



## Pemodelan kinetika pengeringan buah amla (*Indian gooseberry*)

Auliyaa Raaf<sup>1</sup>, Farid Mulana<sup>2</sup>, Yanna Syamsuddin<sup>2,3</sup>, Nanda Suriaini<sup>2</sup>, Muhammad Dani Supardan<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Doktor Ilmu Teknik, Program Pascasarjana, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, Indonesia

<sup>2</sup>Teknik Kimia, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, Indonesia

<sup>3</sup>Pusat Riset Halal, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, Indonesia

### Article history

Diterima:

18 April 2023

Diperbaiki:

1 Agustus 2023

Disetujui:

2 Agustus 2023

### Keyword

Amla;

drying method;

drying kinetic models;

diffusivity

### ABSTRACT

*Amla fruit is not consumed directly because it has a sour and astringent taste, so it is widely used in various forms of dried and processed products for ease of use. Therefore, post-harvest handling of amla fruit as well as drying process is necessary. This study investigates the effect of drying method and sample thickness on the drying kinetics of amla fruit. In this study, amla was dried by sun drying and oven drying (at 40, 60 and 60°C) and sample sizes (1×0,5×0,5) cm and (1×1×0,5) cm. The results showed that the drying method and thickness of the sample affected the drying time. The shortest drying time was obtained from oven-dried samples at a drying air temperature of 60°C and samples with smaller sizes (slice I). The semi-theoretical and empirical models were evaluated in amla fruit's drying kinetics. The fit of the model with the experimental data is determined using the coefficient determination ( $R^2$ ). Model Midili et al. give the best match with the highest  $R^2$  value. The effective moisture diffusivity at various drying conditions ranged from  $5.747 \times 10^{-10}$  to  $1.242 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s for slice I and  $4.522 \times 10^{-10}$  to  $9.213 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s for slice II. The effective moisture diffusivity is correlated with temperature using the Arrhenius equation. The activation energy needed to remove moisture from the amla fruit matrix was 20.230 kJ/mol for slice I and 22.006 kJ/mol for slice II. This kinetic study is useful for predicting the drying process yield and designing the dryer.*



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

\* Penulis korespondensi

Email : m.dani.supardan@che.unsyiah.ac.id

DOI 10.21107/agrointek.v18i4.19802

## PENDAHULUAN

Buah amla, juga dikenal sebagai *Indian gooseberry*, termasuk dalam famili Euphorbiaceae dan berasal dari India, Sri Lanka, Malaysia, Thailand, dan Cina (Khan et al. 2019). Buah amla kaya akan vitamin C. Patil and Gawande (2018) melaporkan bahwa setiap 100 g buah amla segar mengandung 450-600 mg vitamin C. Buah amla juga mengandung senyawa fitokimia bioaktif seperti flavonoid, terpenoid, tanin dan senyawa fenolik yang memiliki sifat anti-inflamasi, antioksidan, aktivitas anti-kanker dan anti-mikroba (Khan et al. 2019, Chaikul et al. 2021). Buah amla memiliki perpaduan rasa asam, kelat dan kesat di lidah sehingga tidak dikonsumsi secara langsung dalam keadaan segar (Gudapaty et al. 2010).

Buah amla segar atau kering banyak digunakan dalam pengobatan Ayurveda di India, diolah menjadi obat-obatan, makanan dan produk kecantikan (Minj et al. 2018). Namun, kandungan air yang tinggi pada buah amla (87,16% b.b) menyebabkan pertumbuhan mikroba yang pada akhirnya memperpendek umur simpan buah amla. Kandungan air yang tinggi membuka jalan bagi pertumbuhan mikroba dan mempercepat proses pembusukan (Raaf et al. 2022). Pengeringan merupakan salah satu metode yang digunakan untuk pengawetan produk pertanian. Tujuan utama pengeringan adalah pengurangan kadar air ke tingkat yang akan mencegah pembusukan. Produk kering yang diperoleh akan meminimalkan transportasi, penyimpanan, dan biaya pengemasan (Inyang et al. 2018). Oleh karena itu, pengeringan adalah teknik yang paling banyak digunakan untuk pengawetan makanan. Selain itu, terdapat berbagai jenis teknik pengeringan seperti pengeringan matahari, pengeringan oven dan pengeringan beku yang dapat diterapkan untuk mengurangi kadar air dan mencapai tujuan pengawetan makanan (Ling et al. 2015).

Teknik pengeringan matahari terbuka biasa digunakan di daerah tropis untuk buah dan sayuran. Pengeringan matahari masih lebih disukai dibandingkan dengan teknologi baru. Hal ini karena biaya pengeringan matahari terbuka lebih rendah karena hanya membutuhkan luas lantai yang besar dan ramah lingkungan dengan menggunakan matahari sebagai sumber panas. Sedangkan pengeringan menggunakan oven biasa diterapkan dalam industri kecil maupun besar

karena kesederhanaan konstruksi pengering, kemudahan pengoperasian dan dapat mengatur parameter pengeringan sesuai kondisi yang diinginkan (Babu et al. 2018). Oleh karena itu, penelitian ini dirancang untuk menggunakan teknik pengeringan matahari dan oven dan mempelajari kinetika pengeringannya.

Berbagai kondisi yang mempengaruhi pengeringan buah dan sayuran meliputi kecepatan udara, suhu pengeringan, ukuran dan bentuk bahan, dan kelembaban relatif. Di antara kondisi tersebut, yang paling berpengaruh dalam hal pengeringan buah dan sayuran adalah suhu pengeringan dan ketebalan bahan (Onwude et al. 2016). Untuk mengoptimalkan kondisi proses pengeringan, data eksperimen sering digunakan untuk model matematika. Pemodelan kinetika pengeringan dapat berguna untuk memprediksi waktu pengeringan untuk mencapai kadar air yang diinginkan dari buah amla dengan menggunakan kondisi operasional yang ditentukan. Dari sudut pandang teknik, pemodelan kinetika pengeringan membantu dalam tahap aplikasi proses desain peralatan dan dapat memberikan informasi yang benar tentang prosedur peningkatan skala peralatan (Inyang et al. 2018).

Desain pengering yang tepat membutuhkan pengetahuan tentang karakteristik bahan yang akan dikeringkan dan kinetika pengeringan. Namun, dalam praktiknya, tidak ada satu pun model lapisan tipis yang dapat digunakan untuk menggeneralisasikan kinetika pengeringan beberapa buah dan sayuran secara efektif. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor antara lain cara pengeringan, kondisi pengeringan, dan produk yang akan dikeringkan (Onwude et al. 2016). Dengan demikian, penggunaan model matematis dalam memperkirakan kinetika pengeringan, perilaku, dan energi yang dibutuhkan dalam pengeringan produk pertanian dan pangan menjadi sangat diperlukan.

Pada penelitian ini, beberapa model pengeringan dipilih untuk mensimulasikan percobaan pengeringan lapis tipis pada buah amla. Penelitian ini dirancang untuk menilai pengaruh suhu dan ukuran bahan terhadap kinetika pengeringan buah amla. Selain itu, juga untuk mengevaluasi kinetika pengeringan, difusivitas kelembaban dan energi aktivasi proses pengeringan. Parameter kinetika sangat penting diketahui agar hasil eksperimen dapat diprediksi, perancangan peralatan menjadi lebih baik dan

proses pengeringan yang dijalankan memiliki acuan ilmiah.

## METODE

### Preparasi Sampel dan Proses Pengeringan

Buah amla yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari Blang Bintang, Aceh besar. Buah dicuci terlebih dahulu untuk menghilangkan kotoran sebelum digunakan dalam percobaan. Selanjutnya dikupas dan dipotong menjadi dua lempengan dengan ukuran berbeda yaitu  $1 \text{ cm} \times 0,5 \text{ cm} \times 0,5 \text{ cm}$  (ukuran I) dan  $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 0,5 \text{ cm}$  (ukuran II) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Irisan buah amla kemudian amla dijemur di bawah sinar matahari/siang hari untuk pengeringan matahari. Selama periode penjemuran, suhu udara penjemuran berada pada kisaran  $37\text{-}45^\circ\text{C}$ . Pada pengeringan oven, amla dikeringkan pada suhu yang berbeda-beda ( $40, 50$ , dan  $60^\circ\text{C}$ ). Semua sampel dikeringkan hingga mencapai berat konstan. Selama pengeringan, berat sampel dicatat setiap 10 menit menggunakan timbangan elektronik dengan akurasi  $0,01 \text{ g}$ .



Gambar 1 Irisan amla: (a) ukuran I dan (b) ukuran II

### Pemodelan Matematik

Model pengeringan lapis tipis yang banyak digunakan dalam menggambarkan proses pengeringan berbagai produk pertanian dapat dilihat pada Tabel 1. Pemodelan matematik yang digunakan pada pengeringan irisan amla dalam penelitian ini adalah model semi-teoritis dan model empiris. Model semi-teoritis (Model 1-6) dan model empiris (Model 7-9) yang digunakan untuk mengevaluasi kinetika pengeringan berbagai produk pertanian dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Pemodelan matematik yang diterapkan pada pengeringan irisan amla

No	Model	Persamaan
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Handerson-Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt)$
4	Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$
5	Midili dkk.	$MR = a \cdot \exp(-kt^n) + bt$
6	Logaritmik	$MR = a \cdot \exp(-kt) + c$
7	Aghbashlo dkk.	$MR = \exp(-\frac{k_1 t}{1+k_2 t})$
8	Wang & Singh	$MR = 1 + at + bt$
9	Weibull	$MR = \exp(-\frac{t}{a})^b$

\*  $k$ : konstanta pengeringan ( $\text{menit}^{-1}$ );

$n, a, b, c$ : konstanta pengeringan (tanpa dimensi)

Penentuan kadar air sampel selama proses pengeringan dihitung menggunakan Persamaan (1):

$$M_t = \frac{w_t - w_f}{w_i} \quad (1)$$

dimana:

$M_t$  = kadar air pada waktu  $t$  (g)

$w_t$  = massa sampel pada waktu  $t$  (g)

$w_i$  = massa awal sampel (g)

$w_f$  = massa akhir sampel (g)

Kadar air sampel yang diperoleh diubah menjadi *Moisture Ratio* (MR), yang ditentukan menggunakan Persamaan (2).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (2)$$

dimana:

$M_t$  = kadar air sampel pada waktu  $t$  (-)

$M_i$  = kadar air awal sampel (-)

$M_e$  = kadar air saat kesetimbangan (-)

Semua model matematika divalidasi dan diverifikasi dengan membandingkan data terukur yang diperoleh dari data eksperimen dengan nilai prediksi kadar air. Untuk validasi model, koefisien determinasi ( $R^2$ ) adalah salah satu kriteria utama untuk memilih persamaan terbaik untuk menggambarkan kurva pengeringan. Semakin tinggi nilai  $R^2$  suatu model maka semakin baik model tersebut dalam memprediksi perilaku pengeringan buah dan sayuran. Nilai  $R^2$  dapat dihitung menggunakan Persamaan (3).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{cal,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{cal} - MR_{exp,i})^2} \quad (3)$$

dimana:

$MR_{exp}$  = rasio kelembaban yang diamati secara eksperimen (-)

$MR_{cal}$  = rasio kelembaban yang diprediksi (-)

$\overline{MR}_{cal}$  = rata-rata rasio kelembaban yang diprediksi (-)

N = jumlah data

### Difusivitas Kelembaban Efektif dan Energi Aktivasi

Difusivitas kelembaban efektif, yang merupakan fungsi suhu dan kadar air suatu bahan, merupakan sifat transportasi penting dalam pemodelan proses pengeringan buah dan sayuran. Difusivitas yang efektif bergantung pada kondisi udara pengering selain variasi dan komposisi bahan. Mekanisme difusivitas kelembaban diatur oleh persamaan hukum difusi seperti yang dijelaskan oleh hukum difusi kedua Fick (Persamaan (4)) dan disederhanakan menjadi Persamaan (5) berdasarkan asumsi bahwa kelembaban awalnya didistribusikan secara seragam ke seluruh massa sampel, koefisien distribusi konstan dan penyusutan dapat diabaikan, maka difusivitas kelembaban efektif untuk sampel dengan geometri berbentuk plat dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{\pi^2(2n+1)^2}{4L^2} D_{eff} t\right) \quad (4)$$

Dengan mengabaikan suku orde tinggi dan mempertimbangkan  $n = 0$ , maka Persamaan (4) dapat direduksi menjadi:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (5)$$

Persamaan (5) dapat disederhanakan dalam bentuk logaritmik, yaitu:

$$\ln MR = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}\right) t \quad (6)$$

dimana:

$D_{eff}$  = Difusivitas kelembaban efektif ( $m^2$ /menit)

L = Setengah dari ketebalan bahan (m)

Berdasarkan Persamaan (6) dapat dibuat grafik hubungan  $\ln MR$  terhadap waktu pengeringan (t), dimana nilai  $D_{eff}$  ditentukan berdasarkan nilai slope dari hubungan garis linier tersebut.

Difusivitas kelembaban efektif dapat dikaitkan dengan suhu melalui persamaan

Arrhenius. Hubungan antara  $D_{eff}$  dan suhu dapat dihitung dengan Persamaan (7):

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

dimana:

$D_0$  = faktor frekuensi atau pra-eksponensial ( $m^2$ /s)

$E_a$  = energi aktivasi (J/mol)

R = konstanta gas (8,314 J/mol.K)

T = suhu (K)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Pengaruh Metode Pengeringan dan Ukuran Sampel Terhadap Kadar Air Buah Amla

Pada penelitian ini, buah amla dikeringkan menggunakan pengeringan matahari dan pengeringan oven pada suhu 40, 50 dan 60°C. Perubahan kadar air dengan waktu pengeringan pada kondisi pengeringan yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 2.

Berdasarkan Gambar 2 dapat dilihat bahwa kadar air menurun seiring bertambahnya waktu pengeringan. Gambar 2 juga menunjukkan bahwa proses pengeringan terjadi pada dua periode, yaitu tahap pengeringan cepat dan lambat. Tahap cepat terjadi pada awal pengeringan. Selama tahap ini, diasumsikan bahwa air dengan cepat dibebaskan dan diuapkan dari permukaan luar bahan tanaman, sehingga kadar air menurun dengan cepat. Laju pengeringan melambat sampai kadar air hampir konstan tercapai. Pada periode terakhir (lambat), terjadi difusi molekuler air dari sel yang belum dihancurkan ke permukaan bahan tanaman diikuti oleh penguapan air. Laju pengeringan melambat karena laju difusi penguapan air lambat.

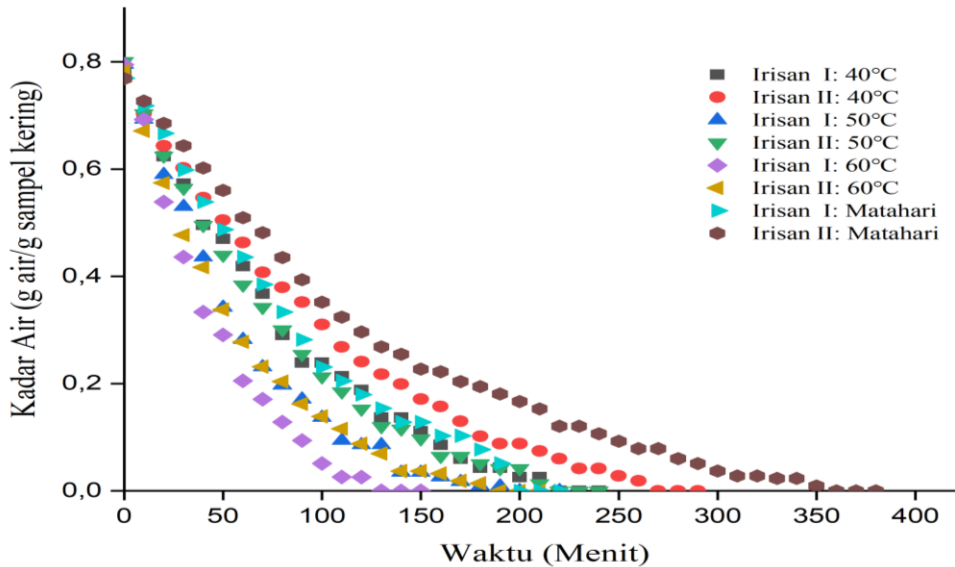
Gambar 2 menunjukkan bahwa kadar air menurun dengan cepat seiring dengan peningkatan suhu udara pengeringan. Suhu udara pengering yang lebih tinggi mengakibatkan kehilangan kadar air yang lebih tinggi sehingga waktu pengeringan yang diperlukan berkurang. Peningkatan suhu mengurangi kelembaban relatif udara pengering dan karenanya meningkatkan gradien kelembaban antara produk dan udara di sekitar produk makanan (Nag and Dash 2016). Suhu yang lebih tinggi meningkatkan mobilitas air di dalam produk dan juga meningkatkan energi yang tersedia di media untuk penguapan air untuk memfasilitasi proses pengeringan.

Pengaruh ketebalan irisan terhadap waktu pengeringan ditunjukkan pada Gambar 2, dimana sampel irisan I lebih cepat kering daripada sampel

irisan II. Produk yang diiris tipis lebih cepat kering karena berkurangnya jarak perjalanan kelembapan dan peningkatan luas permukaan yang terpapar untuk volume produk tertentu. Pengamatan serupa ditemukan oleh Naderinezhad et al. (2016) untuk irisan kentang dan Hashim et al. (2014) untuk labu.

Sementara itu, metode pengeringan juga mempengaruhi lamanya pengeringan sampel.

Pada Gambar 2 terlihat bahwa pengeringan matahari memerlukan waktu yang lebih lama untuk mencapai kondisi konstan dibandingkan dengan pengeringan menggunakan oven. Hasil serupa ditemukan oleh Ling et al. (2015) bahwa pengeringan menggunakan sinar matahari memerlukan waktu yang lama karena sangat bergantung pada cuaca pada saat pengeringan berlangsung.



Gambar 2 Pengaruh metode pengeringan dan ukuran sampel terhadap kadar air buah amla

Tabel 2 Hasil evaluasi model kinetika pengeringan menggunakan metode pengeringan oven

Ukuran Sampel	Suhu (°C)	Model	k (menit <sup>-1</sup> )	Konstanta a/n	b/c	R <sup>2</sup>
Irisan I	40	1	k = 0,0124	-	-	0,9829
		2	k = 0,0046	n = 1,2162	-	0,9941
		3	k = 0,0130	a = 1,0509	-	0,9859
		4	k = 0,0072	n = 1,7232	-	0,9829
		<b>5</b>	<b>k = 0,0067</b>	<b>a = 0,9910</b> <b>n = 1,1072</b>	<b>b = -0,0003</b>	<b>0,9973</b>
		6	k = 0,0096	a = 1,1417	c = -0,1326	0,9970
		7	k <sub>1</sub> = 0,0096 k <sub>2</sub> = -0,0020	-	-	0,9969
		8	-	a = -0,0100	b = 2,65×10 <sup>-5</sup>	0,9743
		9	-	a = 3,3581	b = 0,0425	0,9824
	50	1	k = 0,0173	-	-	0,9902
		2	k = 0,0078	n = 1,1868	-	0,9978
		3	k = 0,0181	a = 1,0484	-	0,9926
		4	k = 0,0085	n = 2,0398	-	0,9902
		<b>5</b>	<b>k = 0,0087</b>	<b>a = 0,9964</b> <b>n = 1,1533</b>	<b>b = -0,0001</b>	<b>0,9983</b>
		6	k = 0,0157	a = 1,0772	c = -0,0509	0,9970
		7	k <sub>1</sub> = 0,00142 k <sub>2</sub> = -0,0022	-	-	0,9980
		8	-	a = -0,0118	b = 3,42×10 <sup>-5</sup>	0,9851
		9	-	a = 3,1786	b = 0,0566	0,9898

Ukuran Sampel	Suhu (°C)	Model	k (menit <sup>-1</sup> )	Konstanta a/n	b/c	R <sup>2</sup>
	60	1	k = 0,0223	-	-	0,9861
		2	k = 0,0091	n = 1,2230	-	0,9966
		3	k = 0,0234	a = 1,0546	-	0,9893
		4	k = 0,0096	n = 2,3136	-	0,9861
		<b>5</b>	<b>k = 0,0125</b>	<b>a = 1,0067</b> <b>n = 1,1299</b>	<b>b = -0,0003</b>	<b>0,9982</b>
		6	k = 0,0188	a = 1,1140	c = -0,0882	0,9973
		7	k <sub>1</sub> = 0,00142 k <sub>2</sub> = -0,0022	-	-	0,9978
		8	-	a = -0,0157	b = 6,14×10 <sup>-5</sup>	0,9935
		9	-	a = 3,6108	b = 0,0826	0,9892
Irisan II	40	1	k = 0,0099	-	-	0,9845
		2	k = 0,0036	n = 1,2124	-	0,9958
		3	k = 0,0104	a = 1,0514	-	0,9876
		4	k = 0,0064	n = 1,5419	-	0,9845
		<b>5</b>	<b>k = 0,0054</b>	<b>a = 0,9897</b> <b>n = 1,0976</b>	<b>b = -0,0003</b>	<b>0,9993</b>
		6	k = 0,0075	a = 1,1500	c = -0,1433	0,9991
		7	k <sub>1</sub> = 0,0077 k <sub>2</sub> = -0,0016	-	-	0,9988
		8	-	a = -0,0073	b = 1,34×10 <sup>-5</sup>	0,9968
		9	-	a = 4,6776	b = 0,0473	0,9842
	50	1	k = 0,0133	-	-	0,9905
		2	k = 0,0066	n = 1,1554	-	0,9967
		3	k = 0,0138	a = 1,0343	-	0,9918
		4	k = 0,0075	n = 1,7877	-	0,9905
		<b>5</b>	<b>k = 0,0087</b>	<b>a = 0,9895</b> <b>n = 1,0734</b>	<b>b = -0,0002</b>	<b>0,9990</b>
		6	k = 0,0110	a = 1,0907	c = -0,0888	0,9989
		7	k <sub>1</sub> = 0,0110 k <sub>2</sub> = -0,0017	-	-	0,9987
		8	-	a = -0,0095	b = 2,31×10 <sup>-5</sup>	0,9924
		9	-	a = 4,2046	b = 0,0573	0,9900
60	1	k = 0,0175	-	-	0,9946	
	2	k = 0,0105	n = 1,1188	-	0,9981	
	3	k = 0,0180	a = 1,0298	-	0,9955	
	4	k = 0,0085	n = 2,0469	-	0,9946	
	<b>5</b>	<b>k = 0,0132</b>	<b>a = 0,9995</b> <b>n = 1,0531</b>	<b>b = -0,0002</b>	<b>0,9993</b>	
	6	k = 0,0156	a = 1,0585	c = -0,0501	0,9993	
	7	k <sub>1</sub> = 0,0151 k <sub>2</sub> = -0,0017	-	-	0,9990	
	8	-	a = -0,0120	b = 3,57×10 <sup>-5</sup>	0,9836	
	9	-	a = 3,4762	b = 0,0621	0,9941	

### Pemodelan Matematik Kinetika Pengeringan

Dalam penelitian ini, data kadar air yang diperoleh pada kondisi pengeringan yang berbeda dikonversi ke rasio kelembaban tak berdimensi dan kemudian digunakan pada 9 model kinetika pengeringan seperti yang disajikan pada Tabel 1. Hasil yang diperoleh dari penyesuaian data eksperimen dengan model kinetika pengeringan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 2 dan 3. Model tersebut dievaluasi berdasarkan nilai

koefisien determinasi (R<sup>2</sup>) dimana nilai koefisien yang paling besar menunjukkan model terbaik.

Berdasarkan Tabel 2 dan 3 dapat dilihat bahwa dari semua model yang diuji, model Midilli dkk. (Model 5) memberikan nilai R<sup>2</sup> tertinggi pada semua eksperimen. Dengan demikian, model Midilli dkk. dipilih sebagai model yang cocok untuk mewakili karakteristik pengeringan buah amla dengan menggunakan pengeringan matahari dan pengeringan oven. Model Midilli dkk. juga

telah digunakan secara luas untuk mengkarakterisasi pengeringan kesemek (Doymaz 2012), kentang (Naderinezhad et al. 2016), dan daun *Vernonia amygdalina* (Alara et al. 2019), karena parameter kinetiknya mewakili hubungan antara kadar air dan suhu udara pengeringan. Pada penelitian ini, pengaruh suhu dan ketebalan sampel diamati dengan peningkatan linier parameter k sehubungan dengan kenaikan suhu pengeringan dan menurun dengan bertambahnya ukuran sampel. Sementara itu, untuk metode pengeringan menggunakan sinar matahari diperoleh nilai k yang lebih rendah daripada pengeringan oven. Hal ini dikarenakan pengeringan menggunakan oven dengan sistem tertutup membantu mengurangi kehilangan panas selama proses pengeringan (Babu et al. 2018).

Model Midili dkk. merupakan salah satu model semi-teoritis yang banyak digunakan dalam pemodelan kinetika pengeringan bahan makanan. Model Midili dkk. merupakan modifikasi dari model Henderson dan Pabis dengan penambahan konstanta n dan b agar diperoleh korelasi yang lebih baik. Model ini ditemukan sebagai yang terbaik dalam menggambarkan perilaku pengeringan berbagai buah dan sayuran (Onwude et al. 2016). Model-model semi-teoritis (Model 1-6) hanyalah modifikasi dari satu model terhadap model lainnya, mengambil dasar dari model Newton

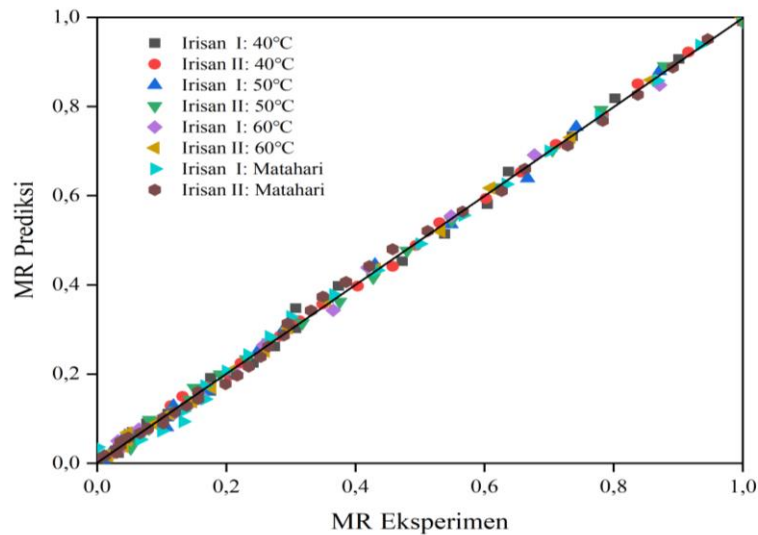
(Lewis) atau Page seperti yang dapat dilihat dalam Tabel 1. Modifikasi tersebut dilakukan untuk mengatasi kekurangan satu sama lain (Inyang et al. 2018).

Sementara itu, model empiris (Model 7-9) gagal memperhitungkan dasar-dasar proses pengeringan dan hanya mampu menjelaskan kurva pengeringan untuk kondisi pengeringan tetapi bukan proses yang terjadi selama pengeringan. Hal ini dikarenakan model empiris tidak memiliki interpretasi fisik dalam bentuk hubungan kinetik antara konstanta laju dan konsentrasi kadar air, sehingga terbatas dalam menggambarkan secara efektif perilaku pengeringan, perpindahan panas dan massa dari proses pengeringan buah dan sayuran (Onwude et al. 2016).

Untuk memvalidasi model yang telah dibuat, dilakukan dengan membandingkan nilai rasio kelembaban eksperimen dengan nilai prediksi pada setiap percobaan pengeringan tertentu pada kondisi tertentu (Gambar 3). Dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa MR eksperimen dan prediksi model Midili dkk. memiliki kesesuaian yang baik, dimana MR eksperimen = MR prediksi yang ditunjukkan dengan kedekatan hasil dengan garis lurus 45°. Ini menunjukkan bahwa model Midili dkk. cukup representatif untuk menggambarkan kinetika pengeringan buah amla.

Tabel 3 Hasil evaluasi model kinetika pengeringan menggunakan metode pengeringan matahari

Ukuran Sampel	Model	k (menit <sup>-1</sup> )	Konstanta		R <sup>2</sup>
			a/n	b/c	
Irisan I	1	k = 0,0115	-	-	0,9725
	2	k = 0,0026	n = 1,3221	-	0,9952
	3	k = 0,0124	a = 1,0839	-	0,9810
	4	k = 0,0069	n = 1,6574	-	0,9725
	<b>5</b>	<b>k = 0,0041</b>	<b>a = 1,0039</b> <b>n = 1,1987</b>	<b>b = -0,0003</b>	<b>0,9969</b>
	6	k = 0,0082	a = 1,2435	c = -0,2093	0,9955
	7	k <sub>1</sub> = 0,0083 k <sub>2</sub> = -0,0024	-	-	0,9954
	8	-	a = -0,0083	b = 1,76×10 <sup>-5</sup>	0,9950
	9	-	a = 3,2279	b = 0,0370	0,9725
Irisan II	1	k = 0,0079	-	-	0,9875
	2	k = 0,0032	n = 1,1842	-	0,9966
	3	k = 0,0084	a = 1,0616	-	0,9917
	4	k = 0,0058	n = 1,3807	-	0,9875
	<b>5</b>	<b>k = 0,0052</b>	<b>a = 1,0120</b> <b>n = 1,0715</b>	<b>b = -0,0001</b>	<b>0,9983</b>
	6	k = 0,0067	a = 1,1166	c = -0,0905	0,9980
	7	k <sub>1</sub> = 0,0065 k <sub>2</sub> = -0,0011	-	-	0,9971
	8	-	a = -0,0058	b = 8,44×10 <sup>-5</sup>	0,9916
	9	-	a = 5,2027	b = 0,0419	0,9874



Gambar 3 Perbandingan nilai MR eksperimen dengan MR prediksi

Tabel 4 Nilai difusivitas kelembaban efektif dan energi aktivasi buah amla

Metode Pengeringan	Irisan I		Irisan II	
	$D_{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)	$E_a$ (Kj/mol)	$D_{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)	$E_a$ (Kj/mol)
Pengeringan matahari	$5,747 \times 10^{-10}$	-	$4,522 \times 10^{-10}$	-
Oven pada 40°C	$6,888 \times 10^{-10}$	20,230	$5,494 \times 10^{-10}$	22,006
Oven pada 50°C	$1,010 \times 10^{-9}$		$7,015 \times 10^{-10}$	
Oven pada 60°C	$1,242 \times 10^{-9}$		$9,213 \times 10^{-10}$	

**Difusivitas Kelembaban Efektif dan Energi Aktivasi**

Pengetahuan tentang difusivitas kelembaban efektif dan energi aktivasi diperlukan untuk merancang dan memodelkan proses perpindahan massa seperti dehidrasi atau adsorpsi kelembaban selama penyimpanan. Energi aktivasi berfungsi sebagai indikasi jumlah minimum energi yang dibutuhkan untuk memulai difusi kelembaban dari matriks padat. Nilai  $D_{eff}$  dan  $E_a$  buah amla untuk berbagai metode pengeringan dan ukuran sampel disajikan pada Tabel 4.

Berdasarkan Tabel 4 dapat dilihat bahwa nilai difusivitas kelembaban efektif berkisar antara  $5,747 \times 10^{-10} - 1,242 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s dan  $4,522 \times 10^{-10} - 9,213 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s masing-masing untuk irisan I dan irisan II pada berbagai kondisi pengeringan. Nilai serupa juga ditemukan pada produk pertanian seperti biji jeruk (Rosa et al. 2015). Nilai  $D_{eff}$  yang diperoleh pada penelitian ini berada pada kisaran  $10^{-9} - 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s untuk pengeringan produk-produk pertanian (Alara et al.

2019). Hasil penelitian menunjukkan nilai  $D_{eff}$  meningkat ketika suhu udara pengeringan meningkat. Hal ini dikarenakan peningkatan suhu udara pengeringan akan meningkatkan aktivitas molekul air. Selain itu, nilai  $D_{eff}$  pada irisan I lebih tinggi daripada irisan II pada semua kondisi pengeringan. Ini dikarenakan ukuran yang lebih kecil memperpendek jarak yang harus ditempuh oleh pergerakan air dari dalam bahan menuju ke permukaan sehingga meningkatkan nilai difusivitas kelembaban efektif pada sampel (Raaf et al. 2022).

Energi aktivasi untuk pengeringan buah amla dapat ditentukan melalui persamaan Arrhenius seperti yang diberikan pada Persamaan 5. Energi aktivasi diperoleh dengan memplot grafik  $\ln D_{eff}$  versus  $1/(T + 273.15)$  sehingga diperoleh slope sebagai nilai  $(-E_a/R)$ . Nilai energi aktivasi untuk pengeringan buah amla irisan I dan irisan II dapat dilihat pada Tabel 4. Berdasarkan Tabel 4 dapat dilihat bahwa nilai energi aktivasi yang diperoleh berada dalam kisaran umum untuk berbagai jenis bahan makanan, yaitu 12,7 hingga 110 kJ/mol



(Doymaz 2012). Nilai energi aktivasi meningkat dengan meningkatnya ketebalan irisan yang menunjukkan bahwa semakin besar energi yang dibutuhkan untuk memulai migrasi air dari dalam matriks sampel menuju ke permukaan sampel.

### KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, model semi-teoritis dan model empiris diterapkan dan disesuaikan dengan data percobaan untuk menjelaskan perilaku pengeringan buah amla. Buah amla dikeringkan menggunakan pengeringan matahari dan pengeringan oven pada suhu udara pengeringan yang berbeda. Pengaruh ketebalan sampel pada proses pengeringan buah amla juga diamati. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model Midilli dkk. merupakan model yang paling sesuai untuk menjelaskan perilaku pengeringan buah amla dengan nilai  $R^2$  tertinggi. Perpindahan kelembaban dapat dijelaskan dengan baik oleh difusivitas kelembaban efektif dan ketergantungan suhu dari difusivitas kelembaban efektif ditunjukkan oleh hubungan Arrhenius. Difusivitas kelembaban efektif dari buah amla bervariasi pada berbagai kondisi pengeringan dari  $5,747 \times 10^{-10} - 1,242 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  dan  $4,522 \times 10^{-10} - 9,213 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  masing-masing untuk irisan I dan irisan II. Energi aktivasi yang diperlukan untuk mengeringkan buah amla sebesar 20,230 kJ/mol untuk irisan I dan 22,006 kJ/mol untuk irisan II. Parameter kinetika yang diperoleh dapat digunakan untuk memprediksi hasil eksperimen, merancang peralatan dan menjadi acuan dalam menjalankan proses pada skala produksi.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia dan Universitas Syiah Kuala yang telah mendukung penelitian ini. Karya ini merupakan hasil hibah penelitian program Pendidikan Magister menuju Doktor untuk Sarjana Unggul (PMDSU) Batch V.

### DAFTAR PUSTAKA

- Alara, O. R., N. H. Abdurahman, and O. A. Olalere. 2019. Mathematical modelling and morphological properties of thin layer oven drying of *Vernonia amygdalina* leaves. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 18(3):309–315.
- Babu, A. K., G. Kumaresan, V. A. Aroul, and R. Velraj. 2018. Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90(April):536–556.
- Chaikul, P., M. Kanlayavattanukul, J. Somkumnerd, and N. Lourith. 2021. *Phyllanthus emblica* L. (amla) branch: A safe and effective ingredient against skin aging. *Journal of Traditional and Complementary Medicine* 11(5):390–399.
- Doymaz, I. 2012. Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (*Diospyros kaki* L.). *Energy Conversion and Management* 56:199–205.
- Gudapaty, P., S. Indavarapu, and G. R. Korwar. 2010. Effect of open air drying, LPG based drier and pretreatments on the quality of Indian gooseberry (aonla). *Journal of Food Science and Technology* 47(5):541–548.
- Hashim, N., O. Daniel, and E. Rahaman. 2014. A Preliminary Study: Kinetic Model of Drying Process of Pumpkins (*Cucurbita Moschata*) in a Convective Hot Air Dryer. *Italian Oral Surgery* 2:345–352.
- Inyang, U. E., I. O. Oboh, and B. R. Etuk. 2018. Kinetic Models for Drying Techniques—Food Materials. *Advances in Chemical Engineering and Science* 08(02):27–48.
- Khan, M. S., F. A. Qais, and I. Ahmad. 2019. *Indian Berries and Their Active Compounds: Therapeutic Potential in Cancer Prevention*. Page *New Look to Phytomedicine*. Elsevier Inc.
- Ling, A. L. M., S. Yasir, P. Matanjun, and M. F. Abu Bakar. 2015. Effect of different drying techniques on the phytochemical content and antioxidant activity of *Kappaphycus alvarezii*. *Journal of Applied Phycology* 27(4):1717–1723.
- Minj, P., K. K. Singh Mahilang, J. Diamond Raj, and K. Sonboier. 2018. Studies on some Drying Characteristics of Amla. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 7(2):2113–2118.
- Naderinezhad, S., N. Etesami, A. P. Najafabady, and M. G. Falavarjani. 2016. Mathematical modeling of drying of potato slices in a forced convective dryer based on important parameters. *Food Science and Nutrition* 4(1):110–118.

- Nag, S., and K. K. Dash. 2016. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics and moisture diffusivity study of elephant apple. *International Food Research Journal* 23(6):2594–2600.
- Onwude, D. I., N. Hashim, R. B. Janius, N. M. Nawi, and K. Abdan. 2016. Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables : A Review 15.
- Patil, R. C., and R. R. Gawande. 2018. Drying characteristics of amla candy in solar tunnel greenhouse dryer. *Journal of Food Process Engineering* 41(6):1–11.
- Raaf, A., T. W. Putra, F. Mulana, Y. Syamsuddin, and M. D. Supardan. 2022. Investigation of kinetics of amla (*Emblca officinalis*) fruit drying process. *South African Journal of Chemical Engineering* 41(November 2021):10–16.
- Rosa, D. P., D. Cantú-Lozano, G. Luna-Solano, T. C. Polachini, and J. Telis-Romero. 2015. Mathematical modeling of orange seed drying kinetics. *Ciencia e Agrotecnologia* 39(3):291–300.