister Teknologi Agroindustri, Fakultas Teknologi Industri Pertanian, Universitas Padjadjaran, Sumedang 45363, Indonesia

²Organisasi Riset Pertanian dan Pangan, Pusat Riset Agroindustri, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Bogor 16911, Indonesia

*E-mail: jamalludin25001@mail.unpad.ac.id

Diterima: 4 November 2026; Disetujui: 26 Januari 2026

ABSTRAK

Pala (*Myristica fragrans*) merupakan salah satu komoditas perkebunan unggulan Indonesia dengan nilai ekspor yang cukup tinggi dan prospek pasar yang terus meningkat. Biji pala banyak dimanfaatkan pada berbagai bidang, mulai dari industri pangan sebagai bahan penyedap dan flavoring, industri farmasi sebagai komponen obat tradisional, hingga industri kosmetik. Meskipun demikian, dalam beberapa tahun terakhir sejumlah negara tujuan ekspor menolak pengiriman pala Indonesia karena kadar aflatoxin yang terdeteksi melebihi ambang batas maksimum yang diizinkan. Aflatoxin umumnya terbentuk akibat kontaminasi jamur selama proses panen maupun pascapanen, terutama ketika kondisi kadar air tidak terkendali. Proses pengeringan yang kurang optimal dan penyimpanan yang tidak sesuai seringkali meningkatkan kadar air biji pala sehingga menciptakan lingkungan yang mendukung pertumbuhan kapang penghasil aflatoxin. Oleh karena itu, penentuan kadar air kesetimbangan dan kondisi penyimpanan yang tepat melalui pendekatan sorpsi isotermis sangat penting untuk meminimalkan risiko kontaminasi. Penelitian bertujuan mengidentifikasi kondisi penyimpanan optimal yang mampu mencegah pertumbuhan mikroorganisme penghasil aflatoxin pada biji pala. Metode yang digunakan adalah eksperimen dengan menentukan Kurva Sorpsi Isotermis menggunakan larutan garam jenuh NaOH, CH₃COOK, MgCl₂, KI, NaCl, KCl, BaCl₂, pada berbagai tingkat aktivitas air. Data hasil pengukuran kemudian dianalisis menggunakan model sorpsi Halsey, Henderson, Caurie, Oswin, Chen-Clayton, GAB, dengan mengevaluasi akurasi melalui perhitungan nilai Mean Relative Deviation (MRD). Hasil penelitian menunjukkan bahwa model GAB $y=0.0847x+0.0338$ menghasilkan nilai MRD terendah yaitu 1,96, sehingga model yang paling sesuai dalam memprediksi kadar air kesetimbangan bubuk pala. Dengan demikian, model GAB dapat dijadikan acuan dalam merancang strategi pengeringan dan penyimpanan pala untuk menjaga mutu serta meningkatkan ekspor.

Kata kunci: Pala; aflatoxin; kadar air; penyimpanan; sorpsi isotermis

ABSTRACT

Nutmeg (Myristica fragrans) is one of Indonesia's most important plantation commodities, widely cultivated and highly valued in international trade. Nutmeg seeds are utilized in the food industry as flavoring and seasoning, in pharmaceuticals as traditional medicine ingredients, and in cosmetics as raw materials. Despite its high economic potential, several export consignments have been rejected by importing countries due to aflatoxin levels exceeding the maximum permissible limit. Aflatoxin contamination generally occurs during harvest and postharvest handling, particularly under conditions of high seed moisture caused by inadequate drying or improper storage. To minimize this risk, determining equilibrium moisture content and identifying appropriate storage conditions through isothermal sorption modeling are essential. This study aimed to determine optimal storage conditions that prevent the growth of aflatoxin-producing fungi in nutmeg. The research employed experimental methods to construct an Isothermal Sorption Curve using saturated salt solutions NaOH, CH₃COOK, MgCl₂, KI, NaCl, KCl, BaCl₂, at varying water activity levels. Experimental data were fitted to sorption models including Halsey, Henderson, Caurie, Oswin, Chen-Clayton, and GAB, and model performance was evaluated using the Mean Relative Deviation (MRD). Results showed that the GAB model produced $y=0.0847x+0.0338$ the lowest MRD value of 1,96, indicating superior accuracy in predicting the equilibrium moisture content of nutmeg powder. These findings suggest that the Oswin equation can serve as a reliable reference for designing drying and storage systems to maintain nutmeg quality and enhance its competitiveness in the global market.

Keywords: Nutmeg; aflatoxin; moisture content; storage; isothermal sorption

PENDAHULUAN

Pala (*Myristica fragrans*) merupakan salah satu komoditas perkebunan yang paling banyak menghasilkan devisa dengan nilai ekspor 185,32 Juta US\$ dan ditanam secara luas di Indonesia dengan area luas areal 270.660 Ha. (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2023) Biji pala memiliki berbagai kegunaan sebagai bahan makanan, farmasi,

maupun kosmetik. Selain itu, pala juga mengandung senyawa aktif yang bersifat antimikroba (Aisyah *et al.*, 2021; Nurjanah *et al.*, 2017). Produksi Pala Indonesia pada tahun 2022 sebesar 40.896 ton dengan luas areal 270.659 Ha, estimasi produksi pala 2024 sebesar 45.578 ton dengan produktivitas 519 Kg/Ha, Provinsi sentra Pala pada tahun 2022 Maluku Utara, Maluku, Sulawesi Utara, Papua Barat,

Aceh, Sulawesi Tengah dan Jawa Barat. Volume ekspor pada tahun 2022 22,19 Ribu Ton dengan nilai ekspor 185,32 Juta US\$, Negara tujuan India, China, Vietnam, Belanda, Jepang, Jerman, USA, Italia, Pakistan, dan Bangladesh (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2023).

Penerimaan konsumen terhadap pala sangat dipengaruhi oleh kualitas biji. Menurut SNI 0006: 2015, persyaratan mutu biji pala meliputi kadar air (fraksi massa) maksimal 10%, tidak ada serangga mati dan hidup, benda asing (fraksi massa) 0,5% (Badan Standardisasi Nasional, 2015). Batas maksimum aflatoksin pala adalah aflatoksin total (10,0 µg/kg), aflatoksin B1 (5,0 µg/kg) (5). Aflatoksin diproduksi terutama oleh *Aspergillus flavus* dan *A. parasiticus* atau *A. nomius*, Aflatoksin B1 dan B2 dapat menghasilkan metabolit aflatoksin M1 dan M2, namun EU hanya fokus pada batas maksimum aflatoksin B1 dan jumlah aflatoksin (B1+B2+G1+G2) (Badan Standardisasi Nasional, 2009). Frekuensi penolakan 2005-2019 mencapai 98 kasus oleh beberapa negara terutama Uni Eropa akibat kontaminasi aflatoksin/ochratoksin (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2020), jumlah penolakan sebesar 193 ton (Sekretariat Jenderal, 2022).

Permasalahan yang ada adalah kualitas biji pala yang rendah, yang berdampak pada harga dan daya saing di pasar global. Penyebab utama kualitas pala yang rendah adalah keragaman jenis pala, waktu panen, penanganan pasca panen, penyimpanan dan pengemasan yang tidak tepat, serta kontaminasi aflatoksin. (Hafif, 2021). Kontaminasi aflatoksin merupakan parameter kualitas yang sangat menentukan penerimaan eksportir. Kontaminasi aflatoksin terjadi pada beberapa jalur distribusi baik petani, pengepul maupun eksportir. Kegiatan pascapanen yang menentukan tingkat kontaminasi jamur adalah pemanenan, pengumpulan, pengeringan, penyimpanan dan handling (transportasi). Penyimpanan merupakan aktivitas kritis karena terjadi di ketiga jalur distribusi yaitu petani, pengepul dan eksportir (Citinirmala *et al.*, 2016; Direktorat Jenderal Perkebunan, 2020). Pertumbuhan jamur dalam produk pangan dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti komposisi produk, pH, aktivitas air (aw), suhu, komposisi atmosfer, keberadaan dan konsentrasi pengawet, serta lama penyimpanan. Karena aw dan suhu merupakan dua faktor terpenting yang memengaruhi respons pertumbuhan *Aspergillus* (Garcia *et al.*, 2011; Gougouli & Koutsoumanis, 2010). Penyebab utama munculnya aflatoksin dalam biji pala adalah proses pascapanen yang tidak optimal, terutama dalam hal pengeringan dan penyimpanan. Biji pala yang disimpan dalam kondisi kadar air tinggi di atas 10–12% dan kelembaban relatif (*Relative Humidity*/RH) ruang penyimpanan yang tinggi di atas 70% sangat rentan terhadap pertumbuhan jamur *mikotoksinogenik*. (Badan Standardisasi Nasional, 2015; Prasetya *et al.*, 2024).

Aflatoksin tidak hanya berbahaya bagi kesehatan, tetapi juga dapat menurunkan kualitas pala, terutama aromanya, akibat berkurangnya beberapa komponen aroma utama pala (Cui *et al.*, 2023). Untuk itu diperlukan penelitian tentang kadar air yang tepat, dan kondisi penyimpanan yang tepat untuk dapat mencegah kontaminasi jamur penghasil aflatoksin. (Prasetya *et al.*, 2024).

Penelitian mengenai pendugaan umur simpan dengan pendekatan sorpsi isotermis spesifik pada biji pala masih terbatas. Beberapa penelitian sorpsi isotermis yang telah dilakukan umumnya berfokus pada komoditas pertanian lain, seperti Kopi (GA *et al.*, 2022), *Camellia oleifera* (Zhu *et al.*, 2021), Malt gandum (Silva *et al.*, 2021), *Cucumis melo* L. (Mallek-Ayadi *et al.*, 2020), Kakao (GA *et al.*, 2020), Chia (Arslan-Tontul, 2020), *Cyperus esculentus* L (Zhang *et al.*, 2022). Kurva isotermis sorpsi air menunjukkan pola kadar air kesetimbangan sebagai respons produk pada berbagai

kelembaban relatif lingkungan pada suhu tertentu. Pola isotermis sorpsi air akan membantu dalam penyimpanan produk supaya standar kualitas tetap terjaga. Sifat isotermis sorpsi air dapat dianalisis lebih lanjut untuk memprediksi umur simpan menggunakan metode percepatan (*accelerated shelf life testing*, ASLT) dengan pendekatan air kritis (Kurniawan *et al.*, 2021)

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kondisi penyimpanan optimal yang dapat mencegah kontaminasi oleh mikroorganisme penghasil aflatoksin pada biji pala selama penyimpanan.

METODOLOGI

Alat dan Bahan

Penelitian menggunakan bahan utama biji pala (*Myristica fragrans*) diperoleh dari Kepulauan Banda Provinsi Maluku. Biji pala dipilih dalam kondisi kering tanpa cangkang dengan mutu ABCD. Larutan garam jenuh (NaOH, CH₃COOK, MgCl₂, KI, NaCl, KCl, BaCl₂) diperoleh dari Laboratorium Kimia Pangan Fakultas Teknologi Industri Pertanian Universitas Padjadjaran. Sedangkan alat yang digunakan Instalasi destilasi, Timbangan analitik, Toples dengan sensor modifikasi untuk kontrol suhu, RH, dan tekanan, Grinder

Metode Penelitian

Penelitian menggunakan metode eksperimen deskriptif dengan beberapa tahapan. Tahap ke-1 pembuatan model sorpsi isotermis dengan menggunakan larutan garam (NaOH, CH₃COOK, MgCl₂, KI, NaCl, KCl, BaCl₂) selama 15 hari pengukuran kadar air setiap tiga kali dengan model Hasley, Henderson, Caurie, Oswin, Chen Clayton, dan GAB. Tahap ke-2 pendugaan umur simpan dengan menghitung kadar air menggunakan metode destilasi azeotropi, dengan parameter Kadar Air Awal, Kesetimbangan, dan Kritis, Permeabilitas kemasan

Prosedur Penelitian

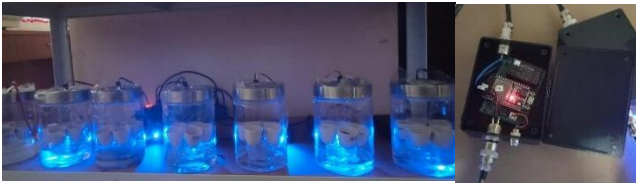
Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Pascapanen dan Laboratorium Kimia Pangan Fakultas Teknologi Industri Pertanian Universitas Padjadjaran. Penelitian dilaksanakan pada bulan Agustus hingga September 2025.

Preparasi Sampel

Sampel pala yang telah dikirim dari Kepulauan Banda, Maluku di seleksi sesuai syarat mutu SNI 0006:2015 yaitu kadar air awal maksimal 10%, tidak berjamur, tidak ada serangga hidup atau mati dan tidak tercampur benda asing dengan standar mutu pala ABCD untuk pemilihan sampel (Badan Standardisasi Nasional, 2015) yang akan digunakan. Sampel di hancurkan dan dihaluskan dengan grinder. Sampel yang telah halus diayak menggunakan ayakan 40mesh.

Tabel 1. Konsentrasi dan RH beberapa macam garam

Garam	Suhu	C jenuh (M)	RH (%)
NaOH	25°C	27,8 M	8,2
CH ₃ COOK	25°C	25,8 M	22,5
MgCl ₂	25°C	4,7 M	32,0
KI	25°C	8,7 M	68,9
NaCl	25°C	6,2 M	75,3
KCl	25°C	4,6 M	84,5
BaCl ₂	25°C	1,7 M	90,0



Gambar 1. Toples sensor modifikasi

Tabel 2. Modifikasi persamaan isotermsorpsi (Kurniawan *et al.*, 2021)

Model	Bentuk Linier/Kuadratik
Hasley	$\log(\ln(1/aw)) = \log P_1 - P_2 \log Me$
Henderson	$\log(\ln(1/(1-aw))) = \log P_1 + P_2 \log Me$
Caurie	$\ln Me = \ln P_1 - P_2 aw$
Oswin	$\ln(\ln(1/(1-aw))) = \log P_1 + P_2 \log Me$
Chen Clayton	$\ln(\ln(1/aw)) = \ln P_1 - P_2 Me$
GAB	$aw/Me = (P_1/mo) (1/(P_2-1)) aw^2 + ((P_2-2)/P_2 mo) aw + 1/P_1 P_2 mo$

Keterangan

- P1, P2 = Konstanta
- Me = Kadar air kesetimbangan
- aw = Aktivitas air
- mo = Kadar air monolayer

Pembuatan Larutan Garam

Volume larutan garam yang diperlukan minimal 10% dari volume toples yang digunakan. Untuk toples yang digunakan adalah ukuran 1.2 Liter. Kebutuhan garam yang digunakan sesuai Tabel 1.

Kadar Air Destilasi

Penetapan kadar air dilakukan dengan metode azeotropi menggunakan alat berupa labu alas bulat 500 ml, alat penampung dan pendingin, tabung penyambung, serta penerima 10 ml. Prosedur dimulai dengan penjernihan toluen, yaitu dengan mendistilasi campuran 200 ml toluen dan 2 ml akuades selama 2 jam, kemudian dibiarkan selama 30 menit untuk proses pendinginan. Volume air yang terkumpul di tabung penerima diukur dengan ketelitian 0,05 ml. (Kementerian Kesehatan, 2020)

Untuk penetapan kadar air pada pala, sebanyak 5 g bubuk pala yang telah ditimbang dimasukkan ke dalam labu yang berisi toluen jenuh, kemudian dipanaskan selama 15 menit. Setelah toluen mendidih, destilasi dilanjutkan dengan kecepatan tetesan 2 tetes per detik hingga sebagian besar air terdistilasi, kemudian kecepatan tetesan ditingkatkan menjadi 4 tetes per detik hingga seluruh air terdistilasi. Proses destilasi dilanjutkan selama 5 menit, dengan pembilasan bagian pendingin menggunakan toluen. Setelah destilasi selesai, volume air yang terpisah diukur, dan kadar air dihitung dalam persen (Kementerian Kesehatan, 2020).

Toples Sensor Modifikasi

Penyimpanan larutan garam jenuh disimpan pada toples modifikasi dengan alat sensor yang terdapat pengukuran suhu, rh, dan tekanan sesuai Gambar 1. Data sensor diperbaharui setiap 5 menit dan mobile menggunakan website: <https://ubidots.com/>

Penentuan Kurva Sorpsi Isotermis

Kurva ditentukan menggunakan 7 larutan garam jenuh. Sebanyak 5 g sampel diletakkan dalam cawan porselin disimpan dalam desikator berisi larutan garam ditimbang bobotnya secara berkala (tiap 3 hari) sampai diperoleh bobot yang konstan. Sampel yang telah mencapai bobot konstan diukur kadar airnya dengan menggunakan metode destilasi dan dinyatakan dalam basis kering. Kurva isotermsorpsi dibuat

dengan memplotkan kadar air dan aktivitas air (Asiah *et al.*, 2018)

Penelitian menggunakan enam model, yaitu Hasley, Henderson, Caurie, Oswin, Chen Clayton, dan GAB. Keenam model dievaluasi nilai MRD (Kurniawan *et al.*, 2021) Modifikasi persamaan isotermsorpsi disajikan pada Tabel 2.

Nilai MRD disajikan dalam Persamaan 1:

$$MRD = \frac{100}{n} \times \sum_{i=1}^n \left| \frac{Mi - Mpi}{Mi} \right| \quad (1)$$

Keterangan:

- MRD = Mean Relative Deviation
- Mi = Kadar air percobaan
- Mpi = Kadar air hasil perhitungan
- n = Jumlah data

Jika nilai MRD < 5, model sorpsi isotermsorpsi tersebut dapat menggambarkan keadaan sebenarnya atau sangat tepat. Jika 5 < MRD < 10 maka model tersebut sedikit tepat menggambarkan keadaan sebenarnya dan jika MRD > 10, model tersebut tidak tepat menggambarkan kondisi sebenarnya (Faridah *et al.*, 2013a). Selanjutnya, dari model persamaan yang terpilih, ditentukan nilai b (kemiringan kurva sorpsi isotermsorpsi) untuk dimasukkan dalam perhitungan umur simpan berdasarkan persamaan Labuza (Kurniawan *et al.*, 2021).

Pendugaan Umur Simpan

Umur simpan pala diduga berdasarkan kadar air kritis model kurva sorpsi isotermsorpsi disajikan dalam Persamaan 2 rumus (Labuza, 1982):

$$\Theta = \frac{\ln \frac{(Me - Mi)}{(Me - Mc)}}{\frac{k}{x} \frac{A}{Ws} \frac{Po}{b}} \quad (2)$$

Keterangan:

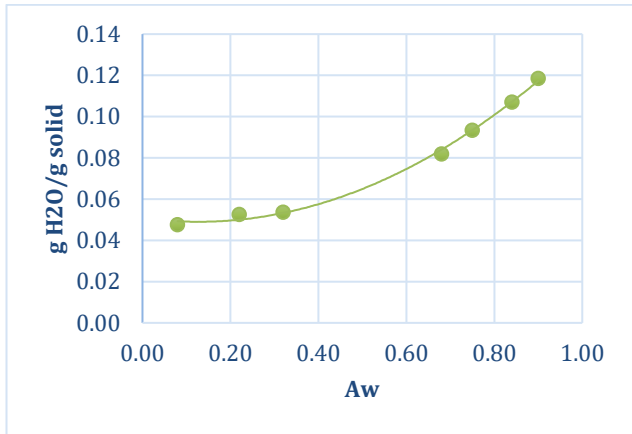
- Θ = Waktu perkiraan umur simpan (hari)
- Me = Kadar air keseimbangan produk (g H₂O/g padatan)
- Mi = Kadar air awal produk (g H₂O/g padatan)
- Mc = Kadar air kritis (g H₂O/g padatan)
- k/x = Permeabilitas uap air kemasan (g/m² hari mmHg)
- A = Luas permukaan kemasan (m²)
- Ws = Bobot kering produk dalam kemasan (g padatan)
- Po = Tekanan uap jenuh (mmHg)
- b = Kemiringan kurva sorpsi isotermsorpsi

Kadar Air Kritis

Kadar air kritis ditentukan dengan cara menyimpan produk didalam desikator yang memiliki kelembaban tinggi (20°C, RH 90). Sampel disimpan Selama 15 hari dengan pengamatan setiap 3 hari. Kemudian dilakukan uji mutu kritis, dengan parameter mutu (Warna, Aroma, dan Penggumpalan). Setelah ditetapkan batas penolakan, dilakukan analisis kadar air kritis sampel yang dinyatakan dalam bobot kering (Kurniawan *et al.*, 2021)

Design Penyimpanan

Design penyimpanan yang digunakan adalah dengan perhitungan semua elemen, Nilai permeabilitas kemasan (k/x), diperoleh dari rujukan kepustakaan. Nilai tekanan uap jenuh (Po) pada suhu penyimpanan diperoleh dari tabel Labuza. Nilai luas penampang (A) diperoleh dengan mengalikan dimensi kemasan. Nilai total padatan (Ws) diperoleh dengan mengoreksi bobot keseluruhan sampel dikurangi kadar air awal (Asiah *et al.*, 2018)



Gambar 2. Kadar air kesetimbangan pada berbagai nilai aw

HASIL DAN PEMBAHASAN

Model kurva sorpsi isotermis disusun berdasarkan hubungan antara kadar air kesetimbangan dan aktivitas air. Pada kondisi penyimpanan bubuk pala di dalam toples berisi larutan garam jenuh, terjadi proses adsorpsi, di mana peningkatan aktivitas air (aw) menyebabkan penambahan massa bubuk pala. Kenaikan kadar air kesetimbangan berlangsung relatif lambat pada rentang aw rendah, sedangkan pada rentang aw tinggi peningkatannya menjadi lebih signifikan (Mosquera *et al.*, 2012).

Data kadar air kesetimbangan pada berbagai nilai aw dapat dilihat pada Gambar 2. dapat dilihat bahwa semakin tinggi nilai aw pada penyimpanan, semakin tinggi pula nilai kadar air kesetimbangannya. Hal ini menunjukkan bahwa tingginya kondisi aw pada suatu penyimpanan akan mengakibatkan kadar air pada produk semakin tinggi yang berpengaruh pada kualitas mutu produk. Kadar air kesetimbangan menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan bertambahnya aktivitas air atau kelembaban relatif (RH) selama penyimpanan (Lucas Aguirre *et al.*, 2021)

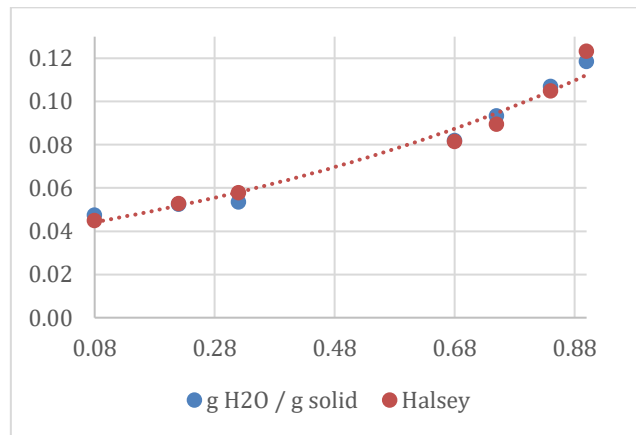
Model kurva sorpsi isotermis disusun berdasarkan hubungan antara kadar air kesetimbangan dan aktivitas air. Pada kondisi penyimpanan bubuk pala di dalam toples berisi larutan garam jenuh, terjadi proses adsorpsi, di mana peningkatan aktivitas air (aw) menyebabkan penambahan massa bubuk pala. Kenaikan kadar air kesetimbangan berlangsung relatif lambat pada rentang aw rendah, sedangkan pada rentang aw tinggi peningkatannya menjadi lebih signifikan. (Mosquera *et al.*, 2012). Data kadar air kesetimbangan pada berbagai nilai aw dapat dilihat pada Gambar 2. bahwa semakin tinggi nilai aw pada penyimpanan, semakin tinggi pula nilai kadar air kesetimbangannya. Hal ini menunjukkan bahwa tingginya kondisi aw pada suatu penyimpanan akan mengakibatkan kadar air pada produk semakin tinggi yang berpengaruh pada kualitas mutu produk. Kadar air kesetimbangan menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan bertambahnya aktivitas air atau kelembaban relatif selama penyimpanan (Lucas Aguirre *et al.*, 2021)

Tujuan dibuatnya model kurva sorpsi isotermis untuk memperoleh gambaran aktivitas air dengan kadar air pada kondisi tertentu secara real (Lucas Aguirre *et al.*, 2021). Kurva yang terbentuk pada Gambar 2 menyerupai huruf S. Kurva yang ditampilkan pada Gambar 2 menunjukkan bentuk menyerupai huruf S, dikategorikan sebagai kurva sigmoid dan termasuk ke dalam isoterm tipe II. (Brunauer *et al.*, 1940). Produk pangan umumnya mempunyai tipikal kurva sorpsi isotermi berbentuk sigmoid. Bentuk sigmoid tersebut terjadi pada produk pangan yang terdiri dari

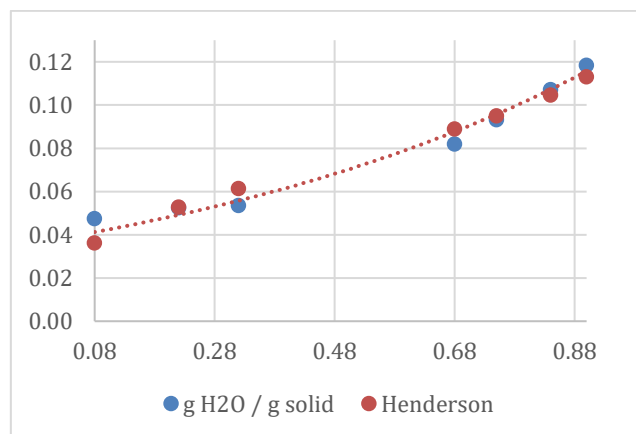
campuran karbohidrat, protein, lemak, dan mineral (Sánchez-Torres *et al.*, 2021). Karakteristik sigmoid pada kurva dipengaruhi oleh efek gabungan hukum Raoult, kapilaritas, dan interaksi air pada permukaan (Sahin & Sumnu, 2006). Kurva tipe II ditemui pada produk makanan dan sistem biologis. Kurva sorpsi terbagi 3 Zona. Zona A menunjukkan wilayah kadar air monolayer, di mana air terikat kuat dengan bahan. Zona B meliputi kadar air multilayer yang merupakan transisi ke sifat alami air bebas dan tersedia untuk reaksi kimia. Air di zona C berada dalam kondisi bebas dan berada di rongga, celah, dan kapiler (Menkov & Durakova, 2007).

Beberapa model isotermis dalam berbagai literatur terdapat 270 model isotermis yang telah diusulkan dan digunakan (Decagon Devices, 2011). Manfaat model-model ini adalah untuk memprediksi kadar air kesetimbangan pada kondisi aktivitas air tertentu dan digunakan untuk mengevaluasi fungsi termodinamika air pada makanan. Penelitian ini menggunakan tujuh model persamaan untuk memprediksi kadar air kesetimbangan pada berbagai tingkat aktivitas air (aw) dan mengevaluasi fungsi termodinamika air dalam bahan pangan.

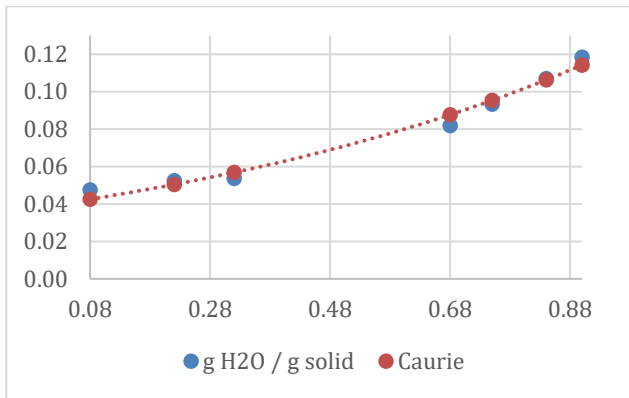
Kadar air kesetimbangan prediksi dari setiap model diplot sebagai fungsi dari aktivitas air (aw) untuk menghasilkan kurva model yang spesifik. Visualisasi ini, yang membandingkan data kadar air kesetimbangan hasil percobaan dengan kurva dari model isotermi sorpsi, disajikan pada Gambar 3 hingga Gambar 8. Tingkat kecocokan model dinilai berdasarkan seberapa dekat kurva hasil perhitungan model berhimpitan dengan kurva isoterm sorpsi hasil percobaan. Keselarasan yang lebih tinggi antara kurva model dan kurva percobaan mengindikasikan ketepatan model yang lebih baik.



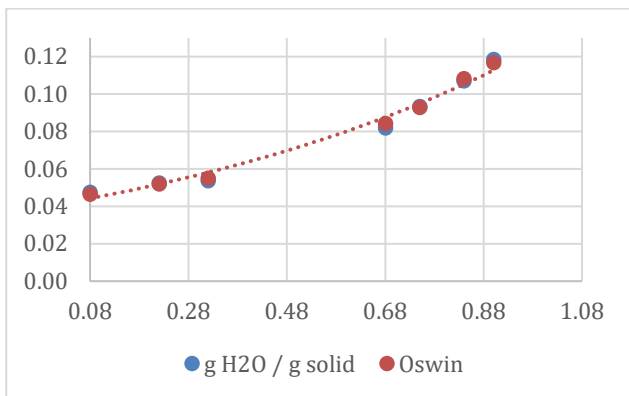
Gambar 3. Ketepatan kurva model Halsey



Gambar 4. Ketepatan kurva model Henderson



Gambar 5. Ketepatan kurva model Caurie



Gambar 6. Ketepatan kurva model Oswin

Model Halsey menawarkan kesederhanaan komputasi karena kemudahannya dilinearisasi dalam bentuk logaritmik. Model ini secara tradisional banyak diaplikasikan pada studi bahan kering pertanian, dan efektif untuk memodelkan isoterm sorpsi pada A_w rendah hingga menengah. Namun, penggunaannya harus dibatasi pada jangkauan tersebut karena model ini menunjukkan ketidakakuratan yang signifikan pada A_w tinggi, dan memiliki batasan dalam interpretasi fisik dari konstanta modelnya. (Halsey, 1948).

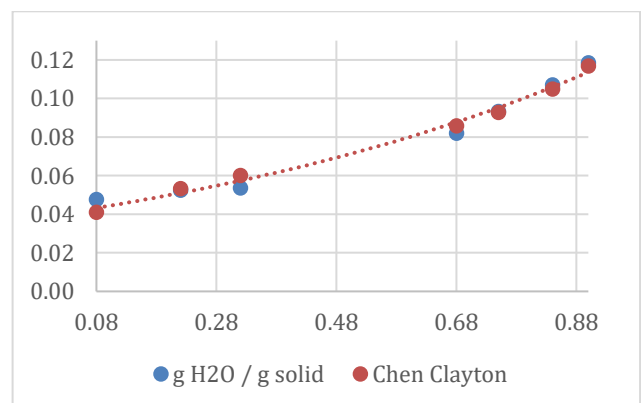
Perhitungan MRD Model Halsey disajikan pada Tabel 3. dengan Ketepatan kurva model Halsey disajikan pada Gambar 3. Nilai MRD pada Model Halsey $3,50 < 5$ yang berarti diidentifikasi sebagai model akurat tapi belum terbaik dalam memprediksi pola isotermi sorpsi pada bubuk pala. Hal ini sesuai dengan penelitian (Dushkova *et al.*, 2023) Bubuk Fennel (*Foeniculum officinale* Mill. var. *dulce* Mill) bahwa Model Halsey menggambarkan isoterm terbaik.

Model Henderson sangat populer dalam teknik pengeringan, terutama untuk komoditas biji-bijian, karena kemudahan implementasinya dan relevansi untuk memprediksi kadar air kesetimbangan yang terkait langsung dengan kelembaban relatif lingkungan penyimpanan. Oleh karena itu, model ini tepat untuk evaluasi cepat kestabilan selama penyimpanan. Kelemahan utamanya adalah sering menunjukkan penyimpangan pada rentang A_w yang sangat rendah dan umumnya tidak tepat untuk bahan pangan yang sangat higroskopis (Henderson, 1952). Perhitungan MRD Model Henderson disajikan pada Tabel 3. dengan Ketepatan kurva model Henderson disajikan pada Gambar 4. Nilai MRD pada Model Henderson $8,55 > 5$ atau $5 < MRD < 10$ maka model tersebut sedikit tepat sebagai model tapi model ini memiliki nilai tertinggi dibandingkan dengan model lain. Hal ini sesuai dengan penelitian (Vasileva *et al.*, 2024) pada Bubuk Nectarine (*Prunus persica*) bahwa model Henderson memiliki nilai tertinggi dibandingkan model lain, berarti model ini sedikit kurang tepat untuk isoterm pada bahan bubuk.

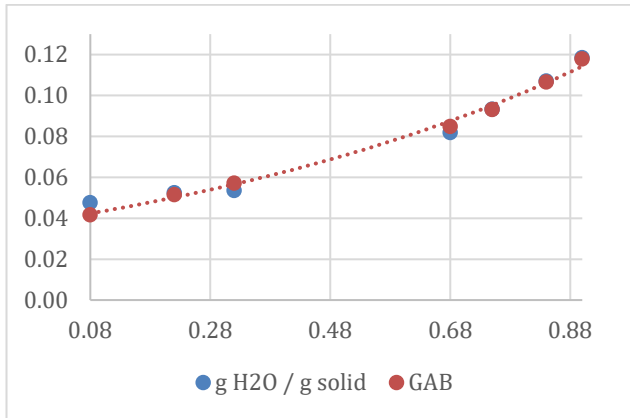
Model Caurie merupakan model empiris dengan jumlah parameter yang minimal, membuatnya efisien untuk tujuan fitting data matematis yang cepat. Model ini dapat digunakan ketika fokus utama adalah deskripsi kurva tanpa memerlukan pemahaman yang mendalam mengenai mekanisme sorpsi air. Keterbatasan esensialnya adalah sifatnya yang hanya empiris, sehingga makna fisik dari konstanta model sangat terbatas, dan akurasinya tergolong rendah pada A_w tinggi. (Caurie, 1970). Perhitungan MRD Model Caurie disajikan pada Tabel 3. dengan Ketepatan kurva model Caurie disajikan pada Gambar 5. Nilai MRD pada Model Caurie $4,53 < 5$ yang berarti diidentifikasi sebagai model akurat tapi belum terbaik dalam memprediksi pola isotermi sorpsi pada bubuk pala. Hal ini sesuai dengan penelitian (Hasbullah & Mahdania, 2023) pada Kakao, model Caurie menjadi terbaik dibandingkan model Chen clayton dan Henderson.

Model Oswin menonjol karena kesederhanaan matematisnya (mudah diregresikan secara linear) dan kemampuannya memberikan fitting yang baik pada rentang A_w menengah. Model ini adalah pilihan praktis untuk memodelkan produk seperti susu bubuk (Oswin, 1946). Perhitungan MRD Model Oswin dihitung dengan Persamaan 6 disajikan pada Tabel 3. dengan Ketepatan kurva model Oswin disajikan pada Gambar 6. Nilai MRD pada Model Oswin $5,87 > 5$ atau $5 < MRD < 10$ maka model tersebut sedikit tepat sebagai model tapi model ini memiliki nilai tertinggi kedua dibandingkan dengan model lain dan lebih rendah dari Henderson. Hal ini sesuai dengan penelitian (Vasileva *et al.*, 2024) pada Bubuk Nectarine (*Prunus persica*) bahwa model Oswin memiliki nilai tertinggi setelah model Henderson dibandingkan dengan model lain, berarti model ini sedikit kurang tepat untuk isoterm pada bahan bubuk.

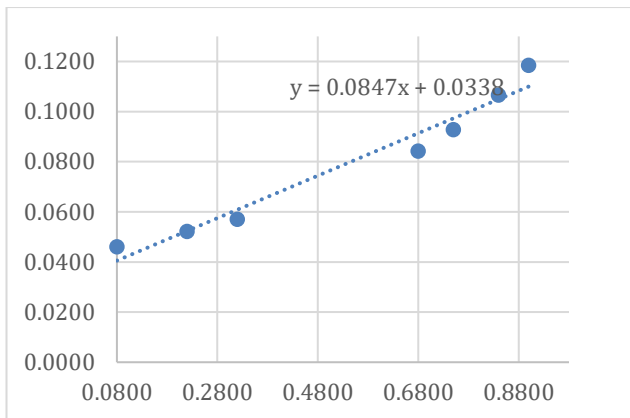
Model Chen-Clayton persamaan empiris yang digunakan dalam studi isoterm sorpsi air pangan karena fleksibilitasnya dalam menghubungkan kadar air kesetimbangan M_e dengan aktivitas air A_w secara logaritmik. Model isoterm persamaan ini sebenarnya berasal dari modifikasi Persamaan Kinetika Elovich yang dikembangkan oleh Chien dan Clayton (1980). Penggunaan model ini lebih didasarkan pada kesesuaian fitting matematis data isoterm pada rentang A_w tertentu, namun parameter konstantanya memiliki interpretasi fisik yang terbatas untuk konteks sorpsi air dibandingkan dengan model berbasis lapisan (Chien & Clayton, 1980). Perhitungan MRD Model Chen Clayton disajikan pada Tabel 3. dengan Ketepatan kurva model Chen Clayton disajikan pada Gambar 7. Nilai MRD pada Model Chen Clayton $4,93 < 5$ yang berarti diidentifikasi sebagai model akurat tapi belum terbaik dalam isotermi sorpsi pada bubuk pala. Hal ini sesuai dengan penelitian (Hasbullah & Mahdania, 2023) pada Kakao, model Chen clayton terbaik dibandingkan Henderson.



Gambar 7. Ketepatan kurva model Chen Clayton



Gambar 8. Ketepatan kurva model GAB



Gambar 9. Kurva sorpsi isotermis bubuk pala model GAB

Model GAB diakui sebagai standar internasional (FAO/IUPAC) dan unggul memprediksi kurva sorpsi air secara akurat pada rentang aktivitas air (A_w) yang luas 0.1 hingga 0.9. Keutamaannya terletak pada parameter yang memiliki dasar teoretis, menjadikannya model gold standard untuk penetapan kadar air monolayer (M_o) nilai penting untuk mengestimasi stabilitas kimia, mikrobiologi, dan fisik produk. Model ini ideal digunakan ketika tujuan penelitian adalah analisis termodinamika sorpsi yang komprehensif, meskipun memerlukan metode regresi non-linear yang lebih kompleks (Van den Berg & Bruin, 1981). Perhitungan MRD Model GAB disajikan pada Tabel 3. dengan Ketepatan kurva model GAB disajikan pada Gambar 8. Model GAB menunjukkan kinerja terbaik dalam memodelkan kadar air kesetimbangan bubuk pala, yang dibuktikan dengan perolehan nilai MRD terendah, yaitu 1,96. Hal ini sesuai dengan penelitian (Sahu & Patel, 2020) pada Bahan Jagung dan (Kurniawan *et al.*, 2021) pada Beras bahwa model GAB memiliki nilai MRD terbaik dibandingkan model lainnya.

Perhitungan nilai MRD digunakan untuk mengukur tingkat akurasi model. (Faridah *et al.*, 2013a) Secara fundamental, MRD merefleksikan perbedaan antara data eksperimen dan nilai yang diprediksi oleh model. Oleh karena itu, nilai MRD yang lebih kecil menunjukkan kesesuaian yang lebih tinggi antara hasil percobaan dan perhitungan model, yang mengindikasikan kinerja model yang lebih baik. Hasil perhitungan MRD untuk setiap model disajikan pada Tabel 3. Berdasarkan kriteria MRD di bawah 5%, model GAB, Halsey, dan Caurie diidentifikasi sebagai model yang paling akurat dalam memprediksi pola isotermi sorpsi pada bubuk pala. Di antara model-model yang tepat tersebut, Persamaan GAB terbaik dalam memodelkan kadar air kesetimbangan bubuk pala, dengan nilai MRD yaitu 1.96.

Kadar air awal sampel dianalisis dengan menggunakan metode destilasi. Berdasarkan hasil analisis, diketahui

bahwa rata-rata kadar air awal pala adalah 7.99 % bobot kering (0.08 g H₂O / g solid), perhitungan kadar air awal sesuai Lampiran 5 Kondisi kadar air awal sudah sesuai SNI 0006:2015 yaitu maksimal 10% (Badan Standardisasi Nasional, 2015). Produk pangan yang memiliki kadar air yang rendah lebih tahan lama dibandingkan dengan kadar air yang tinggi (Hardiyanti & Andraini, 2022) Penyebabnya adalah kandungan air pada bahan pangan memiliki hubungan yang erat terhadap pertumbuhan mikroorganisme. Titik kritis terletak pada saat pala disimpan selama 12 hari sehingga kadar air kritis yang didapat adalah 9.25 % bobot kering (0.09 g H₂O / g solid).

Perubahan tekstur pada bubuk pala selama penyimpanan selama 12 hari pada suhu 20°C dan RH 90% menunjukkan terbentuknya gumpalan pada bubuk pala. Perubahan ini disebabkan oleh kemampuan bubuk pala menyerap uap air dari lingkungan sekitarnya, yang menyebabkan peningkatan kadar air dalam bahan. Peningkatan kadar air tersebut berdampak pada perubahan sifat fisik bubuk pala, terutama pada teksturnya. Semakin lama waktu penyimpanan, tekstur bubuk pala mengalami penurunan mutu yang ditandai dengan terbentuknya aglomerasi partikel, sehingga bubuk menjadi kasar dan menggumpal. Fenomena penggumpalan ini terjadi karena adanya proses penyerapan uap air dari udara ke dalam bahan selama penyimpanan, yang memicu terjadinya adhesi antarpartikel dan menyebabkan terbentuknya massa padat. Hal ini sesuai dengan penelitian (Hasbullah & Mahdania, 2023) pada pengamatan bubuk kakao yang mulai menggumpal pada hari ke 9. Sehingga dapat dikatakan bahwa parameter utama dalam menentukan kerusakan produk bubuk pala dapat dilihat dari segi teksturnya

Model persamaan yang dipilih pada penelitian ini adalah model GAB. Model ini yang akan digunakan untuk menentukan nilai slope kurva pada produk bubuk kakao. Hasil regresi linier antara daerah kadar air awal dan kadar air kritis pada kurva sorpsi isotermis menghasilkan persamaan $y = 0.0847x + 0.0338$ Berdasarkan persamaan garis lurus yaitu $y = a + bx$ dan b adalah slope, maka nilai slope kurva sorpsi isotermis untuk produk bubuk kakao dengan model Oswin sebesar 0.0847. Kurva sorpsi isotermis bubuk pala model GAB dapat dilihat pada Gambar 9.

Parameter pendukung yang juga dibutuhkan untuk menghitung pendugaan umur simpan persamaan Labuza yaitu bobot bahan kering, tekanan uap jenuh, permeabilitas kemasan, luas kemasan dan kemiringan kurva sorpsi isotermis. Bobot produk bubuk pala yang dimasukkan ke dalam kemasan sebanyak 250 gram. Dengan mengetahui bahwa kadar air awal adalah 7.99% maka bobot bahan kering yaitu 246.00 gram. didapat dengan mengoreksi bobot keseluruhan sampel dikurangi g padatan/g total (Faridah *et al.*, 2013b). Permeabilitas uap air kemasan (k/x) merupakan kapasitas suatu kemasan untuk menahan uap air pada suatu kondisi tertentu (Aminullah *et al.*, 2022). Tekanan uap air jenuh pada 30°C sebesar 31.8 mmHg, 25°C sebesar 23.76 mmHg dan 20°C sebesar 17.54 mmHg (Labuza, 1982).

Kemiringan kurva dari model GAB terpilih dengan nilai slope 0.0847. Perhitungan pendugaan umur simpan dengan perhitungan labuza dan diperoleh angka sesuai pada Tabel 4. Perhitungan pendugaan umur simpan metode kadar air kritis dibedakan atas 2 jenis kemasan dan disimulasikan pada Suhu 20°C, 25°C, dan 30°C RH 70, 80, dan 90.

Kemasan aluminium lebih tahan lama dari kemasan kraft. Kemasan standing pouch aluminium foil memiliki umur simpan yang lebih panjang. Panjang pendeknya umur simpan produk pangan sangat dipengaruhi oleh jenis kemasan yang digunakan, dimana berkaitan dengan permeabilitas uap air pada kemasan tersebut.

Tabel 3. Nilai MRD persamaan model

Aw	g H ₂ O / g solid	Halsey	Dev
0,08	0,05	0,04	5,57
0,22	0,05	0,05	0,70
0,32	0,05	0,06	7,86
0,68	0,08	0,08	0,42
0,75	0,09	0,09	4,03
0,84	0,11	0,11	1,90
0,90	0,12	0,12	4,00
MRD			3,50
Aw	g H ₂ O / g solid	Henderson	Dev
0,08	0,05	0,04	18,99
0,22	0,05	0,05	4,20
0,32	0,05	0,06	17,40
0,68	0,08	0,09	8,72
0,75	0,09	0,09	1,66
0,84	0,11	0,10	3,08
0,90	0,12	0,11	5,79
MRD			8,55
Aw	g H ₂ O / g solid	Caurie	Dev
0,08	0,05	0,04	6,60
0,22	0,05	0,05	0,88
0,32	0,05	0,06	8,55
0,68	0,08	0,09	6,56
0,75	0,09	0,09	1,24
0,84	0,11	0,10	2,31
0,90	0,12	0,11	5,58
MRD			4,53
Aw	g H ₂ O / g solid	Oswin	Dev
0,08	0,05	0,04	10,75
0,22	0,05	0,05	4,27
0,32	0,05	0,06	13,94
0,68	0,08	0,08	3,22
0,75	0,09	0,09	2,37
0,84	0,11	0,10	3,97
0,90	0,12	0,12	2,55
MRD			5,87
Aw	g H ₂ O / g solid	Chen Clayton	Dev
0,08	0,05	0,04	15,48
0,22	0,05	0,05	0,36
0,32	0,05	0,06	11,13
0,68	0,08	0,09	4,93
0,75	0,09	0,09	0,22
0,84	0,11	0,11	1,61
0,90	0,12	0,12	0,76
MRD			4,93
Aw	g H ₂ O / g solid	GAB	Dev
0,08	0,05	0,05	3,13
0,22	0,05	0,05	0,48
0,32	0,05	0,06	6,37
0,68	0,08	0,08	2,82
0,75	0,09	0,09	0,57
0,84	0,11	0,11	0,34
0,90	0,12	0,12	0,00
MRD			1,96

Tabel 4. Perhitungan umur simpan pala model Oswin

Parameter	RH 70%	RH 80%	RH 90%
Kadar Air Awal (g H ₂ O/ g solid)	0.08	0.08	0.08
Kadar Air Kritis (g H ₂ O/ g solid)	0.09	0.09	0.09
Kadar Air Kesetimbangan (g H ₂ O/ g solid)	0.09	0.10	0.11
Kemiringan kurva	0.08	0.08	0.08
Tekanan uap jenuh suhu 20°C (mmHg)	17.54	17.54	17.54
Tekanan uap jenuh suhu 25°C (mmHg)	23.76	23.76	23.76
Tekanan uap jenuh suhu 30°C (mmHg)	31.8	31.8	31.8
Bobot padatan per kemasan (g padatan)	246.00	246.00	246.00

Parameter	RH 70%	RH 80%	RH 90%
Permeabilitas Aluminium Foil (g H ₂ O/ m ² .hari.mmHg)	0.02	0.02	0.02
Permeabilitas Kraft (g H ₂ O/ m ² .hari.mmHg)	0.05	0.05	0.05
Luas kemasan 14*22 (m ²)	0.06	0.06	0.06
Umur Simpan			
Aluminium Foil suhu 20°C	2.590	713	442
Aluminium Foil suhu 25°C	1.912	526	326
Aluminium Foil suhu 30°C	1.428	393	244
Kraft suhu 20°C	1.140	314	195
Kraft suhu 25°C	842	232	144
Kraft suhu 30°C	629	173	107

Permeabilitas dari suatu kemasan memiliki nilai yang berbeda-beda tergantung pada sifat dan jenis bahan pada kemasan. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, kemasan standing pouch aluminium foil memiliki nilai permeabilitas kemasan sebesar 0,02 g/hari.m².mmHg. Sedangkan kemasan standing pouch kraft pada kondisi yang sama memiliki nilai permeabilitas kemasan sebesar 0,05 g/hari.m².mmHg. Permeabilitas kemasan standing pouch aluminium foil lebih rendah menunjukkan bahwa kemasan ini memiliki daya menahan uap air yang lebih baik. Semakin rendah permeabilitas suatu kemasan, semakin baik daya kemasan tersebut untuk menahan uap air yang masuk (Johnrencius *et al.*, 2017). Luas kemasan yang dipakai diukur secara manual dan menghasilkan nilai luas kemasan Aluminium foil dan Kraft untuk volume 250 gram adalah 14*22 sebesar 0.0616 m². Beberapa penelitian menyebutkan bahwa produk pangan yang disimpan pada kemasan dengan nilai permeabilitas yang lebih rendah memiliki umur simpan yang lebih panjang (Hasbullah & Mahdania, 2023) dan untuk perkiraan RH 70 lebih tahan lama sesuai pernyataan Pengelolaan kondisi penyimpanan biji pala pada kemasan plastic (Grain pro) suhu 16 °C dengan RH 71-82% telah menekan pertumbuhan *A. flavus* secara signifikan dan meminimalkan kontaminasi aflatoxin yang dihasilkan serta kadar air optimal (5-6%) dan kehilangan berat minimal (Prasetya *et al.*, 2024).

KESIMPULAN

Pala mempunyai pola kadar air kesetimbangan menyerupai kurva isotermis sorpsi air sigmoid (tipe II) dengan persamaan model GAB, Halsey, dan Caurie diidentifikasi sebagai model yang paling akurat dalam memprediksi pola isotermi sorpsi pada bubuk pala. Di antara model-model yang tepat tersebut, Persamaan GAB menunjukkan kinerja terbaik dalam memodelkan kadar air kesetimbangan bubuk pala, yang dibuktikan dengan perolehan nilai MRD terendah, yaitu 1.96 digunakan untuk memprediksi umur simpan. Umur simpan bubuk pala dengan kemasan standing pouch aluminium foil yang disimpan pada kondisi penyimpanan suhu 20 °C, 25°C, 30°C dengan kelembaban relatif (RH) 70% berturut-turut adalah 2590 hari, 1912 hari, dan 1428 hari. Sedangkan dengan kemasan standing pouch kraft adalah 1.140 hari, 842 hari dan 629 hari. Sebagai penutup, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa jenis kemasan dan kondisi penyimpanan sangat berpengaruh terhadap stabilitas dan umur simpan bubuk pala. Untuk penelitian selanjutnya disarankan supaya dilakukan pengujian pada suhu dan kelembaban relatif dengan kemasan secara langsung dan pengamatan jangka panjang terhadap perubahan mutu fisik, kimia dan mikrobiologi produk selama penyimpanan untuk memperoleh model prediksi umur simpan yang lebih komprehensif dan aplikatif dalam industri pangan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan penghargaan dan apresiasi yang setinggi-tingginya kepada berbagai pihak yang telah memberikan kontribusi signifikan terhadap keberhasilan penyelesaian penelitian dan publikasi ini. Ucapan terima kasih secara khusus ditujukan kepada Kementerian Pertanian melalui Badan Penyuluhan dan Pengembangan SDM Pertanian atas dukungan Beasiswa Tugas Belajar Program Magister, yang memungkinkan penulis melaksanakan dan menyelesaikan studi serta penelitian ini dengan baik. Selain itu, rasa terima kasih yang mendalam juga disampaikan kepada Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi melalui Direktorat Jenderal Riset dan Pengembangan atas pendanaan yang dialokasikan untuk Program Penelitian Tesis Mahasiswa Tahun Anggaran 2025, merupakan faktor penentu dalam pelaksanaan riset tesis.

DAFTAR PUSTAKA

- Aisyah, Y., Yunita, D., & Amanda, A. (2021). Antimicrobial activity of patchouli (*Pogostemon cablin* Benth) citronella (*Cymbopogon nardus*), and nutmeg (*Myristica fragrans*) essential oil and their mixtures against pathogenic and food spoilage microbes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 667(1), 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/667/1/012020>
- Aminullah, A., Hadiati, N., & Rohmayanti, T. (2022). Penggunaan kemasan plastik polietilen biodegradable terhadap umur simpan gula kelapa: The Use of Biodegradable Polyethylene Plastic on The Shelf Life of Palm Sugar. *Pro Food*, 8(2), 83–92.
- Arslan-Tontul, S. (2020). Moisture sorption isotherm, isosteric heat and adsorption surface area of whole chia seeds. *Lwt*, 119, 108859.
- Asiah, N., Cempaka, L., & David, W. (2018). *Pendugaan Umur Simpan Produk Pangan*. Universitas Bakrie Press.
- Badan Standardisasi Nasional. (2009). *SNI Batas maksimum kandungan mikotoksin dalam pangan 7385:2009*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2015). *SNI Pala 0006:2015*.
- 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.
- Caurie, M. (1970). A new model equation for predicting safe storage moisture levels for optimum stability of dehydrated foods. *International Journal of Food Science & Technology*, 5(3), 301–307.
- Chien, S. H., & Clayton, W. R. (1980). Application of Elovich equation to the kinetics of phosphate release and sorption in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(2), 265–268.

- Citanirmala, N. M. V., Rahayu, W. P., & Hariyadi, R. D. (2016). Implementation of Minister Agriculture Regulation Number 53, 2012 to Control Aflatoxin in Nutmeg. *Jurnal Mutu Pangan*, 3(1), 58. <https://journal.ipb.ac.id/index.php/jmpi/article/view/27576>
- Cui, Y., Yao, Y., Yang, R., Wang, Y., Liang, J., Ouyang, S., Yu, S., Zou, H., & Yan, Y. (2023). Detection of Mildewed Nutmeg Internal Quality during Storage Using an Electronic Nose Combined with Chemical Profile Analysis. *Molecules*, 28(16), 6051. <https://doi.org/10.3390/molecules28166051>
- Decagon Devices. (2011). *Application note fundamentals of moisture sorption isotherms*. www.aqualab.com
- Direktorat Jenderal Perkebunan. (2020). *Standar Operasional Prosedur - Penanganan Mutu Pala di Tingkat Ekspor (Rantai Pasok)*. Kementerian Pertanian.
- Direktorat Jenderal Perkebunan. (2023). *Statistik Perkebunan Jilid I 2022-2024*. Kementerian Pertanian.
- Dushkova, M., Dimov, M., Lazarov, L., Pencheva, M., Kostova, I., Damyanova, S., Menkov, N., Stoyanova, A., Ercisli, S., & Assouguem, A. (2023). Physical, chemical, sorption and microbiological characteristics of fennel fruits. *Heliyon*, 9(9).
- Faridah, D. N., Yasni, S., Suswantinah, A., & Aryani, G. W. (2013a). Pendugaan umur simpan dengan metode accelerated shelf-life testing pada produk bandrek instan dan sirup buah pala (*Myristica fragrans*). *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 18(3), 144–153.
- Faridah, D. N., Yasni, S., Suswantinah, A., & Aryani, G. W. (2013b). Pendugaan Umur Simpan Dengan Metode Accelerated Shelf-Life Testing pada Produk Bandrek Instan dan Sirup Buah Pala (*Myristica fragrans*) (Shelf Life Estimation by Accelerated Shelf-Testing Method for the Product of Instant Bandrek and Nutmeg Syrup (*Myristic*). *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia (JIPI)*, Desember, 18(3), 144–153.
- GA, C.-E., Gutiérrez-Guzmán, N., Váquiro-Herrera, H. A., Bon, J., & García-Pérez, J. V. (2022). Thermodynamic analysis and modeling of water vapor adsorption isotherms of roasted specialty coffee (Coffee arabica L. cv. Colombia). *LWT*, 160, 113335.
- GA, C.-E., N, G.-G., HA, V.-H., & CM, A.-C. (2020). Water dynamics adsorption properties of dried and roasted cocoa beans (*Theobroma cacao* L.). *International Journal of Food Properties*, 23(1), 434–444.
- Garcia, D., Ramos, A. J., Sanchis, V., & Marin, S. (2011). Modelling the effect of temperature and water activity in the growth boundaries of *Aspergillus ochraceus* and *Aspergillus parasiticus*. *Food Microbiology*, 28(3), 406–417.
- Gougouli, M., & Koutsoumanis, K. P. (2010). Modelling growth of *Penicillium expansum* and *Aspergillus niger* at constant and fluctuating temperature conditions. *International Journal of Food Microbiology*, 140(2–3), 254–262.
- Hafif, B. (2021). The Strategy to Maintain Indonesia as a Main Nutmeg Producer in the World. *Jurnal Penelitian Dan Pengembangan Pertanian*, 40(1), 58. <https://repository.pertanian.go.id/server/api/core/bitstreams/a4ef689d-5ad0-4453-ba27-2b9a6e3927cf/content>
- Halsey, G. (1948). Physical adsorption on non-uniform surfaces. *The Journal of Chemical Physics*, 16(10), 931–937.
- Hardiyanti, M., & Andraini, L. (2022). Hubungan antara suhu dan kelembaban. *Jurnal Portal Data*, 2(10), 1–11.
- Hasbullah, R., & Mahdania, N. F. I. (2023). Shelf life prediction of cacao powder using isothermic sorption approach. *JTEP Jurnal Keteknik Pertanian*, 11(3), 294. <https://doi.org/10.19028/jtep.011.3.294-306>
- Henderson, S. M. (1952). *A basic concept of equilibrium moisture*.
- Johnrencius, M., Herawati, N., & Johan, V. S. (2017). *Pengaruh penggunaan kemasan terhadap mutu kukis sukun*. Riau University.
- Kementerian Kesehatan. (2020). *Pharmacopoeias and formularies VI*. <https://doi.org/10.1136/bmj.2.5096.601>
- Kurniawan, Y. R., Pakpahan, N., Purwanto, Y. A., Purwanti, N., & Budijanto, S. (2021). Stabilitas Beras Analog Berdasarkan Pola Kadar Air Kesetimbangan. *Jurnal Pangan*, 30(2), 87. <https://doi.org/10.33964/jp.v30i2.522>
- Labuza, T. P. (1982). Shelf-life dating of foods. In *Food & Nutrition Press, Inc. Food & Nutrition Press, Inc.*
- Lucas Aguirre, J. C., Giraldo Giraldo, G. A., & Cortés Rodríguez, M. (2021). Modeling of moisture sorption isotherm and evaluation of net isosteric heat for spray-dried fortified coconut (*Cocos nucifera* L.) powder. *British Food Journal*, 123(7), 2349–2364.
- Mallek-Ayadi, S., Bahloul, N., & Kechaou, N. (2020). Mathematical modelling of water sorption isotherms and thermodynamic properties of *Cucumis melo* L. seeds. *Lwt*, 131, 109727.
- Menkov, N. D., & Durakova, A. G. (2007). Moisture sorption isotherms of sesame flour at several temperatures. *Food Technology and Biotechnology*, 45(1), 96–100.
- Mosquera, L. H., Moraga, G., & Martínez-Navarrete, N. (2012). Critical water activity and critical water content of freeze-dried strawberry powder as affected by maltodextrin and arabic gum. *Food Research International*, 47(2), 201–206.
- Nurjanah, S., Putri, I. L., & Sugiarti, D. P. (2017). Antibacterial Activity of Nutmeg Oil. *KnE Life Sciences*, 2(6), 563. <https://doi.org/10.18502/kls.v2i6.1076>
- Oswin, C. R. (1946). The kinetics of package life. III. The isotherm. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 65(12), 419–421.
- Prasetya, H. A., Panjaitan, L., Susilo, B. H., Budiawan, S., Suherman, B., Handayani, N. D., Fauziaty, M. R., Salbiah, Dharmaputra, O. S., Herawati, D., Ambarwati, S., & Dikin, A. (2024). The effects of various storing temperatures in suppressing *Aspergillus flavus* and mycotoxin contaminations in hermetically packed dried nutmeg (*Myristica fragrans* Houtt) seed. *Journal of Stored Products Research*, 109(5), 102403. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2024.102403>
- Sahin, S., & Sumnu, S. G. (2006). *Physical properties of foods*. Springer Science & Business Media.
- Sahu, C., & Patel, S. (2020). Moisture sorption characteristics and quality changes during storage in defatted soy incorporated maize-millet based extruded product. *Lwt*, 133, 110153.
- Sánchez-Torres, E. A., Abril, B., Benedito, J., Bon, J., & García-Pérez, J. V. (2021). *Water desorption isotherms of pork liver and thermodynamic properties*, *LWT* 149 (2021), 111857.
- Sekretariat Jenderal. (2022). *Outlook Komoditas Perkebunan Pala*. Kementerian Pertanian.
- Silva, K. S., Polachini, T. C., Luna-Flores, M., Luna-Solano, G., Resende, O., & Telis-Romero, J. (2021). Sorption isotherms and thermodynamic properties of wheat malt under storage conditions. *Journal of Food Process Engineering*, 44(9), e13784.

- Van den Berg, C., & Bruin, S. (1981). Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects. *Water Activity: Influences on Food Quality*, 1–61.
- Vasileva, A., Durakova, A., Kalaydzhiev, H., Dimitrova-Dicheva, M., Goranova, Z., Vasilev, V., & Temelkova, M. (2024). Nectarine powder of Bulgarian origin: Physicochemical composition, antioxidant activity, microbiological and sorption characteristics. *Heliyon*, 10(1).
- Zhang, Z., Li, X., Jia, H., & Liu, Y. (2022). Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of tiger nuts: An oil-rich tuber. *Lwt*, 167, 113866.
- Zhu, G., Jin, Q., Liu, Y., Lin, Y., Wang, J., & Li, X. (2021). Moisture sorption and thermodynamic properties of *Camellia oleifera* seeds as influenced by oil content. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(1), 251–258.