

Sorpsi Isotermik Daun Krokot (*Portulaca oleracea* L.) dan Pendugaan Umur Simpan dengan Metode Accelerated Shelf Life Test (ASLT) Model Arrhenius

*(Isothermal Sorption of Purslane (*Portulaca oleracea* L.) Leaves and Shelf Life Estimation using Accelerated Shelf Life Testing (ASLT) with the Arrhenius Model)*

Kavadya Syska^{1*}, Ika Nur Arifah²⁾, Ropiudin³⁾, Akmal Auladi Najib²⁾, Risfa Aulia²⁾, Syella Aditya Ayuningtyas²⁾, Kholifatun Istiqomah²⁾, Restu Aji Saripwijaya Pranoto²⁾, Ahmad Luqman Hakim²⁾

¹⁾Fakultas Teknologi Industri, Universitas Nahdlatul Ulama Al Ghazali Cilacap

²⁾Laboratorium "Food Energy Water and Waste Nexus", Teknologia Publisher

³⁾Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman

^{*}) email korespondensi: syska.kavadya@gmail.com

ABSTRACT

*Purslane (*Portulaca oleracea* L.), commonly known as purslane, is a medicinal plant traditionally utilized by Indonesian communities and holds significant potential for development as an herbal tea product. The leaves contain key bioactive compounds such as flavonoids, antioxidants, and tannins, which contribute to their pharmacological properties. One of the scientific approaches to evaluate the stability and shelf life of products derived from purslane leaves is through water sorption isotherm analysis (ISA), which represents the relationship between equilibrium moisture content and water activity (a_w) at a constant temperature. Understanding the sorption isotherm characteristics of a product is critical for selecting appropriate packaging materials and designing optimal storage conditions to extend shelf life. In this study, the water sorption behavior of dried purslane tea was modeled using the Guggenheim–Anderson–de Boer (GAB) model. The isotherms were generated using saturated salt solutions to obtain a range of water activity values from 0.05 to 0.90 at a constant temperature of 30°C. For shelf life estimation, dried purslane tea samples were packed in three different packaging materials: aluminum foil, high-density polyethylene (HDPE), and polypropylene (PP), and stored under two controlled temperature conditions, 10°C and 30°C, for 28 days. Quality changes, particularly in moisture content, were monitored at weekly intervals. The results showed that equilibrium moisture content increased with increasing water activity, consistent with the typical behavior of hygroscopic materials. The GAB model adequately described the water sorption isotherm pattern of purslane tea. Shelf life estimations based on 4-week storage data indicated that at 10°C, aluminum foil packaging provided the most effective barrier against moisture uptake compared to HDPE and PP, although specific shelf life values were not reported at this temperature. In contrast, at 30°C, PP-packaged samples exhibited the longest predicted shelf life of 528 days, followed by HDPE at 310 days. Shelf life projections obtained using the Accelerated Shelf Life Testing (ASLT) method with the Arrhenius model suggest that aluminum foil packaging generally offers superior protection and shelf life extension compared to HDPE and PP.*

Keywords: *Portulaca oleracea*, Sorption isotherm, Shelf life estimation, Gab model, Accelerated shelf life testing (ASLT)

PENDAHULUAN

Tanaman krokot (*Portulaca oleracea* L.) merupakan salah satu spesies tumbuhan liar yang tumbuh secara alami di berbagai wilayah tropis dan subtropis, termasuk di Indonesia

(Srivastava *et al.*, 2023). Meskipun kerap dianggap sebagai gulma karena kemampuan adaptasinya yang tinggi dan pertumbuhannya yang cepat, krokot telah lama dikenal dalam pengobatan tradisional karena kandungan

senyawa bioaktifnya yang melimpah (Kumar *et al.*, 2022). Dalam beberapa dekade terakhir, perhatian terhadap pemanfaatan tanaman ini sebagai bahan pangan dan minuman fungsional meningkat, seiring dengan tren global menuju konsumsi produk alami dan berbasis herbal (Gopi & Balakrishnan, 2022).

Daun krokot mengandung berbagai senyawa bioaktif seperti flavonoid, senyawa fenolik, omega-3, tanin, serta asam askorbat (Uddin *et al.*, 2022). Kandungan-kandungan ini diketahui memiliki aktivitas farmakologis yang luas, termasuk sebagai antioksidan, antiinflamasi, dan antidiabetik. Potensi farmakologis inilah yang menjadikan daun krokot sebagai kandidat utama dalam pengembangan produk teh herbal yang tidak hanya menyegarkan, tetapi juga memberikan manfaat kesehatan yang signifikan (Li *et al.*, 2024). Oleh karena itu, penting untuk mengkaji karakteristik penyimpanan dan stabilitas mutu produk teh krokot sebagai bagian dari upaya hilirisasi produk herbal fungsional.

Stabilitas mutu produk teh daun krokot selama penyimpanan sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, di antaranya kadar air, suhu, dan jenis kemasan (Aljumayi, 2025). Perubahan kadar air dapat memengaruhi berbagai aspek mutu, seperti aktivitas enzimatis, reaktivitas kimia, serta kestabilan senyawa bioaktif (Ayuningtyas *et al.*, 2024). Produk kering seperti teh herbal bersifat higroskopis, sehingga cenderung menyerap atau melepaskan uap air dari dan ke lingkungan sekitarnya hingga mencapai kadar air kesetimbangan (Syska & Ropiudin, 2023). Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam mengenai dinamika kelembaban dalam produk menjadi aspek penting dalam penentuan strategi penyimpanan yang optimal.

Salah satu pendekatan yang digunakan untuk mempelajari hubungan antara kadar air produk dan kelembaban relatif lingkungan adalah analisis isoterm sorpsi air (Isothermal Sorption Analysis/ISA) (Syska *et al.*, 2023). Kurva isoterm sorpsi menggambarkan hubungan antara kadar air kesetimbangan dan aktivitas air (a_w) pada suhu konstan (Eva *et al.*, 2023). Melalui pemodelan ISA, produsen dapat memperoleh informasi mengenai sifat

higroskopis produk, sehingga dapat memprediksi stabilitas selama penyimpanan dan memilih jenis kemasan yang paling sesuai untuk menjaga mutu.

Model Guggenheim–Anderson–de Boer (GAB) merupakan salah satu model matematis yang paling umum digunakan untuk mendeskripsikan kurva sorpsi isotermik bahan pangan kering (Roos, 2024). Model ini terdiri dari tiga parameter utama, yaitu kadar air monolayer (M_0), konstanta Guggenheim (C), dan konstanta multilayer (K), yang secara teoritis menggambarkan keterikatan air pada matriks bahan melalui tiga tahap: penyerapan air pada permukaan (monolayer), penambahan lapisan air (multilayer), dan penyerapan air bebas. Model GAB memiliki akurasi tinggi dalam menjelaskan perilaku sorpsi berbagai bahan kering dan telah banyak diterapkan pada produk-produk herbal dan pangan (Peleg, 2020).

Dalam penyimpanan produk, selain data ISA, informasi mengenai estimasi umur simpan sangat penting untuk menjamin kualitas produk selama distribusi dan konsumsi. Salah satu metode yang efisien untuk mempercepat evaluasi umur simpan adalah Accelerated Shelf Life Testing (ASLT) (Syska *et al.*, 2023). Metode ini dilakukan dengan menyimpan produk pada suhu tinggi (di atas suhu penyimpanan normal) untuk mempercepat reaksi-reaksi yang menyebabkan penurunan mutu. Data yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan model kinetika Arrhenius untuk memprediksi laju kerusakan pada berbagai suhu (Zahroh *et al.*, 2023).

Model Arrhenius memungkinkan estimasi umur simpan melalui perhitungan konstanta laju reaksi (k) dan energi aktivasi (E_a), berdasarkan hubungan eksponensial antara suhu dan laju perubahan mutu. Dengan pendekatan ini, produsen dapat memprediksi umur simpan produk pada suhu penyimpanan normal berdasarkan hasil pengamatan dalam waktu yang relatif singkat, sehingga efisien dari segi waktu dan biaya. Model ini banyak digunakan dalam industri pangan, termasuk pada produk kering seperti teh herbal (Hakim *et al.*, 2024).

Jenis kemasan merupakan faktor kritikal lain yang menentukan keberhasilan penyimpanan produk herbal (Syska, K., & Ropiudin, 2020). Aluminium foil dikenal sebagai material pengemas yang memiliki sifat barrier sangat baik terhadap cahaya, oksigen, dan uap air. Sebaliknya, plastik HDPE (High Density Polyethylene) dan PP (Polypropylene) memiliki permeabilitas uap air yang lebih tinggi, yang berpotensi meningkatkan kadar air produk dan mempercepat degradasi mutu (Ge *et al.*, 2021). Oleh karena itu, pemilihan jenis kemasan harus disesuaikan dengan sifat higroskopis produk dan kondisi penyimpanan yang direncanakan.

Penggabungan antara analisis isoterm sorpsi dan estimasi umur simpan berbasis model Arrhenius menjadi strategi terpadu yang sangat bermanfaat untuk menjamin stabilitas dan kualitas produk teh krokot (Barroso *et al.*, 2024). Melalui pendekatan ini, produsen dapat merancang sistem penyimpanan yang tepat, memilih kemasan optimal, serta menetapkan tanggal kedaluwarsa produk secara ilmiah. Hal ini tidak hanya meningkatkan daya saing produk di pasar, tetapi juga memberikan jaminan mutu dan keamanan bagi konsumen.

Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengeksplorasi dan mengkaraktirasi sifat higroskopis serta stabilitas penyimpanan teh herbal berbahan dasar daun krokot (*Portulaca oleracea* L.). Secara spesifik, penelitian ini bertujuan untuk (1) mengidentifikasi karakteristik sorpsi isotermik teh daun krokot pada berbagai kondisi aktivitas air dan suhu, (2) menentukan model matematis isoterm sorpsi yang paling sesuai dalam merepresentasikan hubungan antara kadar air kesetimbangan dan aktivitas air produk, serta (3) memperkirakan umur simpan teh daun krokot melalui pendekatan Accelerated Shelf Life Testing (ASLT) berbasis model kinetika Arrhenius.

METODOLOGI PENELITIAN

Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan bahan utama berupa daun krokot (*Portulaca oleracea* L.) yang diperoleh dari wilayah sekitar

Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah. Daun krokot dipilih dalam kondisi segar, sehat, dan tidak layu. Bahan lain yang digunakan untuk proses pengolahan dan analisis meliputi larutan DPPH (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl), etanol p.a., dan aquades. Untuk keperluan pengujian isoterm sorpsi air, digunakan larutan garam jenuh (LiCl, MgCl₂, NaBr, NaCl, KCl, dan K₂SO₄) sebagai media pengontrol aktivitas air (aw).

Kemasan yang digunakan dalam penelitian terdiri dari tiga jenis, yaitu: (1) Aluminium foil (Al-foil): memiliki sifat penghalang tinggi terhadap cahaya, uap air, dan oksigen. (2) Plastik High-Density Polyethylene (HDPE): bersifat semi-barrier dengan permeabilitas terhadap kelembaban sedang. (3) Plastik Polypropylene (PP): transparan, dengan permeabilitas uap air relatif lebih tinggi dibanding Al-foil dan HDPE.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi oven untuk proses pengeringan, desikator, timbangan digital dengan ketelitian 0,001 g, inkubator, cawan porselen, pH meter digital, spektrofotometer UV-Vis, alat vortex, pipet mikro, alat ukur kadar air (gravimetri), serta instrumen pendukung laboratorium lainnya.

Prosedur Pembuatan Teh Krokot

Daun krokot segar dicuci bersih, ditiriskan, kemudian dilakukan proses pengeringan menggunakan oven dengan suhu 45°C selama 24 jam hingga kadar air mencapai <10%. Setelah pengeringan, daun dikeringkan kembali pada suhu ruang selama 1 jam untuk mendinginkan, lalu digerus hingga menjadi serpihan teh kering. Sampel disimpan dalam wadah kedap udara sebelum dilakukan perlakuan lebih lanjut.

Pengujian Isoterm Sorpsi Air (ISA)

Pengujian ISA dilakukan berdasarkan metode gravimetri menggunakan berbagai larutan garam jenuh untuk menghasilkan rentang aktivitas air (aw) antara 0,05–0,90 pada suhu konstan 30°C (Hebbbar *et al.*, 2021). Sampel teh krokot (sekitar 1 g) dimasukkan ke dalam wadah kecil yang diletakkan dalam desikator berisi larutan garam jenuh. Setiap sampel diuji secara duplo. Desikator disimpan

dalam inkubator selama 4 minggu hingga berat sampel mencapai kesetimbangan (konstan dalam 3 kali pengukuran berturut-turut). Setelah itu, kadar air kesetimbangan ditentukan menggunakan metode oven pada suhu 105°C selama 4 jam. Hasil ISA kemudian dimodelkan menggunakan persamaan GAB (Guggenheim–Anderson–de Boer) (Sanz-Santos *et al.*, 2022). Model GAB yang digunakan:

$$M = \frac{M_0 C K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)} \quad (1)$$

dimana:

- M: kadar air kesetimbangan (g air/g padatan kering)
- M₀: kadar air monolayer
- C: konstanta Guggenheim
- K: konstanta multilayer
- a_w : aktivitas air

Parameter model GAB dianalisis menggunakan regresi non-linear dan validitas model dievaluasi menggunakan nilai koefisien determinasi (R²) dan RMSE.

Uji Accelerated Shelf Life Test (ASLT)

Teh kroket kering dikemas masing-masing dalam kemasan aluminium foil, HDPE, dan PP, kemudian disimpan pada dua suhu percepatan yaitu 10°C dan 30°C selama 4 minggu. Setiap kemasan berisi ±10 g produk dan disegel rapat. Pengamatan dilakukan setiap 7 hari terhadap parameter kadar air, pH, dan aktivitas antioksidan.

a. Kadar Air

Kadar air ditentukan menggunakan metode oven gravimetri pada suhu 105°C selama 4 jam hingga berat konstan Syska & Ropiudin, 2020).

b. pH

Pengukuran pH dilakukan dengan cara menyeduh 1 g sampel teh dalam 100 mL aquades panas (±90°C), kemudian disaring dan diukur nilai pH-nya menggunakan pH meter digital (Maharani *et al.*, 2021).

c. Aktivitas Antioksidan

Aktivitas antioksidan dianalisis menggunakan metode DPPH. Sampel larutan teh (0,5 mL) direaksikan dengan 3 mL larutan DPPH 0,1 mM dalam etanol, diinkubasi selama 30 menit dalam ruang gelap, lalu

absorbansinya diukur pada 517 nm menggunakan spektrofotometer UV-Vis (Bakırcı *et al.*, 2025). Persentase inhibisi dihitung dengan rumus:

$$\% \text{Inhibisi} = \left(\frac{A_{\text{kontrol}} - A_{\text{sampel}}}{A_{\text{kontrol}}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Analisis Umur Simpan

Estimasi umur simpan dilakukan dengan pendekatan Accelerated Shelf Life Test (ASLT) berbasis model Arrhenius (Syska *et al.*, 2023). Parameter mutu (antioksidan) diasumsikan menurun mengikuti reaksi orde pertama:

$$\frac{dA}{dt} = -kA \quad (3)$$

dengan solusi:

$$\ln A = \ln A_0 - kt \quad (4)$$

Laju reaksi (k) dihitung pada masing-masing suhu, kemudian diplot ke dalam persamaan Arrhenius:

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (5)$$

di mana:

- k: konstanta laju reaksi
- E_a: energi aktivasi (J/mol)
- R: konstanta gas universal (8,314 J/mol·K)
- T: suhu mutlak (K)

Dari persamaan tersebut, diperoleh prediksi waktu simpannya (shelf life) pada suhu penyimpanan normal (25°C) berdasarkan nilai kritis aktivitas antioksidan yang ditentukan sebagai batas mutu minimum.

Analisis Data

Data hasil pengamatan dianalisis secara statistik menggunakan analisis varians (ANOVA) dengan taraf signifikansi 5%. Jika ditemukan perbedaan yang signifikan antar perlakuan, maka dilanjutkan dengan uji Beda Nyata Jujur (BNJ) untuk mengetahui perbedaan antar kelompok perlakuan secara spesifik (Dos Santos *et al.*, 2022).

Guna memperkirakan umur simpan, digunakan model kinetika reaksi berdasarkan pendekatan Arrhenius. Data mutu yang menunjukkan perubahan signifikan (seperti penurunan aktivitas antioksidan atau peningkatan kadar air) dikonversi ke dalam

bentuk laju reaksi sesuai dengan ordo reaksi (orde nol atau orde satu). Konstanta laju reaksi (k) dari setiap suhu kemudian digunakan untuk menghitung energi aktivasi (E_a) dan faktor frekuensi (A), yang kemudian digunakan dalam Persamaan Arrhenius untuk memprediksi umur simpan produk pada kondisi suhu penyimpanan normal (Tarchoun *et al.*, 2025).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kadar Air Kesetimbangan dan Kurva Sorpsi Isotermik

Kondisi kesetimbangan suatu produk dicapai ketika laju pelepasan uap air dari bahan sebanding dengan laju penyerapan uap air dari lingkungan, sehingga tidak terjadi perubahan massa produk secara signifikan. Pada tahap ini, proses desorpsi (pelepasan air) dan adsorpsi (penyerapan air) berlangsung secara dinamis hingga mencapai titik kesetimbangan dengan kelembaban relatif (RH) lingkungan. Kesetimbangan ini secara empiris ditandai oleh stabilnya hasil penimbangan selama beberapa hari berturut-turut. Lama waktu yang diperlukan untuk mencapai kadar air kesetimbangan bervariasi tergantung pada nilai RH masing-masing, dengan rentang waktu yang diamati berkisar antara 4 hingga 29 hari. Karakteristik penyerapan maupun pelepasan uap air dari teh daun krokot dianalisis melalui kurva isoterm sorpsi air yang diperoleh dengan menempatkan sampel pada kondisi lingkungan dengan berbagai tingkat aktivitas air (a_w), yang dihasilkan dari penggunaan larutan garam jenuh. Proses pengondisian dilakukan pada dua suhu berbeda, yaitu 10°C dan 30°C , untuk mengevaluasi pengaruh suhu terhadap dinamika kelembaban produk. Nilai-nilai aktivitas air yang dikendalikan oleh masing-masing jenis garam jenuh ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Aktivitas air (a_w) larutan garam jenuh pada suhu 10°C dan 30°C

Garam Jenuh	a_w
NaOH	0,07
MgCl ₂	0,32
KCl	0,84

Larutan garam jenuh seperti KCl, MgCl₂, dan NaOH digunakan sebagai agen pengatur kelembaban relatif (RH) di dalam sistem tertutup (desikator) guna menghasilkan rentang aktivitas air (a_w) yang luas, yaitu antara 0,05 hingga 0,90. Selama periode inkubasi, larutan garam jenuh berperan sebagai pengontrol tekanan uap air dalam ruang penyimpanan, sehingga memungkinkan terjadinya proses adsorpsi atau desorpsi uap air oleh sampel teh daun krokot. Proses ini berlangsung hingga tercapai kondisi kesetimbangan kelembaban antara bahan dan lingkungannya. Perbedaan gradien aktivitas air antara lingkungan dan sampel memicu terjadinya perpindahan molekul air, baik dari udara menuju bahan (adsorpsi) maupun sebaliknya (desorpsi). Pergerakan uap air tersebut berlangsung secara alami dari sistem dengan RH lebih tinggi ke RH lebih rendah, sampai keseimbangan termodinamik tercapai antara uap air di lingkungan dan kandungan air dalam bahan.

Kadar air kesetimbangan yang dicapai ketika suatu bahan melepaskan air yang terkandung di dalamnya dikenal sebagai kadar air kesetimbangan desorpsi, sedangkan kadar air kesetimbangan yang diperoleh saat bahan menyerap uap air dari udara sekitarnya disebut kadar air kesetimbangan adsorpsi (Fontana Jr. & Carter, 2020). Studi terhadap fenomena adsorpsi penting untuk mengamati respons higroskopis daun krokot terhadap uap air di lingkungannya hingga tercapai kondisi kesetimbangan kelembaban. Oleh karena itu, sebelum pengujian dilakukan, sampel daun krokot perlu dikondisikan pada kadar air awal rendah melalui proses pengeringan. Pengeringan dilakukan dengan menggunakan oven pada suhu 105°C selama 25 jam guna memastikan kelembaban awal yang minimal dan seragam pada semua sampel.

Desorpsi merupakan proses yang menggambarkan kemampuan bahan untuk melepaskan air yang terkandung di dalamnya ke udara sekitar hingga tercapai kondisi kesetimbangan kelembaban. Dalam konteks penelitian ini, evaluasi terhadap perilaku desorpsi daun krokot dilakukan untuk memahami dinamika pelepasan uap air selama penyimpanan. Waktu yang dibutuhkan untuk

mencapai kadar air kesetimbangan dalam pengujian isotermis sorpsi adalah selama 7 hari. Nilai kadar air kesetimbangan (dalam % basis kering) baik untuk proses adsorpsi maupun desorpsi pada suhu 30°C disajikan secara rinci pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Kadar air keseimbangan adsorpsi

Garam Jenuh	a_w	Ka (bk)
NaOH	0,07	0,69
MgCl ₂	0,32	0,63
KCl	0,84	0,75

Merujuk pada Tabel 2, kadar air kesetimbangan terendah untuk sampel pada proses adsorpsi tercatat sebesar 0,63% (basis kering) pada aktivitas air (a_w) 0,32, sementara nilai tertinggi mencapai 0,75% (basis kering) pada a_w 0,84. Data yang disajikan dalam Tabel 3 menunjukkan adanya tren peningkatan kadar air kesetimbangan seiring dengan meningkatnya nilai aktivitas air garam jenuh pada suhu penyimpanan 30°C. Hal ini mengindikasikan bahwa kemampuan daun krokot dalam menyerap uap air meningkat secara linier terhadap kenaikan a_w .

Tabel 3. Kadar air keseimbangan desorpsi

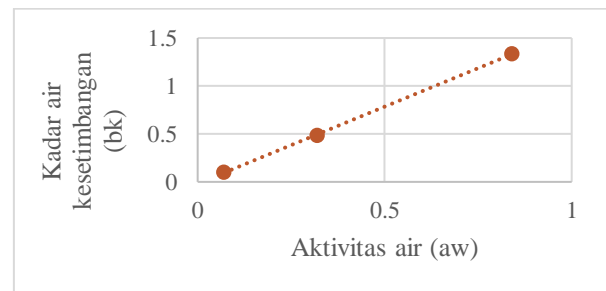
Garam Jenuh	a_w	Ka (bk%)
NaOH	0,07	0,09
MgCl ₂	0,32	1,03
KCl	0,84	1,05

Berdasarkan data pada Tabel 3, kadar air kesetimbangan terendah untuk sampel pada proses desorpsi tercatat sebesar 0,09% (basis kering) pada aktivitas air (a_w) 0,07, sedangkan kadar air kesetimbangan tertinggi mencapai 1,05% (basis kering) pada a_w 0,84. Pola peningkatan kadar air kesetimbangan ini menunjukkan tren serupa dengan proses adsorpsi, di mana kenaikan nilai a_w sejalan dengan peningkatan kadar air kesetimbangan. Hal ini dapat dijelaskan oleh fakta bahwa aktivitas air yang lebih tinggi menghasilkan kelembaban relatif lingkungan yang lebih besar di dalam sistem penyimpanan, sehingga laju pelepasan air dari bahan menjadi lebih lambat dan kadar air yang tersisa lebih tinggi saat tercapai keseimbangan (Tapia et al., 2020).

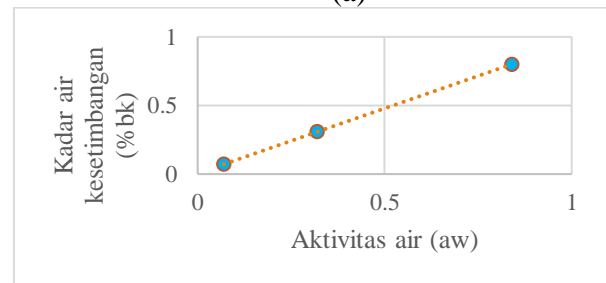
Karakteristik kurva sorpsi isotermis suatu bahan pangan sangat dipengaruhi oleh tingkat higroskopisitasnya, yang secara umum diklasifikasikan ke dalam tiga kategori utama, yaitu sangat higroskopis, sedang, dan rendah (Aviara, 2020). Profil kurva ini merepresentasikan kompleksitas perilaku higroskopis bahan, yang tidak hanya ditentukan oleh sifat fisik dan kimia internal masing-masing komponen penyusun, tetapi juga oleh pengaruh perlakuan awal seperti pemanasan atau proses pengolahan lainnya yang dapat memodifikasi struktur dan interaksi molekuler bahan tersebut.

Pemodelan Kurva Sorpsi Isotermis Teh Krokot

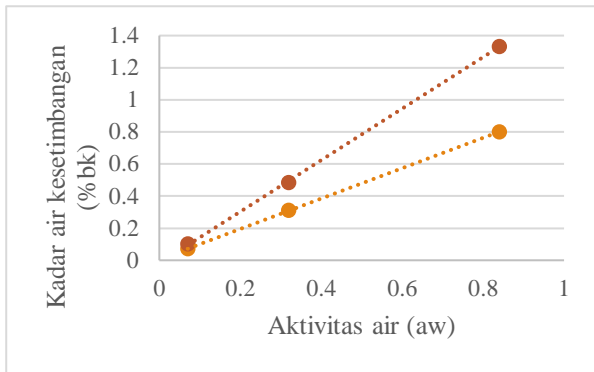
Kurva sorpsi isotermis diperoleh dengan memetakan hubungan antara kadar air kesetimbangan hasil pengujian terhadap nilai aktivitas air (a_w), kemudian dianalisis menggunakan pendekatan model matematis isotermis. Dalam penelitian ini, karakteristik sorpsi air pada teh daun krokot dianalisis menggunakan model Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB), yang selanjutnya digunakan untuk menghasilkan persamaan kurva sorpsi sebagaimana ditampilkan pada Gambar 1.



(a)



(b)



(c)

Gambar 1. Kurva Sorpsi Isotermis Teh Krokot (a) Adsorpsi (b) Desorpsi (c) Adsorpsi dan Desorpsi pada suhu 30°C

Merujuk pada Gambar 1, terlihat bahwa pada suhu penyimpanan yang konstan, kadar air kesetimbangan meningkat seiring dengan naiknya nilai aktivitas air (aw), baik pada kondisi adsorpsi maupun desorpsi. Pola ini mencerminkan karakteristik produk yang bersifat higroskopis rendah, yaitu hanya mampu menyerap atau mempertahankan sedikit air pada aw rendah, namun memiliki kemampuan menyimpan air yang lebih besar ketika berada pada aw tinggi.

Model Isotermis Sorpsi Air (ISA) dalam penelitian ini dianalisis menggunakan pendekatan Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB). Model ini melibatkan dua parameter penting, yakni konstanta C dan K, yang masing-masing merepresentasikan kekuatan ikatan air monolayer dan karakteristik multilayer dalam bahan. Hasil estimasi parameter model menunjukkan bahwa nilai konstanta C dan K untuk sampel pada kondisi adsorpsi adalah 0,96 dan 1,03, sedangkan untuk sampel pada kondisi desorpsi masing-masing diperoleh nilai sebesar 1,07 dan 0,20. Rincian nilai konstanta tersebut disajikan pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4. Nilai konstanta dan statistica error perlakuan desorpsi pada teh krokot

Model	Koefisien		Xm	R ²	RMSE	MRD
	C	K				
GAB	1,07	0,20	2,5	0,2	0,2	2,99

Tabel 5. Nilai konstanta dan statistica error perlakuan adsorpsi pada teh krokot

Model	Koefisien	Xm	R ²	RMSE	MRD
-------	-----------	----	----------------	------	-----

	C	K				
GAB	0,96	1,03	2,3	0,2	0,2	2,33

Guna mengevaluasi kesesuaian model GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) dalam merepresentasikan perilaku sorpsi isotermis teh krokot pada perlakuan adsorpsi dan desorpsi, dilakukan analisis statistik terhadap hasil pemodelan. Penilaian akurasi model dilakukan melalui beberapa parameter evaluatif, yaitu koefisien determinasi (R²), Root Mean Square Error (RMSE), dan Mean Relative Deviation (MRD). Model dianggap sangat representatif apabila nilai MRD < 5, cukup representatif pada kisaran 5 < MRD < 10, dan tidak layak digunakan apabila MRD > 10.

Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai R² untuk proses adsorpsi dan desorpsi masing-masing sebesar 0,2. Sementara itu, nilai RMSE pada kedua perlakuan diperoleh sebesar 0,2. Nilai MRD yang dihasilkan adalah 2,99 untuk adsorpsi dan 2,33 untuk desorpsi. Berdasarkan nilai MRD yang masih berada di bawah ambang 5, dapat disimpulkan bahwa model GAB mampu menggambarkan perilaku sorpsi isotermis teh krokot secara cukup akurat baik pada fase adsorpsi maupun desorpsi.

Umur Simpan

Peningkatan kadar air bahan selama penyimpanan umumnya disebabkan oleh proses penyerapan uap air dari lingkungan hingga tercapainya kondisi kesetimbangan kelembaban (Zhang et al., 2023). Dalam penelitian ini, perubahan bobot teh krokot diamati selama penyimpanan pada dua kondisi suhu, yaitu 10°C dan 30°C, menggunakan tiga jenis material kemasan: aluminium foil, HDPE (High Density Polyethylene), dan PP (Polypropylene).

Pada penyimpanan dengan kemasan aluminium foil, terjadi penurunan bobot teh krokot pada suhu 10°C, masing-masing sebesar 0,02 g (minggu ke-1), 0,10 g (minggu ke-2), 0,02 g (minggu ke-3), dan 0,03 g (minggu ke-4). Penurunan berat juga terjadi pada suhu 30°C, yaitu sebesar 0,04 g, 0,02 g, 0,02 g, dan 0,01 g secara berturut-turut dari minggu pertama hingga keempat.

Sebaliknya, penggunaan kemasan HDPE menunjukkan tren peningkatan bobot selama

penyimpanan. Pada suhu 10°C, bobot meningkat sebesar 0,04 g (minggu ke-1), 0,03 g (minggu ke-2), 0,03 g (minggu ke-3), dan 0,02 g (minggu ke-4). Peningkatan yang lebih signifikan terjadi pada suhu 30°C, yakni sebesar 0,14 g, 0,20 g, 0,02 g, dan 0,02 g dari minggu pertama hingga keempat.

Untuk kemasan berbahan PP, pada suhu 10°C terjadi fluktuasi penurunan bobot sebesar 0,01 g (minggu ke-1), 0,03 g (minggu ke-2), 0,03 g (minggu ke-3), dan 0,20 g (minggu ke-4). Namun pada suhu 30°C, tercatat adanya peningkatan bobot secara bertahap, masing-masing sebesar 0,04 g, 0,02 g, 0,01 g, dan 0,01 g setiap minggu.

Variasi perubahan bobot tersebut mengindikasikan adanya perbedaan kemampuan penghalang uap air (water vapor barrier) dari masing-masing jenis kemasan terhadap interaksi kelembaban lingkungan, yang turut dipengaruhi oleh suhu penyimpanan.

Tabel 6. Hasil analisa rata-rata bobot (g) selama penyimpanan suhu 10°C pada kemasan Alumunium foil, HDPE, PP

Hari	Alumunium foil	HDPE	PP
7	1,98	2,03	1,99
14	1,97	2,06	1,95
21	1,95	2,11	1,97
28	1,93	2,12	1,99

Tabel 7. Hasil analisa rata-rata berat (gram) selama penyimpanan suhu 30°C pada kemasan Alumunium foil, HDPE, PP

Hari	Alumunium foil	HDPE	PP
7	1,97	2,12	2,03
14	1,93	2,14	2,07
21	1,89	2,18	2,08
28	1,85	2,19	2,08

Selama proses penyimpanan, teh daun krokot menunjukkan kecenderungan peningkatan massa, yang diindikasikan sebagai akibat dari penyerapan uap air dari lingkungan sekitarnya. Mekanisme ini berkontribusi terhadap penurunan mutu

produk secara keseluruhan. Infiltrasi uap air diduga terjadi akibat kurang optimalnya segel kemasan, khususnya pada kemasan berbahan HDPE dan PP, yang menyebabkan terbentuknya celah atau pori mikro selama proses penyegelan. Faktor suhu juga berperan signifikan, di mana peningkatan suhu penyimpanan berkorelasi positif terhadap peningkatan massa teh krokot, yang menandakan peningkatan laju serapan uap air (AlJuhaimi et al., 2023).

Pendugaan Umur Simpan Teh Krokot

Estimasi umur simpan dilakukan melalui pemodelan regresi linear antara variabel berat sampel dan waktu penyimpanan. Hubungan tersebut digunakan untuk memprediksi perubahan berat selama masa simpan pada berbagai kondisi suhu dan jenis kemasan. Nilai koefisien regresi linear yang menggambarkan hubungan antara massa teh krokot dan durasi penyimpanan pada suhu 10°C dan 30°C untuk masing-masing jenis kemasan disajikan dalam Tabel 8.

Tabel 8. Persamaan regresi linear bobot sampel krokot lama penyimpanan pada suhu 10°C

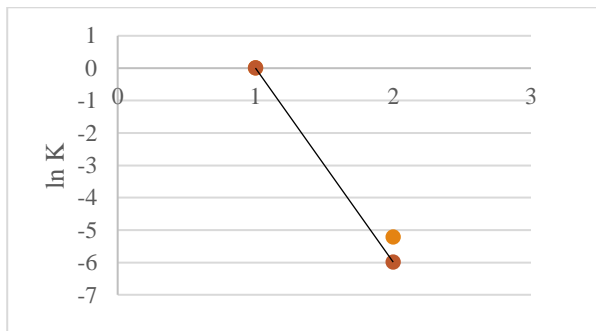
Kemasan	Persamaan regresi linear		R ²	
	Ordo 0	Ordo 1	Ordo 0	Ordo 1
Alumunium foil	0,0054	0,0013	0,9945	0,9812
	+	+		
	2,0053	0,6949		
HDPE	0,0021	0,0005	0,6964	0,6946
	+	+		
	1,9973	0,8009		
PP	1,0004	0,0029	0,0029	0,0028
	+	+		
	1,9887	0,6874		

Tabel 9. Nilai persamaan regresi linear berat sampel krokot lama penyimpanan pada suhu 30°C

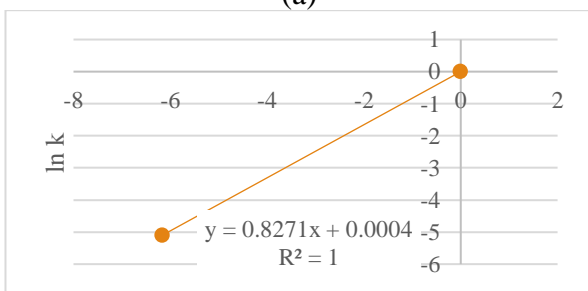
Kemasan	Persamaan regresi linear		R ²	
	Ordo 0	Ordo 1	Ordo 0	Ordo 1

Aluminium foil	0,0025	0,0028		
	+	+		
	2,0033	0,6962	0,9945	0,9812
	0,0061	0,0029		
HDPE	+	+		
	2,0387	0,7122	0,7912	0,7843
	0,0047	0,0023		
PP	+	+		
	2,0067	0,6966	0,9332	0,9324

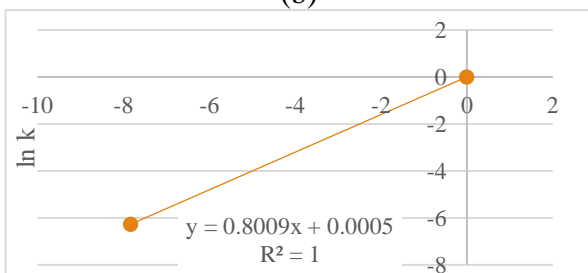
Dalam kajian kinetika reaksi pada produk pangan, reaksi umumnya mengikuti orde nol atau orde satu (Xia *et al.*, 2024). Penentuan orde reaksi dilakukan dengan membandingkan nilai koefisien determinasi (R^2) dari kedua model. Jika nilai R^2 lebih tinggi pada model orde satu, maka reaksi dianggap mengikuti orde satu, begitu pula sebaliknya. Selanjutnya, konstanta laju reaksi (k) yang diperoleh digunakan untuk memodelkan hubungan Arrhenius dengan memplot nilai $\ln k$ terhadap $1/T$ (dalam satuan Kelvin). Hubungan linier ini divisualisasikan dalam Gambar 2.



(a)



(b)



(c)

Gambar 2. Hubungan antara $\ln k$ dan hasil uji berat (g) teh krokot dengan kemasan Aluminium foil, HDPE, dan PP

Persamaan regresi linier dari hubungan antara $\ln k$ terhadap $1/T$ untuk perubahan massa teh daun krokot selama penyimpanan pada suhu 10°C dan 30°C menunjukkan hasil yang berbeda tergantung jenis kemasan. Pada kemasan aluminium foil, diperoleh persamaan regresi $\ln k = 5,9981(1/T) + 5,9948$ dengan koefisien determinasi $R^2 = 1$. Untuk kemasan HDPE, persamaan regresi adalah $\ln k = 0,0004 + 0,8271x$ dengan $R^2 = 1$, sedangkan pada kemasan PP diperoleh $\ln k = 0,8009 + 0,0005x$ dan $R^2 = 1$. Kemiringan (slope) dari masing-masing garis regresi tersebut mewakili nilai $-E_a/R$, di mana E_a adalah energi aktivasi dan R merupakan konstanta gas universal. Berdasarkan nilai slope, diperoleh energi aktivasi (E_a) masing-masing sebesar 5,9948 untuk kemasan aluminium foil, 0,8271 untuk HDPE, dan 0,0005 untuk PP.

Setelah diperoleh nilai konstanta laju reaksi (k), estimasi umur simpan teh daun krokot pada suhu penyimpanan 10°C (283 K) dan 30°C (303 K) dihitung dengan menggunakan pendekatan model Arrhenius. Estimasi umur simpan (t) dilakukan berdasarkan persamaan kinetika reaksi sesuai dengan ordo reaksinya. Dalam hal ini, parameter kadar air mengikuti kinetika reaksi orde satu, sehingga persamaan yang digunakan adalah: $\ln A_0 = \ln A_t + kt$, di mana A_0 merupakan nilai parameter awal sebelum penyimpanan, A_t adalah nilai parameter akhir setelah penyimpanan, dan t menunjukkan waktu simpan. Nilai k yang diperoleh dari regresi digunakan dalam perhitungan umur simpan, sebagaimana disajikan dalam Tabel 10.

Tabel 10. Hubungan antara suhu penyimpanan dan jenis kemasan (Aluminium foil, HDPE, dan PP) terhadap stabilitas teh daun krokot

Kemasan	Umur simpan (hari)	
	10°C	30°C
Aluminium foil	641 hari	640 hari
HDPE	123 hari	90 hari

PP	99 hari	99 hari
----	---------	---------

Berdasarkan data yang tersaji pada Tabel 10, estimasi umur simpan teh daun krokot selama periode penyimpanan 28 hari menunjukkan variasi yang signifikan bergantung pada jenis kemasan dan suhu penyimpanan. Pada kemasan aluminium foil, estimasi umur simpan mencapai 641 hari pada suhu 10°C dan sedikit menurun menjadi 640 hari pada suhu 30°C. Sementara itu, pada kemasan HDPE, umur simpan terhitung lebih singkat, yakni 123 hari pada suhu 10°C dan menurun menjadi 90 hari pada suhu 30°C. Untuk kemasan PP, umur simpan terhitung sebesar 99 hari baik pada suhu 10°C maupun 30°C.

Hasil ini menunjukkan bahwa kemasan aluminium foil memberikan perlindungan paling efektif terhadap peningkatan kadar air selama penyimpanan, dibandingkan dengan kemasan HDPE dan PP. Khususnya, kemasan HDPE menunjukkan kecenderungan peningkatan kadar air yang lebih tinggi, sehingga berdampak pada penurunan stabilitas dan umur simpan produk, baik pada suhu rendah maupun tinggi.

Salah satu faktor krusial yang memengaruhi stabilitas dan umur simpan suatu produk pangan adalah jenis kemasan yang digunakan, mengingat setiap bahan kemasan memiliki tingkat permeabilitas yang berbeda terhadap gas dan uap air (Qu et al., 2022). Kemasan aluminium foil diketahui memiliki karakteristik unggul, seperti ketahanan terhadap panas, kedap udara, serta permeabilitas yang sangat rendah terhadap uap air dan oksigen, serta sifat antikorosi yang baik. Keunggulan ini menjadikan aluminium foil lebih sesuai untuk produk pangan yang membutuhkan perlindungan tinggi terhadap kelembapan dan oksidasi, jika dibandingkan dengan kemasan berbahan HDPE maupun PP.

Berdasarkan hasil estimasi umur simpan teh daun krokot menggunakan metode Accelerated Shelf Life Testing (ASLT) dengan pendekatan model Arrhenius, dapat disimpulkan bahwa kemasan aluminium foil memberikan performa terbaik dalam mempertahankan kualitas produk, serta mampu memperpanjang masa simpannya

secara signifikan dibandingkan dengan kemasan HDPE dan PP.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa: (1) Model Guggenheim–Anderson–de Boer (GAB) menunjukkan tingkat akurasi yang memadai dalam merepresentasikan kurva sorpsi isotermik teh daun krokot, dengan nilai Mean Relative Deviation (MRD) sebesar 2,9 untuk proses adsorpsi dan 2,3 untuk desorpsi, keduanya berada di bawah ambang batas 10% yang secara statistik menunjukkan kecocokan model yang baik. (2) Estimasi umur simpan teh daun krokot yang dikemas menggunakan tiga jenis bahan kemasan berbeda menunjukkan variasi yang signifikan, di mana kemasan aluminium foil memberikan umur simpan terpanjang yaitu 641 hari, diikuti oleh kemasan HDPE (123 hari), dan kemasan PP (99 hari). (3) Hasil ini mengindikasikan bahwa kemasan aluminium foil paling efektif dalam mempertahankan kestabilan kadar air produk selama penyimpanan pada suhu 10°C dan 30°C selama 28 hari, karena kemampuannya yang superior dalam menghambat transmisi uap air dibandingkan dengan HDPE dan PP.

DAFTAR PUSTAKA

- AlJuhaimi, F., Mohamed Ahmed, I. A., Özcan, M. M., & Uslu, N. (2023). Effects of fermentation, boiling, and drying methods on bioactive properties, phenolic and nutrient profiles of aerial parts of purslane (*Portulaca oleracea* L.) plants. *International Journal of Food Science and Technology*, 58(11), 5809-5818.
- Aljumayi, H. (2025). Antioxidant activities of chicory (*Cichorium intybus* L.) and purslane (*Portulaca oleracea* L.) leaves powder and their applications for preservation of cupcakes. *Italian Journal of Food Science/Rivista Italiana di Scienza degli Alimenti*, 37(1).
- Aviara, N. A. (2020). Moisture sorption isotherms and isotherm model performance evaluation for food and agricultural products. *Sorption in 2020s*, 143.

- Ayuningtyas, S. A., Syska, K., Ropiudin, R., Nurhayati, A. D., Wahdah, F., Subekti, I., Maskuri, K., Aulia, R., Najib, A.A., Susanto, A., & Zahroh, I. (2024). Kajian Suhu Pengeringan Teh Daun Beluntas (*Pluchea indica* L.) dan Pengaruhnya Terhadap Kandungan Antioksidan. *Jurnal Agritechno*, 48-58.
- Bakırcı, M., Al Faysal, A., & Gölcü, A. (2025). A comparison of the antioxidant activity of Turkish Black Tea at various processing stages. *Pharmata*, 5(1), 7-15.
- Barroso, T. L. C. T., de Barros Alexandre, J., da Cruz, E. P., Dias, A. R. G., Forster-Carneiro, T., & Bastos, C. P. (2024). An updated on applications and future perspectives for the valorization of purslane (*Portulaca oleracea*): a comprehensive review and bibliometric analysis. *European Food Research and Technology*, 250(5), 1285-1306.
- Bourais, I., Elmarrkechy, S., Taha, D., Mourabit, Y., Bouyahya, A., El Yadini, M., Machich, O., El Hajjaji, S., El Boury, H., Dakka, N., & Iba, N. (2023). A review on medicinal uses, nutritional value, and antimicrobial, antioxidant, anti-inflammatory, antidiabetic, and anticancer potential related to bioactive compounds of *J. regia*. *Food Reviews International*, 39(9), 6199-6249.
- Dos Santos, L. O., Dos Santos, A. M., Ferreira, M. M., Ferreira, S. L., & Nepomuceno, A. F. S. (2022). The use of ANOVA-PCA and DD-SIMCA in the development of corn flour laboratory reference materials. *Food Chemistry*, 367, 130748.
- Eva, Y., Syska, K., & Nurhayati, A. D. (2023). Pendugaan umur simpan jambu kristal (*Psidium guajava* L.) terolah minimal menggunakan Metode ASLT (Accelerated Shelf Life Test) model arrhenius. *Jurnal Agritechno*, 132-140.
- Fontana Jr, A. J., & Carter, B. P. (2020). Measurement of water activity, moisture sorption isotherm, and moisture content of foods. *Water activity in foods: Fundamentals and applications*, 207-226.
- Ge, C., Verma, S. S., Burruto, J., Ribalco, N., Ong, J., & Sudhahar, K. (2021). Effects of flexing, optical density, and lamination on barrier and mechanical properties of metallized films and aluminum foil centered laminates prepared with polyethylene terephthalate and linear low density polyethylene. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 37(2), 205-225.
- Gopi, S., & Balakrishnan, P. (Eds.). (2022). *Handbook of nutraceuticals and natural products*. John Wiley & Sons, Incorporated.
- Hakim, A. L., Syska, K., Ropiudin, R., Nurhayati, A. D., Susanto, A., Aulia, R., Insani, C., Estiningrum, D.P., Istiqomah, K., Maskuri, K. & Pranoto, R. A. S. (2024). Kajian Karakteristik dan Potensi Aktivitas Antioksidan Teh Daun Beluntas (*Pluchea indica* L.) dengan Penyertaan Jahe sebagai Minuman Fungsional. *Jurnal Agritechno*, 69-82.
- Hebbar, K. B., Padmanabhan, S., SV, R., Bhat S, K., PP, S. B., MR, M., & AC, M. (2021). Moisture content and water activity of arecanut samples: A need to revisit storage guidelines. ISPC.
- Kumar, A., Sreedharan, S., Kashyap, A. K., Singh, P., & Ramchiary, N. (2022). A review on bioactive phytochemicals and ethnopharmacological potential of purslane (*Portulaca oleracea* L.). *Heliyon*, 8(1).
- Li, K., Xia, T., Jiang, Y., Wang, N., Lai, L., Xu, S., Yue, X., & Xin, H. (2024). A review on ethnopharmacology, phytochemistry, pharmacology and potential uses of *Portulaca oleracea* L. *Journal of Ethnopharmacology*, 319, 117211.
- Maharani, S., Mustikawati, I., Nailufhar, L., & Istiqomah, S. (2021, April). The effect of brewing time on pH values, polyphenols content, and antioxidant activities of coffee husk tea (cascara tea). In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1869, No. 1, p. 012050). IOP Publishing.
- Peleg, M. (2020). Models of sigmoid equilibrium moisture sorption isotherms with and without the monolayer

- hypothesis. *Food Engineering Reviews*, 12(1), 1-13.
- Qu, P., Zhang, M., Fan, K., & Guo, Z. (2022). Microporous modified atmosphere packaging to extend shelf life of fresh foods: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(1), 51-65.
- Roos, Y. H. (2024). Water sorption modeling and monolayer of biological and food materials. *LWT*, 201, 116271.
- Sanz-Santos, E., Álvarez-Torrellas, S., Larriba, M., Calleja-Cascajero, D., & García, J. (2022). Enhanced removal of neonicotinoid pesticides present in the Decision 2018/840/EU by new sewage sludge-based carbon materials. *Journal of Environmental Management*, 313, 115020.
- Srivastava, R., Srivastava, V., & Singh, A. (2023). Multipurpose benefits of an underexplored species purslane (*Portulaca oleracea* L.): A critical review. *Environmental Management*, 72(2), 309-320.
- Syska, K., & Ropiudin, R. (2020). Analisis Mutu Keripik Tempe Berdasarkan Cara Perekatan dan Ketebalan Pengemas Selama Penyimpanan. *Chemical Engineering Research Articles*, 3(1), 42-54.
- Syska, K., & Ropiudin, R. (2020). Perpindahan Panas pada Pengering Tipe Drum Berputar pada Kondisi Tanpa Beban. *Agroteknika*, 3(1), 1-15.
- Syska, K., & Ropiudin, R. (2023). Karakteristik pengeringan dan mutu hedonik gula kelapa kristal menggunakan pengering tipe rak berputar berenergi limbah termal dan biomassa. *Jurnal Agritechno*, 19-28.
- Syska, K., Nuroniah, N. S., & Ropiudin, R. (2023). Pendugaan Umur Simpan Gula Kelapa Kristal dalam Kemasan Vakum menggunakan Metode Accelerated Shelf Life Test (ASLT) Model Arrhenius. *Rona Teknik Pertanian*, 16(1), 69-80.
- Syska, K., Ropiudin, R., Rudiyantri, E., Nurhayati, A. D., & Wahdah, F. (2023). Estimation of Shelf Life of Pegagan Tea (*Centella asiatica* (L) Urban) using Accelerated Shelf Life Testing (ASLT) Method with Arrhenius Model. *Journal of Tropical Agricultural Engineering and Biosystems-Jurnal Keteknikaan Pertanian Tropis dan Biosistem*, 11(3), 244-256.
- Tapia, M. S., Alzamora, S. M., & Chirife, J. (2020). Effects of water activity (aw) on microbial stability as a hurdle in food preservation. *Water activity in foods: Fundamentals and applications*, 323-355.
- Tarchoun, A. F., Trache, D., Abdelaziz, A., Selmani, A., Boukeciat, H., Hamouche, M. A., Chelouche, S., Pal, Y., & Klapötke, T. M. (2025). A study on the isothermal decomposition kinetics of energetic cellulose-rich materials using a vacuum stability test. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 138(1), 91-106.
- Uddin, M. K., Quan, L., Hasan, M. M., & Madom, M. S. (2020). Purslane: a perspective plant source of nutrition and antioxidant. *Plant Archives (09725210)*, 20(2).
- Xia, S., Yang, T., Chen, Z., & Xu, J. (2024). Determination and discussion of apparent reaction kinetics of liquid diacyl peroxide synthesis in a microreactor. *Chemical Engineering Science*, 290, 119826.
- Zahroh, I., Syska, K., & Nurhayati, A. D. (2023). Pendugaan umur simpan tomat (*Solanum lycopersicum* L) terolah minimal menggunakan metode ASLT (Accelerated Shelf Life Test) Model Arrhenius. *Jurnal Agritechno*, 148-157.
- Zhang, Q., He, J., Song, L., Hu, K., & Sun, P. (2023). Theoretical model of water vapor absorption-desorption equilibrium of concrete considering the effect of temperature. *Construction and Building Materials*, 375, 130968.