

jTEP

JURNAL KETEKNIKAN PERTANIAN

P-ISSN No. 2407-0475 E-ISSN No. 2338-8439

Vol. 8, No.2, Agustus 2020



Publikasi Resmi
Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia
(Indonesian Society of Agricultural Engineering)
bekerjasama dengan
Departemen Teknik Mesin dan Biosistem - FATETA
Institut Pertanian Bogor



Jurnal Keteknikan Pertanian (JTEP) terakreditasi berdasarkan SK Dirjen Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Ristek Dikti Nomor I/E/KPT/2015 tanggal 21 September 2015. Selain itu, JTEP juga telah terdaftar pada Crossref dan telah memiliki Digital Object Identifier (DOI) dan telah terindeks pada ISJD, IPI, Google Scholar dan DOAJ. JTEP terbit tiga kali setahun yaitu bulan April, Agustus dan Desember, Jurnal berkala ilmiah ini berkiprah dalam pengembangan ilmu keteknikan untuk pertanian tropika dan lingkungan hayati. Penulis makalah tidak dibatasi pada anggota **PERTETA** tetapi terbuka bagi masyarakat umum. Lingkup makalah, antara lain meliputi teknik sumberdaya lahan dan air, alat dan mesin budidaya pertanian, lingkungan dan bangunan pertanian, energi alternatif dan elektrifikasi, ergonomika dan elektronika pertanian, teknik pengolahan pangan dan hasil pertanian, manajemen dan sistem informasi pertanian. Makalah dikelompokkan dalam *invited paper* yang menyajikan isu aktual nasional dan internasional, *review* perkembangan penelitian, atau penerapan ilmu dan teknologi, *technical paper* hasil penelitian, penerapan, atau diseminasi, serta *research methodology* berkaitan pengembangan modul, metode, prosedur, program aplikasi, dan lain sebagainya. Penulisan naskah harus mengikuti panduan penulisan seperti tercantum pada website dan naskah dikirim secara elektronik (*online submission*) melalui <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>.

Penanggungjawab:

Ketua Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB
Ketua Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia

Dewan Redaksi:

Ketua : Yohanes Aris Purwanto (Scopus ID: 6506369700, IPB University)
Anggota : Abdul Hamid Adom (Scopus ID: 6506600412, University Malaysia Perlis)
(*editorial board*) Addy Wahyudie (Scopus ID: 35306119500, United Arab Emirates University)
Budi Indra Setiawan (Scopus ID: 55574122266, IPB University)
Balasuriya M.S. Jinendra (Scopus ID: 30467710700, University of Ruhuna)
Bambang Purwantana (Scopus ID: 6506901423, Universitas Gadjah Mada)
Bambang Susilo (Scopus ID: 54418036400, Universitas Brawijaya)
Daniel Saputera (Scopus ID: 6507392012, Universitas Sriwijaya)
Han Shuqing (Scopus ID: 55039915600, China Agricultural University)
Hiroshi Shimizu (Scopus ID: 7404366016, Kyoto University)
I Made Anom Sutrisna Wijaya (Scopus ID: 56530783200, Universitas Udayana)
Agus Arif Munawar (Scopus ID: 56515099300, Universitas Syiahkuala)
Armansyah H. Tambunan (Scopus ID: 57196349366, IPB University)
Kudang Boro Seminar (Scopus ID: 54897890200, IPB University)
M. Rahman (Scopus ID: 7404134933, Bangladesh Agricultural University)
Machmud Achmad (Scopus ID: 57191342583, Universitas Hasanuddin)
Muhammad Makky (Scopus ID: 55630259900, Universitas Andalas)
Muhammad Yulianto (Scopus ID: 54407688300, IPB University & Waseda University)
Nanik Purwanti (Scopus ID: 23101232200, IPB University & Teagasc Food Research Center Irlandia)
Pastor P. Garcia (Scopus ID: 57188872339, Visayas State University)
Rosnah Shamsudin (Scopus ID: 6507783529, Universitas Putra Malaysia)
Salengke (Scopus ID: 6507093353, Universitas Hasanuddin)
Sate Sampattagul (Scopus ID: 7801640861, Chiang Mai University)
Subramaniam Sathivel (Scopus ID: 6602242315, Louisiana State University)
Shinichiro Kuroki (Scopus ID: 57052393500, Kobe University)
Siswoyo Soekarno (Scopus ID: 57200222075, Universitas Jember)
Tetsuya Araki (Scopus ID: 55628028600, The University of Tokyo)
Tusan Park (Scopus ID: 57202780408, Kyungpook National University)

Redaksi Pelaksana:

Ketua : Usman Ahmad (Scopus ID: 55947981500, IPB University)
Sekretaris : Lenny Saulia (Scopus ID: 16744818700, IPB University)
Bendahara : Dyah Wulandani (Scopus ID: 1883926600, IPB University)
Anggota : Satyanto Krido Saptomo (Scopus ID: 6507219391, IPB University)
Slamet Widodo (Scopus ID: 22636442900, IPB University)
Liyantono (Scopus ID: 54906200300, IPB University)
Leopold Oscar Nelwan (Scopus ID: 56088768900, IPB University)
I Wayan Astika (Scopus ID: 43461110500, IPB University)
Agus Ghautsun Niam (Scopus ID: 57205687481, IPB University)
Administrasi : Khania Tria Tifani (IPB University)

Penerbit: Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor bekerjasama dengan Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia (PERTETA).

Alamat: Jurnal Keteknikan Pertanian, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem,
Fakultas Teknologi Pertanian, Kampus Institut Pertanian Bogor, Bogor 16680.
Telp. 0251-8624 503, Fax 0251-8623 026,
E-mail: jtep@apps.ipb.ac.id
Website: <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>

Rekening: BRI, KCP-IPB, No.0595-01-003461-50-9 a/n: Jurnal Keteknikan Pertanian

Percetakan: PT. Binakerta Makmur Saputra, Jakarta

Ucapan Terima Kasih

Redaksi Jurnal Keteknikan Pertanian mengucapkan terima kasih kepada para Mitra Bebestari yang telah menelaah naskah pada penerbitan Vol. 8, No. 2 Agustus 2020. Ucapan terima kasih disampaikan kepada: Dr. Leopold O. Nelwan, S.TP, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB University), Prof.Dr.Ir. Usman Ahmad, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB University), Dr.Ir. Soni Solistia Wirawan, M.Eng (BPPT), Prof.Dr.Ir. Sutrisno M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB University), Ir. Siti Mariana Widayanti, M.Si, (Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pascapanen Pertanian), Dr.Ir. Lilik Pujantoro, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB University).

Technical Paper

Kinetika Pengeringan Lapisan Tipis Daun Jati Belanda

Thin Layer Drying Kinetics of Guazuma Ulmifolia Leaves

Hendri Syah, Universitas Syiah Kuala.

E-mail: hendri.syah@unsyiah.ac.id

Armansyah Halomoan Tambunan, IPB University.

E-mail: ahtambun@apps.ipb.ac.id

Edy Hartulistiyoso, IPB University.

E-mail: edyhartulistiyoso@apps.ipb.ac.id

Lamhot Parulian Manalu, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT).

E-mail: lamhot.parulian@bppt.go.id

Abstract

The objectives of this study were to determine a suitable thin layer drying model to describe the drying kinetics of Guazuma ulmifolia leaves and determine the mass transfer parameters of Guazuma ulmifolia leaves. The drying of Guazuma ulmifolia leaves was conducted in a laboratory scale dryer with various temperature (40°C, 50°C, and 60°C) and relative humidity (30%, 40%, 50% and 60%). Five drying models, namely, Page, Henderson and Pabis, Midilli-Kucuk, Verma et al. and Modified Henderson and Pabis were fitted to the drying data. The drying curve of guazuma leaves did not show a constant drying period during the drying period. The models suitability were compared base on coefficient of determination (R^2), root square mean errors (RSME), and reduced mean square of deviation (X^2). It was found that, among the models evaluated, the Midilli and Kucuk model is the best to describe the drying kinetics of Guazuma ulmifolia leaves. The effective moisture diffusivity was found to be in the range of $10^{-13} - 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ and the convective mass transfer coefficient was in the range of $10^{-9} - 10^{-10} \text{ m/s}$. The activation energy value was found to be 89.21 kJ/mol.

Keywords: *Drying model, Drying rate, Guazuma ulmifolia leaves, Thin layer drying*

Abstrak

Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan model pengeringan lapisan tipis yang cocok untuk menjelaskan kinetika pengeringan daun jati belanda dan menentukan parameter perpindahan massa daun jati belanda. Daun jati belanda dikeringkan di dalam pengering laboratorium dengan variasi suhu 40°C, 50°C, and 60°C serta RH 30%, 40%, 50% dan 60%. Lima model pengeringan lapisan tipis yang digunakan adalah Page, Henderson and Pabis, Midilli-Kucuk, Verma *et al.* serta modifikasi Henderson and Pabis yang dicocokkan dengan data pengukuran. Kurva pengeringan daun jati belanda tidak menunjukkan adanya periode laju pengeringan konstan. Kesesuaian model-model dibandingkan berdasarkan koefisien determinasi (R^2), *root square mean errors* (RSME), dan *reduced mean square of deviation* (X^2) diperoleh model Midilli-Kucuk merupakan model terbaik untuk menjelaskan perilaku pengeringan daun jati belanda. Nilai difusivitas efektif pada penelitian ini pada kisaran $10^{-13} - 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ dan koefisien perpindahan massa konvektif pada kisaran $10^{-9} - 10^{-10} \text{ m/s}$. Nilai energi aktivasi yang diperoleh adalah 89.21 kJ/mol.

Kata kunci: Model pengeringan, laju pengeringan, daun jati belanda, pengeringan lapisan tipis

Diterima: 6 Desember 2019; Disetujui: 23 Juni 2020

Pendahuluan

Daun jati belanda merupakan salah satu simplisia herbal yang banyak digunakan pada industri jamu. Simplisia ini memiliki kelebihan sehingga dijadikan sebagai sediaan (simplisia) obat herbal karena memiliki metabolit sekunder seperti steroid, flavanoid, tannin, glukosida, karbohidrat, dan *mucilago* (Patel *et al.* 2012). Salah satu tahapan penanganan pascapanen daun jati belanda sebagai simplisia tanaman obat adalah pengeringan.

Pengeringan simplisia herbal perlu dilakukan secara baik dan tepat. Menurut Pin *et al.* (2009), pertimbangan utama dalam pengeringan herbal adalah mempertahankan fitokimia yang terkandung pada simplisia, yang sebagian besar sangat sensitif terhadap panas. Salah satu kesalahan dalam pengeringan herbal adalah tidak cermat dalam menentukan suhu pengeringan serta parameter pengeringan lainnya. Menurut Kumar *et al.* (2014), penggunaan suhu yang lebih tinggi dapat mempercepat proses pengeringan tetapi menyebabkan penurunan mutu selama proses pengeringan, sedangkan penggunaan suhu yang lebih rendah dapat menjaga kualitas produk tetapi menurunkan laju pengeringan.

Kajian kinetika pengeringan herbal perlu dilakukan, karena kajian ini sering digunakan untuk menjelaskan mekanisme mikroskopik dan makroskopik perpindahan panas dan massa selama pengeringan (Premi *et al.* 2012). Menurut Sharma *et al.* (2000), kinetika pengeringan merupakan fenomena yang kompleks dan membutuhkan model yang bisa diandalkan untuk memprediksi perilaku pengeringan. Secara umum karakteristik pengeringan ditentukan secara eksperimen melalui pengeringan lapisan tipis dari bahan yang kemudian diplot ke dalam kurva untuk mendapatkan model pengeringan, dimana model ini dapat digunakan untuk melakukan simulasi kurva pengeringan pada kondisi pengeringan yang berbeda. Menurut Dincer dan Hussain (2004), dua parameter perpindahan massa yang dibutuhkan dalam analisis, desain, dan optimasi proses pengeringan adalah difusivitas air dan koefisien perpindahan massa. Beberapa

peneliti telah melakukan penelitian mengenai kinetika pengeringan pada berbagai jenis daun yaitu daun sirih (Pin *et al.* 2009), daun kelor (Premi *et al.* 2012; Ali *et al.* 2014; Potisate *et al.* 2014), daun mint (Doymaz 2006; Ozbek dan Dadali 2007), dan daun peterseli (Akpinar *et al.* 2006; Doymaz *et al.* 2006). Belum ada literatur yang menjelaskan secara spesifik mengenai kinetika pengeringan lapisan tipis daun jati belanda sehingga diperlukan kajian ini sebagai bahan pertimbangan untuk pengeringan simplisia daun jati belanda.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan model pengeringan lapisan tipis yang cocok untuk menjelaskan kinetika pengeringan daun jati belanda dan menentukan parameter perpindahan massa daun jati belanda.

Bahan dan Metode

Bahan

Daun jati belanda segar diperoleh dari kebun Pusat Studi Biofarmaka Tropika IPB Cikabayan yang kemudian diangkut ke laboratorium untuk selanjutnya dibersihkan dan disortasi. Sebelum eksperimen pengeringan, kadar air awal dari simplisia daun jati belanda ditentukan dengan menggunakan metode oven pada suhu 105°C selama 12 jam sedangkan ketebalan daun jati belanda diukur di Laboratorium Mikroteknik Departemen Agronomi dan Hortikultura IPB dengan menggunakan mikroskop merk Olympus DP 25 dan software kamera DP2-BSW.

Pengeringan simplisia

Pengeringan simplisia daun jati belanda menggunakan pengering laboratorium terkendali-terakuisisi yang didesain dan dibuat memenuhi standar untuk percobaan pengeringan lapisan tipis, dimana suhu dan kelembaban nisbi (RH) dapat dijaga konstan. Pengendalian kondisi pengeringan didasarkan pada kontrol PID dengan akurasi suhu $\pm 1^\circ\text{C}$ dan RH $\pm 2\%$ sesuai dengan standar ASABE (Manalu, 2011). Pengering ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Pengering laboratorium terkendali-terakuisisi (Manalu, 2011)

Tabel 1. Kondisi percobaan pengeringan lapisan tipis simplisia.

| Suhu (°C) | RH (%) | | | |
|-----------|--------|----|----|----|
| | 30 | 40 | 50 | 60 |
| 40 | | √ | √ | √ |
| 50 | √ | √ | √ | √ |
| 60 | √ | √ | √ | |

Tabel 2. Model matematika kurva pengeringan.

| No. | Nama Model | Model |
|-----|--------------------------------|--|
| 1 | Page | $MR = \exp(-kt^n)$ |
| 2 | Henderson and Pabis | $MR = a \exp(-kt)$ |
| 3 | Midilli-Kucuk | $MR = a \exp(-kt^n) + bt$ |
| 4 | Verma <i>et al</i> | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$ |
| 5 | Modifikasi Henderson and Pabis | $MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$ |

Sumber: Doymaz (2011), Evin (2012) dan Ayadi *et al.* (2014)

Sampel daun jati belanda yang dikeringkan adalah 15-16 gram yang disusun secara merata di atas rak pengering. Sebelum proses pengeringan, dilakukan *setting* suhu dan kelembaban relatif (RH) sesuai dengan kondisi pengeringan yang diinginkan. Perlakuan kondisi pengeringan dapat dilihat pada Tabel 1. Ada dua kombinasi suhu dan RH yang tidak dapat dilakukan yaitu suhu 40°C dan RH 30% serta kombinasi suhu 60°C dan RH 60%, sebagai akibat dari keterbatasan mesin pengering yang digunakan. Selanjutnya adalah *setting sampling rate* (pencacatan secara otomatis berat sampel di dalam ruang pengering) setiap 5 menit. Kecepatan udara yang digunakan pada eksperimen ini adalah 0.5 – 0.6 m/s. Sampel daun jati belanda dimasukkan ke dalam pengering pada saat suhu dan RH sudah stabil. Pengeringan sampel daun jati belanda selesai pada saat berat sampel yang terukur sudah konstan. Eksperimen dilakukan dengan pengulangan tiga kali (*triplicate*).

Analisis data

Data penurunan berat simplisia kemudian diubah menjadi data penurunan kadar air yang selanjutnya menjadi data laju pengeringan (LP) dan rasio kadar air atau *Moisture Ratio (MR)* yang ditampilkan dalam bentuk grafik.

Model matematika kurva pengeringan

Kurva MR yang telah diperoleh kemudian dicocokkan dengan model matematika yang tertera pada Tabel 2. Regresi non linear dipilih untuk menentukan konstanta-konstanta pada model matematika tersebut dengan bantuan software *Curve Expert Profesional 2.6.5* (berlisensi). Parameter statistik yang digunakan untuk memilih model yang terbaik yang menggambarkan kurva pengeringan simplisia adalah Koefisien determinasi (R^2), *Root Square Mean Errors (RMSE)* dan

Reduced Mean Square of Deviation (χ^2). Kriteria kualitas *fitting* model yang digunakan adalah nilai R^2 tertinggi serta nilai RMSE dan χ^2 terendah.

Difusivitas efektif dan energi aktivasi

Dalam menganalisis difusi air secara kuantitatif selama proses pengeringan dapat digunakan hukum ke-2 Fick's yang tertera pada Persamaan 1.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{\text{eff}} \nabla^2 M \quad (1)$$

Dimana D_{eff} : difusivitas efektif (m^2/s), M: kadar air basis kering (%bk), t: waktu (s)

Dengan mengasumsikan pergerakan air satu dimensi tanpa perubahan volume, difusivitas konstan, distribusi kadar air awal seragam dan tahanan diabaikan, maka Persamaan 1 ditransformasi menjadi Persamaan 2.

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

Dimana MR: rasio kadar air, M_o : kadar air awal (%bk), M_e : kadar air keseimbangan (%bk), L: ketebalan bahan (m).

Selanjutnya dengan mengabaikan suku kedua dan seterusnya pada ruas kanan Persamaan 2 maka diperoleh Persamaan 3 sebagai berikut.

$$\ln MR = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4L^2}\right) t \quad (3)$$

Perhitungan difusivitas efektif dengan cara plot $\ln MR$ dengan waktu sehingga menghasilkan sebuah garis lurus dengan kemiringan tertentu sehingga diperoleh nilai D_{eff} seperti pada Persamaan 4.

$$D_{eff} = - \left(s \cdot \frac{4L^2}{\pi^2} \right) \tag{4}$$

Dimana s: kemiringan grafik

Difusivitas efektif juga dapat dihubungkan dengan suhu menggunakan persamaan Arrhenius (Doymaz 2006; Kalaivani dan Chitradevi 2013) untuk menentukan energi aktivasi. Energi aktivasi merupakan tingkatan energi dari molekul untuk memulai proses difusi. Persamaan 5 dapat disederhanakan menjadi Persamaan 6.

$$D_{eff} = D_o \exp \left(- \frac{E_a}{RT} \right) \tag{5}$$

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_o) - \frac{E_a}{RT} \tag{6}$$

Dimana E_a : energi aktivasi (kJ/mol), D_o : faktor pre eksponensial (m^2/s), R : konstanta gas (8.314 J/mol K), T : suhu mutlak (K)

Koefisien perpindahan massa konvektif

Bilangan Biot (Bi_m) untuk perpindahan masa dapat dikorelasikan dengan difusivitas efektif (D_{eff}) dan koefisien perpindahan masa konvektif (h_m) (Dincer et al. 2002; Dincer dan Hussain 2004;

Dincer dan Zamfirescu 2016) sebagai berikut:

$$Bi_m = \frac{h_m L}{D_{eff}} \tag{7}$$

Perhitungan bilangan Biot massa menggunakan model pendekatan hubungan Bi-G (Dincer dan Hussain 2004; Jurendic dan Tripalo 2011; Torki-Harchegani et al. 2015) sebagai berikut.

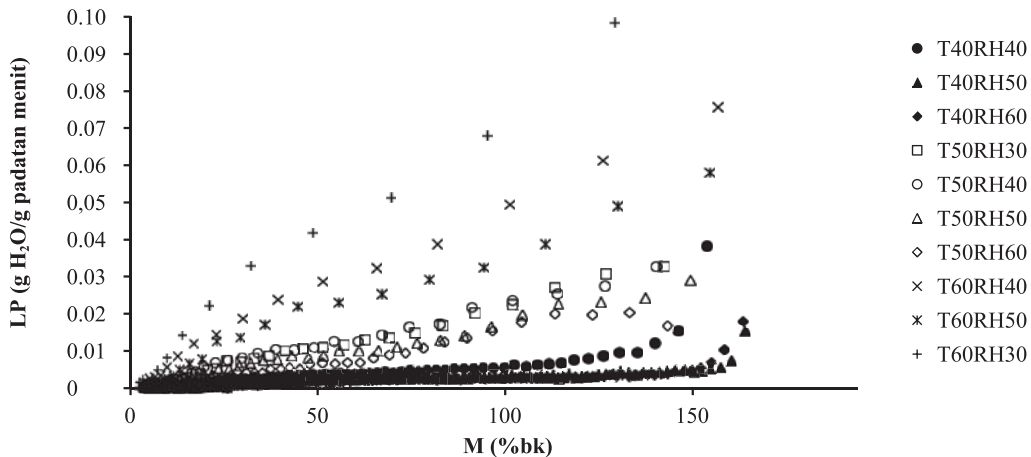
$$Bi_m = 0.0576 \cdot G^{26} \tag{8}$$

Dimana G : lag factor pada model Henderson and Pabis (difusi yang disederhanakan).

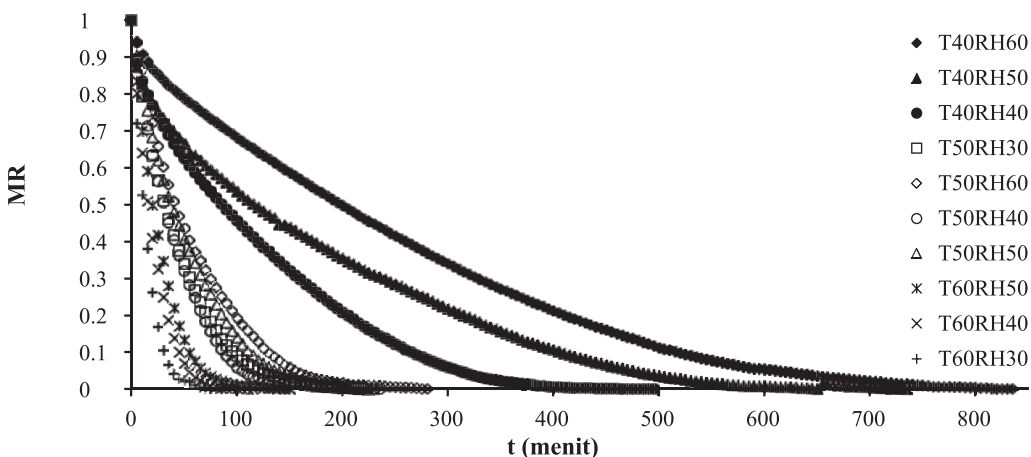
Hasil dan Pembahasan

Laju Pengeringan

Kadar air awal rata-rata daun jati belanda segar yang digunakan pada penelitian ini adalah $63.02 \pm 0.81\%$ bb. Sebagaimana umumnya proses pengeringan, peningkatan suhu menyebabkan kurva laju pengeringan semakin curam, sedangkan peningkatan RH menyebabkan laju pengeringan semakin landai. Laju pengeringan daun jati belanda terhadap kadar air dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Laju pengeringan daun jati belanda.



Gambar 3. Grafik hubungan antara MR dan t.

Tabel 3. Konstanta model matematika dan ringkasan statistiknya.

| T (C) | RH | Model | Konstanta Model | R ² | RMSE | X ² |
|-------|----|--------------------------------|---|----------------|--------|----------------|
| 40 | | Page | k=1.6439 x10 ⁻⁴ ; n=0.9819 | 0.9927 | 0.0307 | 0.00097 |
| | | Henderson and Pabis | a= 0.9445; k= 1.3185 x10 ⁻⁴ | 0.9943 | 0.0272 | 0.00075 |
| | | Midilli-Kucuk | a= 0.9073; k= 9.0133 x10 ⁻⁵ ; n= 1.0278; b= -1.6879 x10 ⁻⁶ | 0.9977 | 0.0169 | 0.00030 |
| | | Verma | a= 1.0094; k= 1.3195x10 ⁻⁴ ; g= 4.5317 x10 ⁻⁵ | 0.9943 | 0.0323 | 0.00108 |
| | | Modifikasi Henderson and Pabis | a= -1.0357; k= 2.1734x10 ⁻⁴ ; b=2.9720; g= 1.7939x10 ⁻⁴ c= -1.0464; h= 2.1789x10 ⁻⁴ | 0.9965 | 0.0214 | 0.00048 |
| 40 | 50 | Page | k=1.1051x10 ⁻⁵ ; n=1.1839 | 0.9945 | 0.0295 | 0.00088 |
| | | Henderson and Pabis | a=1.0285 ; k=6.8945x10 ⁻⁵ | 0.9902 | 0.0393 | 0.00157 |
| | | Midilli-Kucuk | a=0.9318; k=9.1812 x10 ⁻⁶ ; n=1.1813 b=-1.7293x10 ⁻⁶ | 0.9991 | 0.0121 | 0.00015 |
| | | Verma | a=5.1031; k=3.4283x10 ⁻⁵ ; g=2.8975 x10 ⁻⁵ | 0.9985 | 0.0155 | 0.00024 |
| | | Modifikasi Henderson and Pabis | a= 2.8675; k=1.0757x10 ⁻⁴ ; b= -4.1116; g=1.2650 x10 ⁻⁴ c= 2.1610; h=1.0727x10 ⁻⁴ | 0.9968 | 0.0225 | 0.00053 |
| 60 | | Page | k=2.1086 x10 ⁻⁵ ; n=1.1150 | 0.9942 | 0.0293 | 0.00087 |
| | | Henderson and Pabis | a=0.9998; k=6.5540x10 ⁻⁵ | 0.9922 | 0.0340 | 0.00118 |
| | | Midilli-Kucuk | a= 0.9085; k= 8.3569 x10 ⁻⁶ ; n=1.1891; b=-1.0380 x10 ⁻⁶ | 0.9989 | 0.0123 | 0.00016 |
| | | Verma | a=1.1969; k= 5.0192 x10 ⁻⁵ g=1.1302 x10 ⁻⁵ | 0.9975 | 0.0192 | 0.00036 |
| | | Modifikasi Henderson and Pabis | a= 2.10620.3761; k= 9.8969 x10 ⁻⁵ ; b= 2.0499; g=9.8878x10 ⁻⁵ = -3.2561; h=1.1916x10 ⁻⁴ | 0.9975 | 0.0193 | 0.00038 |
| 30 | | Page | k=2.7760 x10 ⁻⁴ ; n=1.0384 | 0.9994 | 0.0086 | 0.00008 |
| | | Henderson and Pabis | a=1.0059; k=3.8131x10 ⁻⁴ | 0.9993 | 0.0100 | 0.00010 |
| | | Midilli-Kucuk | a=0.9891; k=2.8829 x10 ⁻⁴ ; n=1.0304; b=-8.4037x10 ⁻⁷ | 0.9997 | 0.0068 | 0.00005 |
| | | Verma | a=30.5486; k=4.8696x10 ⁻⁴ ; g=4.9148 x10 ⁻⁴ | 0.9996 | 0.0076 | 0.00006 |
| | | Modifikasi Henderson and Pabis | a=1.3299; k= 4.7161x10 ⁻⁴ ; b= -1.7403; g= 5.4495 x10 ⁻⁴ c=1.3964; h= 4.6899 x10 ⁻⁴ | 0.9996 | 0.0071 | 0.00006 |
| 40 | 50 | Page | k=1.7856 x10 ⁻⁴ ; n=1.1001 | 0.9993 | 0.0099 | 0.00010 |
| | | Henderson and Pabis | a=1.0252 ; k=4.0985x10 ⁻⁴ | 0.9984 | 0.0146 | 0.00022 |
| | | Midilli-Kucuk | a=0.9796; k=1.3606 x10 ⁻⁴ ; n=1.1313; b=-1.2248 x10 ⁻⁸ | 0.9994 | 0.0093 | 0.00009 |
| | | Verma | a=11.2031; k=2.8968 x10 ⁻⁴ ; g= 2.8109 x10 ⁻⁴ | 0.9991 | 0.0107 | 0.00012 |
| | | Modifikasi Henderson and Pabis | a=-1.8337; k= 6.6451x10 ⁻⁴ ; b=1.6964; g= 5.3949x10 ⁻⁴ c=1.1238; h= 5.4447 x10 ⁻⁴ | 0.9995 | 0.0085 | 0.00008 |
| 50 | 50 | Page | k=1.7599 x10 ⁻⁴ ; n=1.0715 | 0.9988 | 0.0130 | 0.00018 |
| | | Henderson and Pabis | a=1.0146; k=3.2299 x10 ⁻⁴ | 0.9982 | 0.0160 | 0.00027 |
| | | Midilli-Kucuk | a=0.9836; k=1.9166x10 ⁻⁴ ; n=1.0557 ; b=-1.4074 x10 ⁻⁶ | 0.9994 | 0.0097 | 0.00010 |
| | | Verma | a=17.8430; k=4.3673x10 ⁻⁴ ; g=4.4604x10 ⁻⁴ | 0.9991 | 0.0116 | 0.00014 |
| | | Modifikasi Henderson and Pabis | a=1.2402; k= 4.1279x10 ⁻⁴ ; b=-1.6118; g=5.0838x10 ⁻⁴ c=1.3519; h= 4.1593x10 ⁻⁴ | 0.9992 | 0.0109 | 0.00013 |
| 60 | | Page | k=1.6257x10 ⁻⁴ ; n=1.0654 | 0.9992 | 0.0108 | 0.00012 |
| | | Henderson and Pabis | a=1.0230; k=2.8816 x10 ⁻⁴ | 0.9988 | 0.0129 | 0.00017 |
| | | Midilli-Kucuk | a=1.0018; k=2.0895x10 ⁻⁴ ; n=1.0332; b=-8.9037x10 ⁻⁷ | 0.9994 | 0.0090 | 0.00009 |
| | | Verma | a=24.2182; k=3.8015 x10 ⁻⁴ ; g=3.8564 x10 ⁻⁴ | 0.9993 | 0.0101 | 0.00011 |
| | | Modifikasi Henderson and Pabis | a=1.6542; k=3.5836 x10 ⁻⁴ ; b=-1.8976; g= 4.1531 x10 ⁻⁴ c=1.2427; h=3.5976 x10 ⁻⁴ | 0.9993 | 0.0101 | 0.00012 |
| 30 | | Page | k=5.6874x10 ⁻⁴ ; n=1.0997 | 0.9996 | 0.0082 | 0.00007 |
| | | Henderson and Pabis | a=1.0154; k=1.1607 x10 ⁻³ | 0.9989 | 0.0135 | 0.00020 |
| | | Midilli-Kucuk | a=0.9940; k=5.5285x10 ⁻⁴ ; n=1.1025; b=-4.7919 x10 ⁻⁷ | 0.9996 | 0.0079 | 0.00008 |
| | | Verma | a=42.4571; k=1.6506 x10 ⁻³ ; g=1.6674x10 ⁻³ | 0.9997 | 0.0071 | 0.00006 |
| | | Modifikasi Henderson and Pabis | a=1.2387; k=1.5038x10 ⁻³ ; b=1.0372; g=1.4859 x10 ⁻³ c=-1.2810; h=1.9317x10 ⁻³ | 0.9997 | 0.0071 | 0.00008 |
| 60 | 40 | Page | k=3.5048x10 ⁻⁴ ;n=1.1104 | 0.9994 | 0.0091 | 0.00009 |
| | | Henderson and Pabis | a=1.0221 ; k=8.0859 x10 ⁻⁴ | 0.9985 | 0.0153 | 0.00026 |
| | | Midilli-Kucuk | a=0.9905 ; k=3.5256x10 ⁻⁴ ;n=1.1068; b=-1.2378x10 ⁻⁶ | 0.9996 | 0.0078 | 0.00007 |
| | | Verma | a=31.4728; k=1.1567 x10 ⁻³ ; g=1.1735x10 ⁻³ | 0.9996 | 0.0078 | 0.00007 |
| | | Modifikasi Henderson and Pabis | a=1.5099; k=1.0786 x10 ⁻³ ; b=1.3732; g= 1.0725x10 ⁻³ c=-1.8913; h=1.3123 x10 ⁻³ | 0.9996 | 0.0078 | 0.00008 |
| 50 | | Page | k=2.6330x10 ⁻⁴ ; n=1.1147 | 0.9994 | 0.0095 | 0.00009 |
| | | Henderson and Pabis | a=1.0245; k=6.4477 x10 ⁻⁴ | 0.9983 | 0.0156 | 0.00026 |
| | | Midilli-Kucuk | a=0.9842; k=2.2473x10 ⁻⁴ ; n= 1.1329; b=-3.2446x10 ⁻⁷ | 0.9995 | 0.0088 | 0.00009 |
| | | Verma | a=66.0832; k=9.3331x10 ⁻⁴ ; g=9.3945 x10 ⁻⁴ | 0.9995 | 0.0094 | 0.00010 |
| | | Modifikasi Henderson and Pabis | a= 1.4505; k=8.5631x10 ⁻⁴ ; b= 1.3133; g=8.5966 x10 ⁻⁴ c=-1.7751; h=1.0655x10 ⁻³ | 0.9996 | 0.0079 | 0.00008 |

Tabel 4. Nilai difusivitas efektif beberapa simplisia daun.

| Simplisia daun | Kondisi pengeringan | | | Tebal (L) (m) | Difusivitas efektif (m ² /s) | Referensi |
|----------------|---------------------|-------------|-----------|---|--|---------------------------------------|
| | Suhu (C) | RH (%) | V (m/s) | | | |
| Jati belanda | 40 | 40 | | | 4.9817 x 10 ⁻¹³ | Penelitian ini |
| | | 50 | | | 3.5941 x 10 ⁻¹³ | |
| | | 60 | | | 2.6425 x 10 ⁻¹³ | |
| | | 30 | | | 1.4959 x 10 ⁻¹² | |
| | 50 | 40 | 0.5 – 0.6 | 0.1636 x 10 ⁻³ ± 0.0215x 10 ⁻³ | 1.3238 x 10 ⁻¹² | |
| | | 50 | | | 1.3003 x 10 ⁻¹² | |
| | | 60 | | | 1.2607 x 10 ⁻¹² | |
| | 60 | 30 | | | 3.5412 x 10 ⁻¹² | |
| | | 40 | | | 2.8402 x 10 ⁻¹² | |
| | | 50 | | | 2.3736 x 10 ⁻¹² | |
| Mint | 30 – 50 | 10.6 – 44.8 | 0.5 - 1 | 0.25 x 10 ⁻³ ± 0.06 x 10 ⁻³ | 4.765 x 10 ⁻¹³ -2.945x 10 ⁻¹² | Park <i>et al.</i> (2002) |
| Adas sowa | 50 -70 | - | 1.1 | 0.015 ± 0.001 | 6.693 x 10 ⁻¹⁰ – 1.434 x 10 ⁻⁹ | Doymaz <i>et al.</i> (2006) |
| Peterseli | 50 -70 | - | 1.1 | 0.015 ± 0.001 | 9 x 10 ⁻¹⁰ – 2.337 x 10 ⁻⁹ | |
| Jelatang | 35 - 55 | 40 | 0.2 – 0.6 | 0.01 | 4.992 x 10 ⁻¹⁰ – 2.753 x 10 ⁻⁹ | Kaya dan Aydin (2009) |
| Mint | 35 - 55 | 40 | 0.2 – 0.6 | 0.01 | 3.106 x 10 ⁻⁹ – 6.172 x 10 ⁻⁹ | |
| <i>Thyme</i> | 40 - 60 | 14 – 45 | 2 | 0.02 ± 0.001 | 1.097 x 10 ⁻⁹ – 5.991x 10 ⁻⁹ | Doymaz (2011) |
| Kelor | 50 - 80 | - | 0.5 – 1.3 | 0.01±0.001 | 2.40 x 10 ⁻⁹ – 1.5 x 10 ⁻⁸ | Premi <i>et al.</i> (2012) |
| Peppermint | 50 - 70 | 40 | 0.4 | 0.01 | 1.809 x 10 ⁻⁹ – 4.649 x 10 ⁻⁹ | Torki-Harchegani <i>et al.</i> (2016) |
| Afrika | 40 -60 | - | 1 | Lapisan tunggal | 4.55 x 10 ⁻¹² – 5.48 x 10 ⁻¹² | Alara <i>et al.</i> (2019) |

Kurva pengeringan daun jati belanda tidak menunjukkan adanya laju pengeringan konstan, hal ini disebabkan pada awal pengeringan daun jati belanda tidak mempunyai air bebas pada permukaan daun. Pada pengeringan beberapa simplisia daun laju pengeringan konstan tidak muncul dan hanya berada pada laju pengeringan menurun (Doymaz *et al.* 2006; Premi *et al.* 2012; Harchegani *et al.* 2016). Pada laju pengeringan menurun, proses pengeringan dikendalikan oleh difusi internal air di dalam produk (Pin *et al.* 2009). Laju pengeringan menurun mengindikasikan terjadinya difusi yang merupakan mekanisme yang dominan pergerakan air di dalam bahan (Doymaz 2011). Perpindahan air dari dalam bahan lebih tinggi terjadi pada suhu yang tinggi karena migrasi air ke permukaan dan laju penguapan dari permukaan ke udara menurun dengan menurunnya air di dalam produk sehingga laju pengeringan menurun. Pergerakan air di dalam produk pertanian terjadi secara difusi (Pardeshi *et al.* 2009) dan perbedaan tekanan uap air antara bahan dan udara (Tulliza *et al.* 2010).

Model matematika kurva pengeringan

Hubungan antara rasio kadar air terhadap waktu dapat dilihat pada Gambar 3. Berdasarkan regresi non linear maka diperoleh konstanta-konstanta model serta hasil perhitungan parameter-parameter statistik yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Evaluasi terhadap model-model tersebut

berdasarkan analisis statistik dengan kriteria R², RMSE, dan X² (*chi-square*) diperoleh model yang terbaik untuk menjelaskan perilaku pengeringan lapisan tipis daun jati belanda. Hampir semua model menunjukkan kinerja yang baik dimana secara umum nilai R² berada diselang 0.9897-0.9997. Sedangkan nilai RMSE dan X² terendah lebih didominasi oleh model Midilli-Kucuk. Berdasarkan kriteria tersebut, model Midilli-Kucuk lebih *fit* (cocok) karena model ini memiliki nilai prediksi yang lebih mendekati nilai eksperimen.

Model Modifikasi Henderson and Pabis dalam penelitian ini merupakan model dengan jumlah konstanta yang paling banyak dibandingkan dengan model yang lainnya. Beberapa penelitian mengenai perilaku pengeringan simplisia herbal menunjukkan bahwa model Midilli-Kucuk merupakan model yang terbaik dibandingkan dengan beberapa model (lebih 10 model) yang salah satunya adalah model Modifikasi Henderson and Pabis (Doymaz 2011; Evin 2012; Ayadi *et al.* 2014). Sedangkan model Modifikasi Henderson and Pabis lebih cocok menjelaskan kinetika pengeringan lapisan tipis daun zaitun (Erbay dan Incier 2010) dan model logaritmik lebih cocok menjelaskan perilaku pengeringan daun sirih (Pin *et al.* 2009). Berdasarkan beberapa penelitian di atas, jumlah konstanta dan kompleksitas model bukan merupakan ukuran untuk menghasilkan model terbaik yang mengindikasikan perilaku pengeringan

Tabel 5. Parameter perpindahan massa.

| Suhu (C) | RH (%) | Lag factor (G) | Bilangan biot (B_{im}) | h ($\times 10^{-9}$ m/s) |
|----------|--------|----------------|----------------------------|-----------------------------|
| 40 | 40 | 0.9942 | 0.0493 | 0.299 |
| | 50 | 0.9943 | 0.0495 | 0.217 |
| | 60 | 0.9952 | 0.0507 | 0.163 |
| 50 | 30 | 1.0216 | 0.1018 | 1.857 |
| | 40 | 1.0212 | 0.1010 | 1.630 |
| | 50 | 1.0226 | 0.1046 | 1.658 |
| | 60 | 1.0060 | 0.0676 | 1.039 |
| 60 | 30 | 1.0254 | 0.1124 | 4.854 |
| | 40 | 1.0308 | 0.1293 | 4.479 |
| | 50 | 1.0232 | 0.1063 | 3.077 |

simplisia (Kucuk *et al.* 2014). Peningkatan suhu pengeringan meningkatkan nilai konstanta k pada setiap model begitu pula dengan konstanta g dan h pada model Verma *et al.* dan model Modifikasi Henderson and Pabis. Hubungan konstanta k ($1/\text{detik}$) dan koefisien n (tidak berdimensi) pada Model Midilli-Kucuk dan Model Page pada Tabel 3 menunjukkan korelasi yang rendah.

Difusivitas efektif dan energi aktivasi

Difusivitas efektif simplisia daun jati belanda dan beberapa simplisia daun lainnya dapat dilihat pada Tabel 4. Peningkatan difusivitas efektif daun jati belanda seiring dengan peningkatan suhu pengeringan, akan tetapi pengaruh RH tidak menunjukkan perbedaan yang besar terhadap nilai difusivitas efektif. Peningkatan suhu menyebabkan penurunan viskositas air dan tahanan fluida mengalir keluar (*resistance of fluid outflow*) (Torki-Harchegani *et al.* 2016a). Selain penurunan viskositas air, peningkatan suhu juga menyebabkan peningkatan aktivitas molekul air (Alara *et al.* 2019) dan peningkatan tekanan uap di dalam bahan yang mempercepat perpindahan air dari dalam bahan (Doymaz 2011; Ashtiani *et al.* 2017).

Nilai difusivitas efektif rata-rata daun jati belanda yang dihasilkan dalam penelitian ini sangat rendah dibandingkan dengan nilai difusivitas efektif simplisia daun lainnya. Salah satu penyebabnya adalah parameter ketebalan yang digunakan dalam perhitungan difusivitas efektif, dimana beberapa peneliti menggunakan ketebalan bahan dalam bentuk curah (*bulky*) sehingga nilai difusivitas efektif yang dihasilkan dalam pengeringan lapisan tipis sangat besar jika dibandingkan dengan hasil penelitian ini yang menggunakan simplisia dalam bentuk lapisan tunggal seperti yang dilakukan oleh Park *et al.* (2002) dan Alara *et al.* (2019). Akan tetapi nilai difusivitas efektifnya masih berada pada selang nilai difusivitas efektif bahan pangan yaitu antara 10^{-13} - 10^{-6} m^2/s , yang mayoritasnya (92%) berada pada selang 10^{-12} - 10^{-8} m^2/s (Zogzas *et al.* 1996). Perbedaan nilai difusivitas efektif beberapa

simplisia daun disebabkan oleh karakteristik sampel daun seperti varietas, komposisi dan geometri (tebal atau radius), suhu udara pengering, pra perlakuan secara fisika atau kimia serta kadar air (Shi *et al.* 2013).

Energi aktivasi merupakan energi minimum yang dibutuhkan untuk memulai difusi air dari sebuah bahan (Kadam *et al.* 2011). Nilai energi aktivasi yang dihasilkan dalam penelitian ini adalah 89.21 kJ/mol, nilai energi aktivasi ini masih berada dalam selang nilai energi aktivasi untuk produk pertanian yaitu 12 - 110 kJ/mol (Aghbashlo *et al.* 2008). Energi aktivasi pengeringan simplisia daun jati belanda lebih tinggi dibandingkan simplisia daun lainnya yaitu daun zaitun sebesar 75.98 kJ/mol (Erbay dan Icier 2010) dan daun serai sebesar 62.84 kJ/mol (Coradi *et al.* 2014). Tetapi, energi aktivasi daun jati belanda lebih rendah dibandingkan dengan daun jelatang sebesar 95.28 kJ/mol dan 109 kJ/mol untuk masing-masing kecepatan udara 0.4 dan 0.6 m/s (Kaya dan Aydin 2009) dan daun teh hitam sebesar 406.02 kJ/mol (Panchariya *et al.* 2002). Energi aktivasi memiliki hubungan terbalik dengan kadar air, dimana terjadi peningkatan kekuatan ikatan antara air dan bahan pada saat penurunan kadar air (Okos *et al.* 1992).

Koefisien perpindahan massa konvektif

Perilaku pengeringan daun jati belanda dapat juga dilihat dari nilai bilangan biot massa yang menggambarkan pengaruh tahanan internal dan eksternal perpindahan air dari dalam simplisia ke permukaan. Menurut Giner *et al.* (2010), bilangan biot massa menghubungkan antara laju perpindahan difusi massa dalam padatan dengan laju konveksi eksternal. Bilangan biot massa yang dihasilkan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 5.

Menurut Dincer dan Zamfirescu (2016) terdapat tiga kondisi pengeringan bahan berbentuk lempeng yaitu: 1) proses difusi air di sepanjang lempeng sangat cepat dibandingkan dengan konveksi air (*moisture convection*) di permukaan ($B_{im} < 0.1$), 2) proses konveksi air pada permukaan lempeng

sangat cepat dibandingkan difusi disepanjang lempeng ($Bi_m > 100$), 3) proses yang dikendalikan oleh difusi dan konveksi, dimana proses difusi air disepanjang padatan dan proses konveksi air di permukaan adalah sama eksisnya ($0.1 \leq Bi_m \leq 100$). Dari dua model perhitungan Bi_m yaitu model *Dincer and Dost* dan model Bi-G (Torki-Harchegani et al. 2015), model Bi-G lebih sesuai karena tidak menghasilkan nilai Bi_m negatif untuk *lag factor* yang kecil dari 1. Berdasarkan hasil perhitungan Bi_m , pengeringan simplisia daun jati belanda pada suhu 40°C menghasilkan nilai $Bi_m < 0.1$, hal ini mengindikasikan tahanan eksternal (suhu dan RH) pada permukaan simplisia sangat berpengaruh yang mengakibatkan akumulasi air di permukaan simplisia. Jika dilihat dari grafik laju pengeringan simplisia pada Gambar 2, laju penguapan air pada suhu 40°C terlihat sangat lambat sampai kadar air simplisia konstan (kemiringan grafik sangat kecil), hal ini diduga mengakibatkan nilai Bi_m yang dihasilkan sangat rendah pada suhu tersebut, begitu juga dengan pengeringan simplisia pada suhu 50°C dengan RH 60%. Sedangkan pengeringan pada suhu 50°C dan 60°C perpindahan airnya dikendalikan oleh proses difusi dan konveksi yang porsinya sama besar ($0.1 \leq Bi_m \leq 100$). Pengeringan irisan kentang pada suhu 30°C menghasilkan nilai Bi_m yang rendah sebesar 0.079 dibandingkan dengan suhu yang lebih tinggi (McMinn et al. 2003). Irisan buah apel kultivar *Golden Delicious* yang dikeringkan secara konvektif menghasilkan nilai Bi_m antara 0.0055 - 0.0191 (Cruz et al. 2015) serta produk olahan (makanan bayi) sebesar 0.0063 - 0.6821 (Jurendic dan Tripalo 2011).

Nilai koefisien perpindahan massa konvektif yang dihasilkan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 5. Nilai koefisien perpindahan massa konvektif mengindikasikan transfer air pada permukaan simplisia, sama halnya dengan bilangan biot massa, perpindahan air permukaan simplisia berbanding lurus dengan suhu udara pengering, walaupun pengaruh RH tidak begitu besar. Menurut Darvishi et al. (2015), selain suhu udara pengering, nilai koefisien perpindahan massa konvektif meningkat dengan bertambahnya ketebalan dari irisan bahan. Beberapa penelitian yang telah dilakukan untuk bahan yang berbentuk lempeng yaitu irisan melon dengan nilai h_m sebesar 1.07×10^{-9} – 10.68×10^{-9} m/s pada suhu 40-70°C dengan tiga ketebalan yang berbeda (Darvishi et al. 2015), dan irisan lemon diperoleh nilai h_m sebesar 5.71×10^{-7} – 2.53×10^{-6} m/s pada suhu 50–75°C (Torki-Harchegani et al. 2016b).

Simpulan

Model Midilli-Kucuk merupakan model terbaik yang dapat menjelaskan perilaku kurva pengeringan daun jati belanda. Berdasarkan analisis bilangan

biot massa menunjukkan bahwa pengeringan daun jati belanda pada suhu 40°C lebih dipengaruhi tahanan eksternalnya sedangkan pengeringan pada suhu 50°C dan 60°C lebih dominan dikendalikan difusi air dari pusat simplisia ke permukaan dan konveksi pada permukaan simplisia. Nilai difusivitas efektif pada pengeringan daun jati belanda adalah sebesar 2.6425×10^{-13} sampai 3.5412×10^{-12} m²/s yang nilainya meningkat dengan meningkatnya suhu udara pengering begitu juga dengan nilai koefisien perpindahan massa konveksi, dimana nilainya sebesar 1.63×10^{-10} m/s sampai 4.854×10^{-9} m/s. Energi aktivasi untuk proses difusi uap air pada pengeringan simplisia daun jati belanda sebesar 89.21 kJ/mol.

Ucapan terima kasih

Terima kasih disampaikan kepada Direktur Riset dan Pengabdian Masyarakat Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan, Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi sesuai kontrak Penelitian Disertasi Doktor (PDD) Tahun Anggaran 2018 No. Kontrak: 21/UN11.2/PP/SP3/2018

Daftar Pustaka

- Aghbashlo, M., H. Kianmehr, H. Samimi-Akhijahani. 2008. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (*Berberidaceae*). *Energy Conversion and Management* 49(10):2865-2871.
- Akpinar, K., Y. Bicer, F. Cetinkaya. 2006. Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun. *Journal of Food Engineering* 75(3):308-315.
- Alara, O.R., N.H.Abdurahman, 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.
- Ali, M.A., Y.A. Yusof, N.L. Chin, M.N. Ibrahim, S.M.A. Basra. 2014. Drying Kinetics and Colour Analysis of Moringa Oleifera Leaves. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 2:394-400.
- Ashtiani, M., S. Seyed-Hassan, G. Alireza, M. Reza. 2017. Analyzing drying characteristics and modeling of thin layers of peppermint leaves under hot-air and infrared treatments. *Information Processing in Agriculture* 4(2):128-139.
- Ayadi, M., S.B. Mabrouk, I. Zouari, A. Bellagi. 2014. Kinetic study of the convective drying of spearmint. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 13(1):1-7.

- Coradi, P., E.D.C. Melo, R. da Rocha. 2014. Mathematical modeling of the drying kinetics of the leaves of lemon grass (*Cymbopogon citratus* Stapf) and its effects on quality. *IDESIA* 32(4):43-56.
- Cruz A.C., R.P.F. Guiné, J.C. Gonçalves JC. 2015. Drying kinetics and product quality for convective drying of apples (cvs. Golden Delicious and Granny Smith). *International Journal of Fruit Science* 15(1):54-78.
- Darvishi, H., J. Khodaie, M. Azadbakht. 2015. The parameters of mass transfer of convective drying in sliced melon. *Philipp Agric. Sci* 98:60-72.
- Dincer, I., M. Hussain. 2004. Development of a new Biot number and lag factor correlation for drying applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47(4):653-658.
- Dincer, I., M. Hussain, B. Yilbas, A. Sahin. 2002. Development of a new drying correlation for practical applications. *International Journal of energy research* 26(3):245-251.
- Dincer, I., C. Zamfirescu. 2016. Drying phenomena: theory and applications. John Wiley & Sons.
- Doymaz, I. 2011. Drying of thyme (*Thymus vulgaris* L.) and selection of a suitable thin-layer drying model. *Journal of Food Processing and Preservation* 35(4):458-465.
- Doymaz, I. 2006. Thin-layer drying behaviour of mint leaves. *Journal of Food Engineering* 74(3):370-375.
- Doymaz, I., N.Tugrul, M. Pala. 2006. Drying characteristics of dill and parsley leaves. *Journal of Food Engineering* 77(3):559-565.
- Erbay, Z., F. Icier. 2010. Thin-layer drying behaviors of olive leaves (*Olea europaea* L.). *Journal of Food Process Engineering* 33(2):287-308.
- Evin, D. 2012. Thin layer drying kinetics of *Gundelia tournefortii* L. *Food and Bioproducts Processing* 90(2):323-332.
- Giner, S., R. Irigoyen, S. Cicutin, C. Fiorentini. 2010. The variable nature of Biot numbers in food drying. *Journal of Food Engineering* 101(2):214-222.
- Jurendic, T., B.Tripalo. 2011. Biot number-lag factor (Bi-G) correlation for tunnel drying of baby food. *African Journal of Biotechnology* 10(59):12676-12683.
- Kadam, D., R. Goyal, M. Gupta. 2011. Mathematical modeling of convective thin layer drying of basil leaves. *Journal of Medicinal Plants Research* 5(19):4721-4730.
- Kalaivani, K., V. Chitradevi. 2013. Mathematical modeling on drying of *Syzygium Cumini* (L.). *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 6(4):96-103.
- Kaya, A., O. Aydin. 2009. An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves. *Energy Conversion and Management* 50(1):118-124.
- Kucuk, H., A. Midilli, A. Kilic, I. Dincer. 2014. A review on thin-layer drying-curve equations. *Drying Technology* 32(7):757-773.
- Kumar, C., M. Karim, M. Joardder. 2014. Intermittent drying of food products: A critical review. *Journal of Food Engineering* 121:48-57.
- Manalu, L.P. 2011. Optimasi pengeringan lapisan tipis simplisia temu putih dan temu lawak berdasarkan analisis eksergi. (Disertasi). Sekolah Pascasarjana, IPB. Bogor.
- McMinn, W.A.M., M.A.M. Khraisheh, T.R.A. Magee. 2003. Modelling the mass transfer during convective, microwave and combined microwave-convective drying of solid slabs and cylinders. *Food Research International* 36(9):977-983.
- Mrkic, V., M. Ukrainczyk, B. Tripalo. 2007. Applicability of moisture transfer Bi-Di correlation for convective drying of broccoli. *Journal of Food Engineering* 79(2):640-646.
- Okos, M.R., O. Campanella, G. Narshimhan, R.K. Singh. 1992. Food Dehydration, in Heldman, D.R., D.B. Lund (Ed.). *Handbook of Food Engineering*. CRC Press. Boca Raton. P 601-744.
- Ozbek, B., G. Dadali. 2007. Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering* 83(4):541-549.
- Panchariya, P., D. Popovic, A. Sharma. 2002. Thin-layer modelling of black tea drying process. *Journal of Food Engineering* 52(4):349-357.
- Pardeshi, I.L., S. Arora, P.A. Borker. 2009. Thin-Layer Drying of Green Peas and Selection of a Suitable Thin-Layer Drying Model. *Drying Technology* 27(2):288-295.
- Park, K., Z. Vohnikova, F. Brod. 2002. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). *Journal of Food Engineering* 51(3):193-199.
- Patel, J., A.D. Dhamat, A.A. Patel, N. Patel. 2012. Ethnomedicinal, phytochemical and preclinical profile of *guazuma ulmifolia* lam. *Pharma Science Monitor*. p. 66 - 78.
- Pin, K.Y., T.G. Chuah, A.A. Rashih, C.L. Law, M.A. Rasadah, T.S.Y. Choong. 2009. Drying of Betel Leaves (*Piper betle* L.): Quality and Drying Kinetics. *Drying Technology* 27(1):149-155.
- Potitate, Y., S. Phoungchandang, W.L. Kerr. 2014. The Effects of Predrying Treatments and Different Drying Methods on Phytochemical Compound Retention and Drying Characteristics of *Moringa Leaves (Moringa oleifera* Lam.). *Drying Technology* 32(16):1970-1985
- Premi, M., H. Sharma, A. Upadhyay. 2012. Effect of air velocity and temperature on the drying kinetics of drumstick leaves (*Moringa oleifera*). *International journal of food engineering* 8(4).
- Sharma, S.K., S.J. Mulvaney, S.S.H. Rizvi. 2000. *Food Process Engineering*. New York: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Shi, Q., Y. Zheng, Y. Zhao. 2013. Mathematical

- modeling on thin-layer heat pump drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) slices. *Energy Conversion and Management* 71:208-216.
- Torki-Harchegani, M., D. Ghanbarian, M. Sadeghi. 2015. Estimation of whole lemon mass transfer parameters during hot air drying using different modelling methods. *Heat and mass transfer* 51(8):1121-1129.
- Torki-Harchegani, M., D. Ghanbarian, P. Ghasemi, M. Sadeghi. 2016a. Dehydration behaviour, mathematical modelling, energy efficiency and essential oil yield of peppermint leaves undergoing microwave and hot air treatments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58:407-418.
- Torki-Harchegani, M., M. Ghasemi-Varnamkhasti, D. Ghanbarian, M. Sadeghi, M. Tohidi. 2016b. Dehydration characteristics and mathematical modelling of lemon slices drying undergoing oven treatment. *Heat and Mass Transfer* 52(2):281-289.
- Tulliza, I.S., A.H. Tambunan, U. Ahmad. 2010. Pengaruh Penyusutan Temu Putih (*Curcuma zedoaria (Berg) Roscoe*) Terhadap Karakteristik Pengerinan Lapisan Tipis. *Jurnal Keteknik Pertanian* 24(2);107-114.
- Zogzas, N.P., Z.B. Maroulis, D. Marinos-Kouris. 1996. Moisture Diffusivity Data Compilation in Foodstuffs. *Drying Technology* 14(10):2225-2253.