

## **Pemodelan Kinetika Pengeringan Daun Bidara (*Ziziphus Spina-Christi* (L.)) Dengan Metode Pengeringan Tenaga Surya**

### ***(Kinetics Modelling of Ziziphus spina-christi (L.) Leaves Drying Using Solar Drying Method)***

**Nunik Lestari<sup>1)\*</sup> dan Samsuar<sup>2)</sup>**

<sup>1)\*</sup> Program Studi Pendidikan Teknologi Pertanian, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Makassar

<sup>2)</sup> Program Studi Keteknikan Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Hasanuddin

<sup>\*</sup> E-mail korespondensi: nunik.lestari@unm.ac.id

#### **ABSTRACT**

The drying method used can affect the drying characteristics and quality of the final product such as color parameters. The purpose of this research is to study the kinetics of *Z. spina-christi* leaves drying, find a mathematical model that best fits the drying characteristics, and analyze the color change of dried *Z. spina-christi* leaves and their brew. The drying process is carried out with 2 treatments, namely using a solar dryer and by drying in an open space using direct sunlight. There are 13 mathematical models of thin layer drying selected to simulate the drying characteristics of *Z. spina-christi* leaves. Identification of the Lab\* value is used to calculate the browning index of the leaves due to the drying method used. The results stated that the solar power dryer could increase the drying rate of *Z. spina-christi* leaves, thus shortening the drying time. The Diffusion Approach model is the most accurate mathematical model in describing the drying characteristics of *Z. spina-christi* leaves for the two drying methods tested based on the resulting constant values. Each drying method affects the browning reaction of the dried *Z. spina-christi* leaves which also has an impact on the color of the brew, where drying in direct sunlight will produce a darker color of the dried leaves and brew.

**Keywords:** *Z. spina-christi*, Drying, Solar Radiation, Color, Mathematical Model.

#### **ABSTRAK**

Metode pengeringan yang digunakan dapat mempengaruhi karakteristik pengeringan dan kualitas produk akhir seperti parameter warna. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan kajian mengenai kinetika pengeringan daun bidara, mencari model matematika yang paling sesuai dengan karakteristik pengeringannya, serta menganalisis perubahan warna daun bidara kering dan hasil seduhannya. Proses pengeringan dilakukan dengan 2 perlakuan, yaitu menggunakan alat pengering tenaga surya dan dengan penjemuran di ruang terbuka memanfaatkan sinar matahari secara langsung. Terdapat 13 model matematika pengeringan lapis tipis yang dipilih untuk simulasi karakteristik pengeringan daun bidara. Identifikasi nilai Lab\* digunakan untuk menghitung indeks pencoklatan (browning index) daun akibat metode pengeringan yang digunakan. Hasil pengujian menyatakan bahwa alat pengering tenaga surya dapat meningkatkan laju pengeringan daun bidara, sehingga mempersingkat durasi pengeringan. Adapun model Diffusion Approach merupakan model matematika yang paling akurat dalam mendeskripsikan karakteristik pengeringan daun bidara untuk kedua metode pengeringan yang diujikan berdasarkan nilai konstanta yang dihasilkan. Masing-masing metode pengeringan mempengaruhi reaksi pencoklatan dari daun bidara kering yang juga berdampak pada warna seduhannya, dimana pengeringan dengan metode penjemuran secara langsung di bawah sinar matahari akan menghasilkan warna daun kering dan hasil seduhan yang lebih gelap.

**Kata Kunci:** Bidara, Pengeringan, Radiasi Matahari, Warna, Model Matematika.

## PENDAHULUAN

Kegiatan mengeringkan bahan pangan menggunakan sinar matahari secara langsung di udara terbuka telah dilakukan sejak dahulu. Kegiatan ini dilakukan dengan tujuan untuk pengawetan bahan pangan, atau sebagai bagian integral dari proses produksi, seperti kayu dan tembakau. Proses pengeringan di udara terbuka memiliki banyak kelemahan, yaitu produk rusak karena hujan, angin, kelembaban dan debu; susut hasil karena burung dan hewan lainnya; penurunan hasil karena pembusukan; serangan serangga dan jamur; dan lain sebagainya. Namun demikian cara ini masih terus digunakan hingga saat ini dengan alasan murah, sedangkan pengeringan mekanis buatan membutuhkan energi dan mahal, yang pada akhirnya dapat meningkatkan biaya produk (Lingayat et al., 2021).

Teknologi pengeringan dengan energi matahari menawarkan alternatif melalui alat pengering tenaga surya, dimana produk hasil pengeringannya dalam kondisi yang lebih bersih dari penjemuran biasa, serta tanpa biaya untuk energi pengeringan. Teknologi alat pengering tenaga surya dapat menghemat energi, waktu, menempati area yang lebih sedikit, meningkatkan kualitas produk, membuat proses lebih efisien, serta melindungi lingkungan. Alat pengering tenaga surya tipe efek rumah kaca (ERK) merupakan salah satu jenis pengering yang banyak digunakan untuk mengeringkan bahan pangan, baik dalam skala kecil maupun skala industri.

Alat pengering tenaga surya tipe ERK memiliki kelebihan karena dapat melindungi bahan yang dikeringkan dari degradasi mutu akibat paparan sinar matahari secara langsung, misalnya seperti pada pengeringan bahan-bahan herbal. Daun bidara (*Ziziphus spinachristi* (L.)) merupakan salah satu jenis tanaman herbal yang sesuai untuk dikeringkan, guna mengembangkan potensinya sebagai bahan minuman herbal. Produk herbal daun bidara kering dapat digunakan sebagai bahan pembuatan teh daun bidara, yang sekaligus akan mengembangkan keragaman jenis produk teh di Indonesia. Potensi ini semakin baik karena pada daun bidara terkandung beberapa senyawa fenolik dengan jumlah yang signifikan (El-ishaq & Nangere, 2016).

Untuk mengeringkan daun bidara, maka perlu memperhatikan beberapa parameter pengeringan guna mengoptimalkan proses pengeringannya. Parameter yang dimaksud misalnya seperti metode pengeringan, kelembaban relatif (RH), suhu pengeringan, durasi pengeringan, dan lain sebagainya, dimana parameter-parameter tersebut dapat mempengaruhi perilaku pengeringan. Selain hal-hal tersebut, kadar air dan laju pengeringan juga perlu diidentifikasi guna mengetahui kinetika pengeringan daun bidara. Identifikasi kinetika pengeringan daun bidara pada kondisi parameter-parameter tertentu dapat dilakukan dengan model matematika pengeringan. Persamaan-persamaan dari model matematika ini selanjutnya dapat digunakan untuk menyimulasikan performa dari suatu sistem pengeringan yang melibatkan parameter-parameter tertentu (Fithriani et al., 2016).

Hingga saat ini, masih sangat jarang ditemui kajian yang membahas tentang kinetika dan model matematika pengeringan daun bidara. Studi yang telah ada masih terbatas pada jenis pemodelan matematika yang ditujukan untuk menggambarkan proses isoterm penyerapan kelembaban daun bidara (Saad et al., 2014). Sebagian besar penelitian tentang daun bidara lainnya lebih berfokus pada kajian senyawa fenolat total dan aktivitas antioksidannya, seperti yang dilakukan oleh Kusriani et al. (2015). Oleh karena itu perlu dilakukan riset tentang kinetika pengeringan daun bidara, yang bahasannya juga mencakup tentang pemodelan matematika serta tampilan warna daun bidara kering dan hasil seduhannya.

### Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan kajian mengenai kinetika pengeringan daun bidara, mencari model matematika yang paling sesuai dengan karakteristik pengeringan daun bidara, dan menganalisis perubahan warna daun bidara kering serta hasil seduhannya sebagai akibat dari proses pengeringan dengan memanfaatkan energi matahari.

## METODOLOGI PENELITIAN

### Alat

Penelitian ini menggunakan alat pengering tenaga surya tipe efek rumah kaca (ERK) dan *tray* sebagai wadah bahan yang dikeringkan. Alat pengering yang digunakan berukuran 150 m<sup>2</sup>, sedangkan *tray* berukuran 1200 mm x 800 mm x 50 mm (Gambar 1). Adapun instrumen pengukuran yang digunakan berupa *solar power meter* SM206 untuk pengukuran radiasi matahari, *colorimeter* CS-10 untuk pengukuran warna, *hygrometer* Misol DS102 untuk pengukuran kelembaban relatif, *temperature data logger* merk Elitech RC-4 untuk pengukuran suhu, KERN ABT 320-4M *analytical balance* untuk pengukuran massa bahan, serta oven BINDER ED-240 dan *glass desiccator* 300 mm untuk pengukuran kadar air bahan.



Gambar 1. Alat pengering ERK yang digunakan (Irfan et al., 2020)

### Bahan

Adapun bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah daun bidara (*Ziziphus spina-christi* (L.)). Daun bidara dipetik 2 jam sebelum proses pengeringan dimulai. Daun bidara diperoleh dari Kelurahan Buntusu, Kecamatan Tamalanrea, Kota Makassar, Sulawesi Selatan. Daun bidara yang digunakan adalah bagian daun yang cukup tua dengan ciri warna lebih hijau gelap, yang kisaran nilai Lab\* warna yaitu 41,56 ± 0,51 (L\*), -18,78 ± 0,98 (a\*), dan 21,28 ± 0,94 (b\*).

### Prosedur Penelitian

Ada 2 perlakuan pengeringan dalam penelitian ini, yaitu pengeringan daun bidara menggunakan alat pengering ERK (B1) dan pengeringan daun bidara di bawah sinar matahari langsung (B2), yang sekaligus sebagai kontrol. Masing-masing sampel daun bidara yang akan dikeringkan disusun pada *tray* dan diatur supaya tidak bertumpukan. Proses pengeringan berlangsung hingga daun bidara kering dan massanya telah konstan. Untuk pembuatan seduhan daun bidara kering dilakukan dengan menggunakan 3 gram daun bidara kering yang diseduh dengan 100 ml air panas selama 5 menit (Adhamatika & Murtini, 2021). Sedangkan untuk pengukuran parameter pengeringan seperti radiasi matahari, kelembaban relatif (RH), dan suhu udara dilakukan setiap 30 menit.

### Pengamatan dan Analisis Data

#### a. Kadar air

Kadar air sampel diukur dalam basis kering. Identifikasi massa kering daun bidara dilakukan dengan metode oven pada suhu 105 °C (AOAC, 1995). Kadar air basis kering dihitung dengan persamaan berikut (Fudholi *et al.*, 2012):

$$M = \frac{w(t) - d}{d} \times 100\% \dots \dots \dots (1)$$

Dimana M adalah kadar air basis kering (%), d adalah massa kering bahan (g), dan w(t) adalah massa bahan saat t (g).

#### b. Laju pengeringan

Laju pengeringan menggambarkan berkurangnya sejumlah air bahan selama durasi waktu tertentu, yang juga dapat merupakan indikasi kecepatan proses pengeringan. Perhitungan laju pengeringan dilakukan dengan pendekatan persamaan berikut (Darvishi *et al.*, 2014):

$$DR = \frac{M_t - M_{t+dt}}{dt} \dots \dots \dots (2)$$

Dimana M<sub>t</sub> adalah kadar air basis kering saat t (%), M<sub>t+dt</sub> adalah kadar air basis kering saat t+dt (%), dan dt adalah waktu pengeringan t<sub>t+1</sub>-t<sub>t</sub> (h).

#### c. Moisture ratio (MR)

Nilai *moisture ratio* (MR) daun bidara hasil observasi digunakan untuk menghitung model matematika pengeringan lapisan tipis. Nilai

MR dihitung dengan menggunakan pendekatan Persamaan (3) berikut (Saxena & Dash, 2015):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \dots\dots\dots (3)$$

Dimana  $M_t$  adalah kadar air pada waktu  $t$  (%),  $M_o$  adalah kadar air awal (%), dan  $M_e$  adalah kadar air kesetimbangan (%).

**d. Model matematika**

Ada beberapa pendekatan empiris untuk pemodelan kinetika pengeringan. Pada penelitian ini terdapat 13 model matematis yang terdiri dari model kurva pengeringan lapisan tipis semi teoritis dan empiris, yang diuji untuk memilih model terbaik untuk menggambarkan kurva pengeringan daun bidara (Tabel 1). Analisis regresi non-linier dilakukan dengan bantuan *software Microsoft Excel 2019*, dan menghasilkan konstanta-konstanta untuk melengkapi persamaan model matematika pengeringan lapisan tipis.

Koefisien determinasi ( $R^2$ ) merupakan salah satu kriteria utama untuk memilih

persamaan terbaik yang menggambarkan kurva pengeringan daun bidara. Selain koefisien determinasi, kriteria lain juga ditentukan oleh parameter statistik seperti  $\chi^2$  (*chi square* tereduksi) dan RMSE (*root mean square error*). Untuk menentukan model yang paling cocok, nilai  $R^2$  harus lebih tinggi dan nilai  $\chi^2$  serta RMSE harus lebih rendah (Hawa et al., 2019). Kriteria-kriteria ini dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Demiray & Tulek, 2014):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_i - MR_{pre,i}) \cdot \sum_{i=1}^N (MR_i - MR_{exp,i})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (MR_i - MR_{pre,i})^2] \cdot [\sum_{i=1}^N (MR_i - MR_{exp,i})^2]}} \dots\dots (4)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N-z} \dots\dots\dots (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N}} \dots\dots\dots (6)$$

Dimana  $MR_{pre,i}$  adalah rasio kelembaban yang diprediksi,  $MR_{exp,i}$  adalah rasio kelembaban eksperimental,  $n$  adalah jumlah konstanta, dan  $N$  adalah jumlah pengamatan.

Tabel 1. Model matematika pengeringan lapis tipis yang diterapkan pada penelitian ini

No.	Nama Model	Persamaan	Referensi
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Fithriani et al., 2016
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Hawa et al., 2019
3	Modified Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$	Fudholi et al., 2012
4	Henderson-Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Lestari & Samsuar, 2021
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + b$	Demiray & Tulek, 2014
6	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Darvishi et al., 2014
7	Modified Midilli	$MR = \exp(-kt^n) + bt$	Nag & Dash, 2016
8	Modified Midilli-Kucuk	$MR = a \exp(-kt^n) + b$	Hadibi et al., 2021
9	Two-term Exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	Saxena & Dash, 2015
10	Diffusion Approach	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	Murali et al., 2019
11	Weibull Distribution-I	$MR = a - b \exp[-(kt^n)]$	Babalıs et al., 2006
12	Weibull Distribution-II	$MR = a - b \exp(-kt^n)$	Mumdada et al., 2010
13	Jena-Das	$MR = a \exp(-kt + b\sqrt{t}) + c$	Ashraf et al., 2012

**e. Effective moisture diffusivity ( $D_{eff}$ )**

Pengeringan sebagian besar bahan pangan terjadi pada periode laju menurun (*falling rate period*), dimana pergerakan air terjadi terutama oleh difusi molekuler (Taheri-Garavand & Meda, 2018). Untuk sebagian besar bahan biologi, hukum kedua Fick tentang difusi telah banyak digunakan untuk menggambarkan proses pengeringan selama periode laju menurun, dengan Persamaan (7) sebagai berikut (Jiang et al., 2017):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla[D_{eff}(\nabla M)] \dots\dots\dots (7)$$

Dimana  $d_{eff}$  adalah difusivitas kelembaban efektif (*effective moisture diffusivity*) yang mewakili bentuk dari semua mekanisme perpindahan air.

Parameter ini biasanya ditentukan dari kurva pengeringan eksperimental. Solusi dari hukum kedua Fick dalam geometri slab ditunjukkan pada Persamaan (8) (Demiray & Tulek, 2014), dengan asumsi migrasi kelembaban hanya dengan difusi, suhu konstan dan difusivitas kelembaban efektif, serta penyusutan diabaikan sebagai berikut:

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

Dimana L adalah setengah tebal dari sampel berbentuk slab (m), dan n adalah bilangan bulat positif.

Dalam praktiknya, hanya suku pertama dari Persamaan (8) yang digunakan, sehingga disederhanakan dan menghasilkan Persamaan (9) (Darvishi *et al.*, 2014) berikut:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \dots\dots\dots(9)$$

*Effective moisture diffusivity* ( $D_{eff}$ ) dapat ditentukan melalui slope dari plot data pada grafik  $\ln MR$  terhadap waktu melalui Persamaan (10) (Saxena & Dash, 2015):

$$\text{Slope} = -D_{eff} \left(\frac{\pi^2}{4L^2}\right) \dots\dots\dots(10)$$

**f. Warna**

Pengukuran nilai  $Lab^*$  daun bidara dilakukan untuk melihat perubahan warna akibat proses pengeringan, yang juga berdampak pada warna seduhan daun bidara kering. Seduhan dibuat dengan menambahkan 5 gram daun bidara kering kedalam 100 ml air panas selama 5 menit. Hasil seduhan lalu disaring dan disimpan dalam *cup* plastik yang ditutup dengan *sealer*, untuk selanjutnya segera dilakukan analisis warna.

Nilai  $Lab^*$  hasil seduhan lalu diplotkan dan dianalisis dengan bantuan *software* ColorCalculator v7.77. Hasil pengukuran nilai  $Lab^*$  daun bidara selanjutnya dipakai dalam perhitungan *browning index* (BI). BI adalah nilai indeks warna bahan yang menunjukkan adanya perubahan warna sebagai akibat dari proses pengeringan. BI dihitung dengan Persamaan (11) (Mukhtarom *et al.*, 2016):

$$BI = \frac{[100(x-0,31)]}{0,17} \dots\dots\dots(11)$$

Untuk menghitung nilai x yang terdapat pada Persamaan (11), maka dihitung dengan pendekatan Persamaan (12) sebagai berikut:

$$x = \frac{(a^*+1,75L^*)}{(5,645L^*+ a^*-3,012b^*)} \dots\dots\dots(12)$$

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Parameter Pengeringan**

Dalam pengeringan yang mengandalkan energi matahari, kondisi atmosfer pengeringan seperti radiasi matahari, suhu udara, dan kelembaban relatif (RH), sangat mempengaruhi proses pengeringan dan laju pelepasan air bahan. Oleh karena itu, maka dalam penelitian ini parameter-parameter pengeringan tersebut dipantau setiap 30 menit selama proses pengeringan berlangsung. Nilai parameter pengeringan bervariasi dan berkisar antara 721,8 – 920,6 W/m<sup>2</sup> untuk radiasi matahari, 34,1 – 55,7 °C untuk suhu udara di dalam pengering ERK, 32,8 – 40,9 °C untuk suhu udara di lingkungan terbuka, 23 – 42% untuk RH di dalam pengering ERK, dan 30 – 64% untuk RH di lingkungan terbuka, seperti ditampilkan pada Gambar 2.

Dapat dilihat pada Gambar 2 bahwa setiap kali intensitas radiasi matahari meninggi, maka RH udara menjadi lebih rendah, sehingga menguntungkan dan baik bagi kondisi pengeringan. Hal ini terjadi baik untuk kondisi atmosfer di dalam alat pengering ERK, maupun pengeringan yang dilakukan pada udara terbuka di bawah sinar matahari langsung. Jika dibandingkan, RH di dalam ruang pengering ERK lebih rendah dari lingkungan di luar alat pengering, yang disebabkan suhu yang lebih tinggi pada ruang pengering ERK. Hal ini akan berdampak pada peningkatan perbedaan tekanan uap air antara daun bidara dan ruangan di sekitarnya, sehingga turut meningkatkan laju perpindahan air meninggalkan bahan (Tiwari, 2016).

Proses pengeringan yang memanfaatkan energi sinar matahari cenderung tidak bisa dikontrol, dan selalu mengikuti cuaca. Faktor-faktor lingkungan seperti intensitas penyinaran matahari hingga hembusan angin sangat berpengaruh terhadap jalannya pengeringan. Namun untuk pengeringan menggunakan alat pengering ERK, faktor aliran udara cenderung lebih beragam karena dilakukan pada ruang tertutup dan menggunakan kipas dengan kecepatan yang konstan. Segala bentuk fluktuasi parameter pengeringan dalam penelitian ini pada akhirnya akan

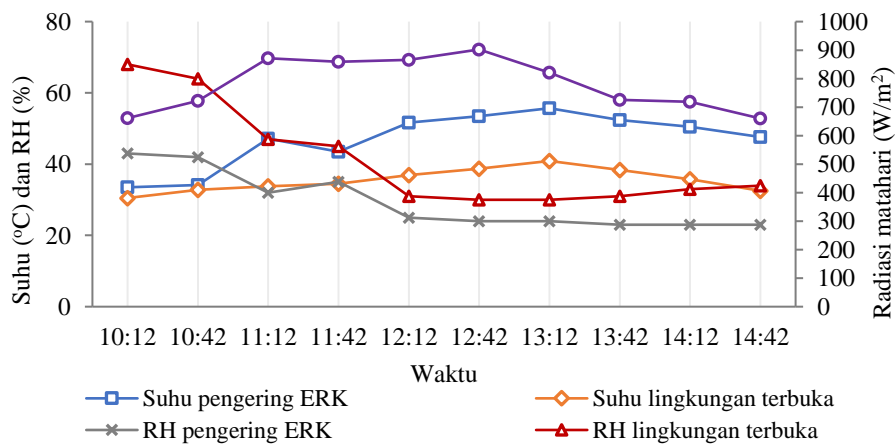
mempengaruhi proses transfer panas dan massa yang berbeda dari tiap perlakuan.

**Kinetika Pengeringan**

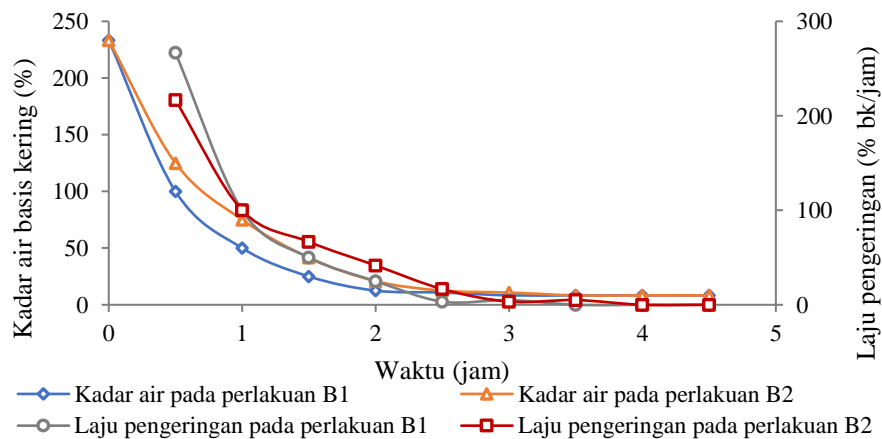
Laju pengeringan dan penurunan kadar air daun bidara terhadap waktu pengeringan ditampilkan pada Gambar 3. Dalam penelitian ini dibutuhkan waktu antara 3 – 3,5 jam untuk dapat menurunkan kadar air daun bidara hingga dibawah 8%, atau sebesar 7,69% dari kedua perlakuan yang ada. Batas kadar air 8% dirujuk dari kadar air maksimal untuk teh hijau (SNI 3945:2016). Acuan ini dipakai karena olahan

daun bidara yang dikeringkan juga ditujukan untuk jenis minuman teh.

Total durasi pengeringan untuk sampel yang dikeringkan dalam pengering ERK (B1) secara substansial cenderung lebih singkat dibandingkan dengan pengeringan di bawah sinar matahari langsung (B2). Hal ini tidak terlepas dari kondisi atmosfer pengeringan, dimana faktor suhu, RH, dan kecepatan udara pengering akan sangat mempengaruhi proses pelepasan air dari dalam bahan, disamping faktor-faktor lainnya seperti tekanan parsial bahan, ukuran bahan yang dikeringkan, serta kadar air awalnya.



Gambar 2. Perbandingan kondisi atmosfer pengeringan



Gambar 3. Laju pengeringan dan penurunan kadar air daun bidara terhadap waktu pengeringan

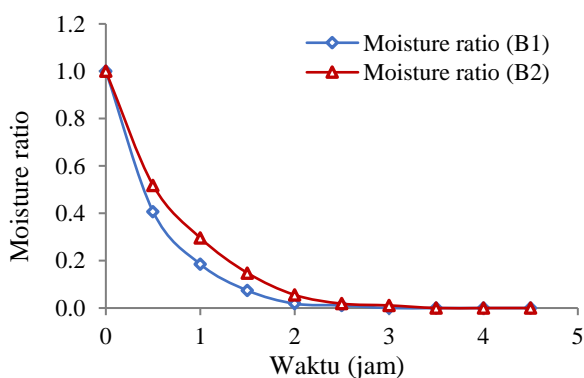
Hasil yang ditampilkan pada Gambar 3 menunjukkan sejumlah besar air yang menguap dari daun bidara, sehingga diawal proses pengeringannya kadar air pun turun secara signifikan. Penguapan air terbanyak terjadi pada 30 menit awal pengeringan, yaitu sebesar 266,67 % bk/jam (B1) dan 216,67 % bk/jam (B2). Penguapan sejumlah besar air tersebut

kemudian berangsur menurun seiring dengan berkurangnya jumlah air bebas yang terkandung di dalam bahan. Atau dengan kata lain, semakin lama waktu pengeringan, maka laju pengeringan dan penurunan kadar airnya juga semakin menurun hingga akhirnya mendekati keseimbangan.

Dari profil kondisi atmosfer pengeringan, perlakuan B1 lebih diuntungkan karena suhu udara pengering di dalam pengering ERK lebih tinggi dan RH yang lebih rendah. Kondisi ini menyebabkan semakin besar energi panas yang dipindahkan udara menuju bahan. Suhu udara yang lebih tinggi juga menyebabkan RH menurun sehingga terjadi perbedaan tekanan uap antara permukaan bahan dan ruang pengering. Perbedaan tekanan uap yang semakin besar akan mempercepat laju pengeringan bahan. Hal inilah yang menyebabkan pengeringan bahan pada perlakuan B1 relatif lebih cepat mencapai kadar air target, walaupun pada pengeringan di udara terbuka juga sangat terbantu oleh kecepatan angin yang melalui bahan.

### Evaluasi Model Pengeringan

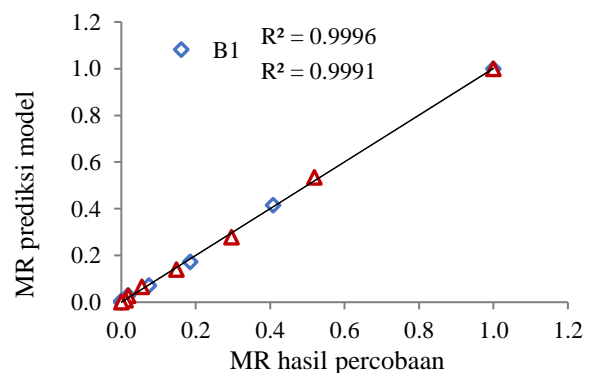
*Moisture ratio* daun bidara selama proses pengeringan ditentukan berdasarkan kehilangan massa sampel yang diidentifikasi melalui kadar air, seperti ditampilkan pada Gambar 4. Penurunan massa akibat hilangnya air dalam bahan diukur setiap 30 menit selama proses pengeringan hingga mencapai massa konstan. Grafik hubungan antara *moisture ratio* terhadap waktu yang terbentuk menginterpretasikan karakteristik pengeringan daun bidara. Pola penurunan *moisture ratio* sepanjang waktu pengeringan menggambarkan peran parameter-parameter pengeringan (suhu, RH, radiasi matahari, dan aliran udara) dalam menurunkan kadar air bahan. Parameter-parameter pengeringan tersebut akan berdampak terhadap nilai konstanta model pengeringan, karena perannya yang sangat besar terhadap difusivitas air bahan (Fithriani *et al.*, 2016).



Gambar 4. Penurunan *moisture ratio* sepanjang waktu pengeringan

Grafik pola penurunan *moisture ratio* pada Gambar 4 selanjutnya digunakan untuk analisis dalam mencari konstanta-konstanta pengeringan model yang terdapat pada Tabel 1. Berdasarkan nilai konstanta yang diperoleh melalui analisis regresi non-linier (Tabel 2), maka diperoleh nilai *moisture ratio* prediksi model. Hasil yang diperoleh selanjutnya dilakukan analisis tingkat kesesuaian dengan beberapa indikator, untuk menentukan model yang paling akurat dalam menginterpretasikan karakteristik pengeringan daun bidara.

Hasil analisis menunjukkan bahwa model *Diffusion Approach* merupakan model matematika yang paling sesuai untuk menggambarkan karakteristik pengeringan daun bidara, dengan persamaan model matematika  $MR = a \exp(-1,75696t) + (1 - 1,14758) \exp[-(1,75696)(0,99877)t]$  untuk perlakuan B1, dan  $MR = a \exp(-1,11276t) + (1 - 1,27923) \exp[-(1,11276)(0,61087)t]$  untuk perlakuan B2. Hasil ini didukung dengan nilai analisis statistik keakuratan model matematika, dimana nilai  $R^2$  lebih tinggi serta nilai  $\chi^2$  dan RMSE yang lebih rendah (Tabel 2). Meskipun semua model menunjukkan nilai  $R^2$  yang lebih besar dari 0,80, serta beberapa model memiliki nilai  $X^2$  yang serupa untuk perlakuan tertentu, namun jika ditinjau lebih teliti dari ketiga indikator kesesuaian tersebut maka *Diffusion Approach* adalah model dengan nilai ketiga indikator yang paling memenuhi persyaratan.



Gambar 5. Hubungan antara MR hasil percobaan dan MR prediksi model pada pengeringan daun bidara untuk metode pengeringan berbeda

Akurasi model *Diffusion Approach* dalam bentuk perbandingan MR hasil prediksi model terhadap MR hasil percobaan, ditampilkan pada Gambar 5. Hasil tersebut mengindikasikan

tingkat akurasi yang baik, dimana menurut Prasetyo et al. (2018) bentuk kurva perbandingan yang mendekati 45° menunjukkan kesesuaian yang tinggi antara kedua MR yang dibandingkan. Dengan demikian, maka model pengeringan *Diffusion Approach* beserta konstanta-konstanta

pengeringannya pada Tabel 2 dapat digunakan untuk memprediksi kandungan air pada daun bidara, sehingga proses pengeringannya dapat dikendalikan sesuai dengan hasil akhir yang ingin dicapai.

Tabel 2. Konstanta model kurva pengeringan lapis tipis dan hasil analisis statistik pada tiap perlakuan

No.	Model	Perlakuan	Konstanta	R <sup>2</sup>	X <sup>2</sup>	RMSE
1	Lewis	B1	k = 1,75728	0,99960	0,00004	0,00624
		B2	k = 1,29580	0,99870	0,00018	0,01265
2	Page	B1	k = 1,75085; n = 0,98361	0,99964	0,00004	0,00609
		B2	k = 1,29383; n = 1,04284	0,99871	0,00015	0,01177
3	Modified Page	B1	k = 1,76727; n = 0,98361	0,99964	0,00004	0,00609
		B2	k = 1,32510; n = 1,03043	0,99821	0,00020	0,01337
4	Henderson-Pabis	B1	k = 1,75551; a = 0,99874	0,99960	0,00004	0,00622
		B2	k = 1,29774; a = 1,00175	0,99868	0,00018	0,01264
5	Logarithmic	B1	k = 1,73786; a = 0,94874; b = 0,00012	0,99961	0,00036	0,01791
		B2	k = 1,34977; a = 1,02102; b = 0,00011	0,99785	0,00025	0,01489
6	Midilli	B1	k = 1,75341; n = 0,98580; a = 1,00017; b = 0,00010	0,99963	0,00004	0,00618
		B2	k = 1,29095; n = 1,04503; a = 0,99757; b = 0,00010	0,99871	0,00016	0,01184
7	Modified Midilli	B1	k = 1,76544; n = 0,99784; b = 0,00010	0,99958	0,00004	0,00632
		B2	k = 1,28794; n = 1,03341; b = 0,00011	0,99877	0,00016	0,01198
8	Modified Midilli-Kucuk	B1	k = 1,75026; n = 0,98396; a = 0,99947; b = 0,00010	0,99964	0,00004	0,00611
		B2	k = 1,29096; n = 1,04451; a = 0,99698; b = 0,00013	0,99872	0,00015	0,01178
9	Two Term Exponential	B1	k = 1,75729; a = 0,99875	0,99960	0,00004	0,00624
		B2	k = 1,46373; a = 1,41532	0,99879	0,00014	0,01139
10	Diffusion Approach	B1	k = 1,75696; a = 1,14758; b = 0,99877	0,99966	0,00004	0,00620
		B2	k = 1,11276; a = 1,27923; b = 0,61087	0,99911	0,00010	0,00933
11	Weibull Distribution-I	B1	k = 1,75025; n = 1,03325; a = 1,00608; b = 0,00661	0,99942	0,00006	0,00754
		B2	k = 1,29095; n = 1,04503; a = 1,00518; b = 0,00761	0,99872	0,00015	0,01174
12	Weibull Distribution-II	B1	k = 1,78026; n = 0,97396; a = 0,99680; b = 0,00142	0,99950	0,00006	0,00733
		B2	k = 1,29095; n = 0,99486; a = 0,99789; b = 0,00132	0,99873	0,00019	0,01299
13	Jena-Das	B1	k = 1,75551; a = 0,99874; b = 0,00484; c = 0,00002	0,99960	0,00004	0,00629
		B2	k = 1,37191; a = 0,99889; b = 0,07563; c = 0,00004	0,99866	0,00017	0,01225

### Effective Moisture Diffusivity

Nilai *effective moisture diffusivity* ( $D_{\text{eff}}$ ) daun bidara untuk perlakuan B1 adalah  $2,4166 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  dengan nilai  $R^2$  yaitu 0,9904, dan untuk perlakuan B2 adalah  $2,2867 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  dengan  $R^2$  yaitu 0,9884. Nilai  $D_{\text{eff}}$  daun bidara ini

berada dalam kisaran umum  $10^{-9}$  hingga  $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  untuk pengeringan bahan makanan (Maskan et al., 2002).

*Effective moisture diffusivity* pada proses pengeringan menunjukkan pergerakan air bahan dalam melakukan proses difusi ke



permukaan karena adanya perbedaan tekanan uap air. Difusivitas tersebut akan meningkat dengan meningkatnya suhu udara pengering (Kadam et al., 2011). Hal inilah yang menyebabkan nilai  $D_{eff}$  B1 sedikit lebih tinggi dari B2, karena suhu udara pada pengering ERK yang lebih tinggi dari lingkungan luar.

### Evaluasi Warna Produk

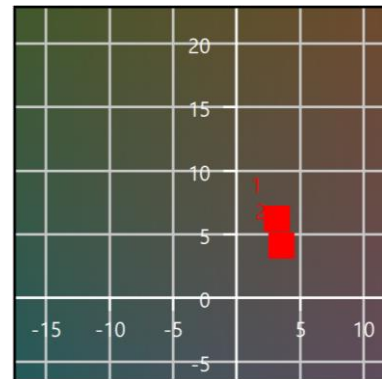
Pengaruh metode pengeringan terhadap warna daun bidara kering serta hasil seduhannya diidentifikasi melalui nilai warna  $L^*$ ,  $a^*$ , dan  $b^*$  pada Tabel 3. Warna daun bidara yang dikeringkan mengalami perubahan menjadi lebih gelap sebagai akibat adanya reaksi pencoklatan non-enzimatik selama proses pengeringan (Zielinska & Markowski, 2012). Reaksi pencoklatan ini diindikasikan dengan nilai *browning index* (BI), dimana nilai *browning index* untuk perlakuan B1 adalah 44,64 dan perlakuan B2 adalah 52,76. Hasil tersebut menunjukkan bahwa daun bidara yang dikeringkan pada sinar matahari langsung lebih gelap dibandingkan pada pengering ERK. Hal ini disebabkan oleh paparan langsung sinar matahari yang banyak mendegradasi klorofil daun (Lagawa et al., 2019), ditambah lagi dengan durasi pengeringan pada perlakuan B2 yang lebih panjang. Adapun warna seduhan daun bidara kering yang dipengaruhi oleh reaksi pencoklatan tersebut digambarkan melalui diagram kromatisasi pada Gambar 6.

Tabel 3. Rata-rata nilai warna daun bidara kering dan hasil seduhannya pada metode pengeringan yang berbeda

Sampel		$L^*$	$a^*$	$b^*$
Daun bidara kering	B1	37.39	-10.98	19.58
	B2	34.76	-10.69	20.79
Seduhan daun bidara kering	B1	28.78	3.16	6.24
	B2	26.81	3.53	4.11

Hasil pengujian warna seduhan daun bidara kering menunjukkan bahwa metode pengeringan di bawah sinar matahari langsung (B2) juga memberikan warna seduhan yang sedikit lebih gelap. Menurut Adhamatika & Murtini (2021) dan Yulianto et al. (2007), penggunaan sinar matahari langsung akan menghasilkan suhu pengeringan yang relatif lebih rendah dan tidak stabil. Hal tersebut

menyebabkan masih aktifnya enzim untuk proses oksidasi alami polifenol pada daun, yaitu polifenol oksidase, yang selanjutnya akan menjadi oksidator untuk beberapa komponen fenolik serta akan membentuk senyawa turunan warna seperti theaflavin dan thearubigin. Theaflavin pada seduhan daun akan memberi warna kuning, sedangkan thearubigin akan memberi kombinasi warna merah kecoklatan coklat kemerahan dan kuning (Rohdiana et al., 2013).



Gambar 6. Diagram kromatisasi warna seduhan daun bidara kering

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian disimpulkan bahwa setiap metode pengeringan daun bidara yang diterapkan menunjukkan kinetika pengeringan yang berbeda. Model *Diffusion Approach* merupakan model matematika yang paling akurat dalam mendeskripsikan karakteristik pengeringan daun bidara untuk kedua metode pengeringan yang diujikan berdasarkan nilai konstanta yang dihasilkan. Adapun persamaan matematis dari model tersebut untuk metode pengeringan menggunakan pengering ERK adalah  $MR = a \exp(-1,75696t) + (1 - 1,14758) \exp[-(1,75696)(0,99877)t]$  dengan  $R^2 = 0,99966$ ,  $X^2 = 0,00004$ , dan  $RMSE = 0,00620$ ; sedangkan untuk metode penjemuran langsung di bawah sinar matahari yaitu  $MR = a \exp(-1,11276t) + (1 - 1,27923) \exp[-(1,11276)(0,61087)t]$  dengan  $R^2 = 0,99911$ ,  $X^2 = 0,00010$ , dan  $RMSE = 0,00933$ . Masing-masing metode pengeringan mempengaruhi reaksi pencoklatan dari daun bidara kering yang juga berdampak pada warna seduhannya, dimana pengeringan dengan metode penjemuran secara langsung di

bawah sinar matahari akan menghasilkan warna daun kering dan hasil seduhan yang lebih gelap.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Adhamatika, A., & Murtini, E. S. (2021). Pengaruh metode pengeringan dan persentase teh kering terhadap karakteristik seduhan teh daun bidara (*Ziziphus mauritiana* L.). *Jurnal Pangan Dan Agroindustri*, 9(4), 196–207.
- Ashraf, Z., Hamidi-Esfahani, Z., & Sahari, M. A. (2012). Evaluation and characterization of vacuum drying of date paste. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14, 565–575.
- Darvishi, H., Asl, A. R., Asghari, A., Azadbakht, M., Najafi, G., & Khodaei, J. (2014). Study of the drying kinetics of pepper. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13(2), 130–138.
- Demiray, E., & Tulek, Y. (2014). Drying characteristics of garlic (*Allium sativum* L) slices in a convective hot air dryer. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 50(6), 779–786. <https://doi.org/10.1007/s00231-013-1286-9>
- El-ishaq, A. A. R. O., & Nangere, Z. A. (2016). Proximate and phytochemical analysis of *Ziziphus mauritiana* Lam leaves. *Frontiers in Biomedical Sciences*, 1(2), 45–49.
- Fithriani, D., Assadad, L., & Arifin, Z. (2016). Karakteristik dan Model Matematika Kurva Pengeringan Rumput Laut *Eucheuma cottonii*. *Jurnal Pascapanen Dan Bioteknologi Kelautan Dan Perikanan*, 11(2), 159. <https://doi.org/10.15578/jpbkp.v11i2.290>
- Fudholi, A., Ruslan, M., & Haw, L. (2012). Mathematical modeling of brown seaweed drying curves. In *Proceedings of the WSEAS International Conference on Applied Mathematics in Electrical and Computer Engineering*, 207–211.
- Hadibi, T., Boubekri, A., Mennouche, D., Benhamza, A., & Abdenouri, N. (2021). 3E analysis and mathematical modelling of garlic drying process in a hybrid solar-electric dryer. *Renewable Energy*, 170, 1052–1069.
- Hawa, L. C., Ubaidillah, U., & Wibisono, Y. (2019). Proper model of thin layer drying curve for taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) chips. *International Food Research Journal*, 26(1), 209–216.
- Irfan, A. M., Arimansyah, Rasyid, A. R., & Lestari, N. (2020). Unjuk kerja pengering tenaga surya tipe efek rumah kaca untuk pengeringan cabai dengan perlakuan low temperature long time blanching. *Rona Teknik Pertanian*, 13(April), 1–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.17969/rt.p.v13i2.17788>
- Jiang, J., Dang, L., Tan, H., Pan, B., & Wei, H. (2017). Thin layer drying kinetics of pregelatinized starch under microwave. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 72, 10–18.
- Kadam, D. M., Goyal, R. K., & Gupta, M. K. (2011). Mathematical modeling of convective thin layer drying of basil leaves. *Journal of Medicinal Plant Research*, 5(19), 4721–4730.
- Kusriani, R. ., Nawawi, A., & Machter, E. (2015). Penetapan kadar senyawa fenolat total dan aktivitas antioksidan ekstrak daun, buah dan biji bidara (*Ziziphus spinachristi* l.). *Psosiding SNapp2015 Kesehatan*, 311–318.
- Lagawa, I. N. C., Kencana, P. K. D., & Aviantara, I. G. N. A. (2019). Pengaruh waktu pelayuan dan suhu pengeringan terhadap karakteristik teh daun bambu tabah (*Gigantochloa nigrociliata* BUSE-KURZ). *Jurnal BETA (Biosistem Dan Teknik Pertanian)*, 8(2), 223.
- Lestari, N., & Samsuar. (2021). Analysis of red chilli drying kinetics affected by low-temperature long time blanching. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 807(3). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/807/3/032002>
- Lingayat, A., Balijepalli, R., & Chandramohan, V. P. (2021). Applications of solar energy based drying technologies in various industries – A review. *Solar Energy*, 229(May), 52–68.
- Maskan, A., Kaya, S., & Maskan, M. (2002). Hot air and sun drying of grape leather (pestil). *Journal of Food Engineering*, 54(1), 81–88.

- Mukhtarom, K., Sutrisno, & Hasbullah, R. (2016). Perlakuan air panas diikuti pencelupan dalam larutan CaCl<sub>2</sub> untuk mempertahankan kualitas buah belimbing manis (*Averrhoa Carambola* L.). *Jurnal Keteknikan Pertanian*, 4(1), 37–44.
- Murali, S., Sathish Kumar, K., Alfiya, P. V., Delfiya, D. S. A., & Samuel, M. P. (2019). Drying kinetics and quality characteristics of Indian mackerel (*Rastrelliger kanagurta*) in solar–electrical hybrid dryer. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 28(5), 541–554. <https://doi.org/10.1080/10498850.2019.1604597>
- Nag, S., & Dash, K. K. (2016). Mathematical modeling of thin layer drying kinetics and moisture diffusivity study of elephant apple. *International Food Research Journal*, 23(6), 2594–2600.
- Prasetyo, D. J., Jatmiko, T. H., & Poeloengasih, D. (2018). Drying characteristics of *Ulva* sp. and *Sargassum* sp. seaweeds. *JPB Kelautan Dan Perikanan*, 13(1), 1–11.
- Rohdiana, D., Arief, D. Z., & Budiman, A. (2013). Aktivitas penghambatan pertumbuhan bakteri *Escherichia coli* oleh berbagai jenis teh dan seduhannya. *Jurnal Penelitian Teh Dan Kina*, 16(1), 37–44.
- Saad, A., Touati, B., Draoui, B., Tabti, B., Abdenebi, A., & Benaceur, S. (2014). Mathematical modeling of moisture sorption isotherms and determination of isosteric heats of sorption of *Ziziphus* leaves. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/427842>
- Saxena, J., & Dash, K. K. (2015). Drying kinetics and moisture diffusivity study of ripe jackfruit. *International Food Research Journal*, 22(1), 414–420.
- Taheri-Garavand, A., & Meda, V. (2018). Drying kinetics and modeling of savory leaves under different drying conditions. *International Food Research Journal*, 25(4), 1357–1364.
- Tiwari, A. (2016). A review on solar drying of agricultural produce. *Journal of Food Processing & Technology*, 7(9). <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000623>
- Yulianto, M. E., Arifan, F., Ariwibowo, D., Hartati, I., & Mustikaningtyas, D. (2007). Pengembangan proses inaktivasi enzim polifenol oksidase untuk produksi teh hijau berkatekin tinggi. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 10(1), 24–30. <https://doi.org/10.14710/jksa.10.1.24-30>
- Zielinska, M., & Markowski, M. (2012). Color Characteristics of Carrots: Effect of Drying and Rehydration. *International Journal of Food Properties*, 15(2), 450–466. <https://doi.org/10.1080/10942912.2010.489209>