



PENGERINGAN AMPAS TEBU PADA MICROWAVE: KINETIKA PENGERINGAN, DIFUSI EFEKTIF, DAN ASPEK ENERGI

DRYING OF SUGARCANE BAGASSE IN THE MICROWAVE: DRYING KINETICS, EFFECTIVE DIFFUSION, AND ENERGY ASPECTS

Melvin Emil Simanjuntak¹, Painsi Sri Widyawati²

¹Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No. 1 Kampus USU Medan

²Universitas Katolik Widya Mandala, Jl. Dinoyo Kav 42-44 Surabaya
email: mesimanjuntak@yahoo.com

Diserahkan [25 Mei 2021]; Diterima [14 Juni 2022]; Dipublikasi [31 Agustus 2022]

ABSTRACT

Drying is a reduction of the moisture in a material to improve the quality of the material. In a sugar factory, bagasse is a by-product that is used as fuel in a boiler. This bagasse has a high moisture content, so it still needs to be dried. In this study, the drying was carried out by using a microwave where the bagasse was chopped about 3 cm and the sample for each experiment was 150 g. The power used is 50, 60, 70, 80, 90 and 100% of the maximum power of 900 W. The sample weight is measured every minute and drying is considered complete when the mass has not changed. This study was aimed to determine the kinetics of drying and effective diffusion, on the drying of bagasse by microwave. The results showed that the rational model is the most suitable mathematical model of drying kinetics with the general form $MR = (a + bx) / (1 + cx + dx^2)$. This equation has the smallest R^2 value of 0.99926 and the largest RMSE value is 0.008874. The effective diffusion is in the range of 1.044×10^{-7} to 2.009×10^{-7} (m^2/s). The activation energy value E_a is 4.789 W/g. The smallest SMER is in the range of 0.3229 - 0.4756 kg/kWh. SEC value is in the range of 3.10 to 2.10 kWh/kg. The greater the power used, the greater the D_{eff} , SMER, MER, while the SEC will be smaller.

Keyword: drying; sugarcane bagasse; microwave; mathematic model of kinetics; energy

ABSTRAK

Pengeringan merupakan pengurangan kadar air dalam suatu bahan untuk meningkatkan kualitas bahan tersebut. Pada suatu pabrik gula ampas tebu merupakan hasil samping yang digunakan sebagai bahan bakar di boiler. Ampas tebu ini memiliki kadar air yang masih tinggi sehingga masih perlu dikeringkan. Pada penelitian ini pengeringan dilakukan menggunakan microwave dimana ampas tebu dicacah sekitar 3 cm dan sampel setiap percobaan adalah seberat sebesar 150 g. Daya yang digunakan adalah 50, 60, 70, 80, 90 dan 100% dari daya maksimal 900 W. Berat sampel diukur setiap menit dan pengeringan dianggap selesai ketika massanya sudah tidak berubah. Penelitian ini ditujukan untuk mengetahui kinetika pengeringan dan difusi efektif, pada pengeringan ampas tebu dengan *microwave*. Hasil penelitian menunjukkan model matematika kinetika pengeringan yang paling sesuai adalah model rasional dengan bentuk umum $MR = (a + bx) / (1 + cx + dx^2)$. Persamaan ini memiliki nilai R^2 paling kecil sebesar 0,99926 dan nilai RMSE terbesar adalah 0,008874. Difusi efektif pada kisaran $1,044 \times 10^{-7}$ (m^2/s) hingga $2,009 \times 10^{-7}$ (m^2/s) dan nilai energi aktivasi E_a adalah sebesar 4,789 W/g. SMER terkecil pada kisaran 0,3229 - 0,4756 kg/kWh. Nilai SEC adalah sebesar 3,10 hingga 2,10 kWh/kg. Semakin besar daya yang digunakan maka D_{eff} , SMER, MER semakin besar sedangkan SEC akan semakin kecil.

Kata kunci: ampas tebu; energy; *microwave*; model matematika kinetika; pengeringan

Saran sitasi: Simanjuntak, M. E & Widyawati, P. S. 2022. Pengeringan Ampas Tebu Pada Microwave: Kinetika Pengeringan, Difusi Efektif, dan Aspek Energi. *Jurnal Teknologi Hasil Pertanian*, 15(1), 62-73.. <https://doi.org/10.20961/jthp.v15i1.51495>

PENDAHULUAN

Pengeringan adalah suatu upaya untuk mengurangi kandungan air yang terdapat dalam suatu bahan. Proses ini ditujukan untuk meningkatkan kualitas suatu bahan. Proses pengeringan dapat dilakukan melalui penguapan maupun non-penguapan. Pengeringan melalui penguapan seperti pengeringan dengan uap terfluidisasi, udara panas pada drum berputar, sinar matahari dan pengeringan dengan *microwave*. Metode pengeringan non-penguapan atau *dewatering* seperti *dewatering* hidrotermal dan *dewatering* termal mekanis (Li et al., 2018). Pengeringan melalui penguapan terjadi karena adanya perpindahan panas dan massa secara bersamaan dari bagian dalam material ke lingkungan sekitar.

Akhir-akhir ini pengeringan menggunakan *microwave* semakin berkembang karena beberapa keuntungan yang diperoleh. Keuntungan utama pengeringan ini adalah: laju pengeringan yang tinggi, hasil yang lebih seragam, lebih hemat energi dan hemat ruang, serta efisiensi energi yang lebih tinggi (Haghi dan Amanifard, 2008). *Microwave* atau gelombang mikro merupakan bagian gelombang elektromagnet yang memiliki panjang gelombang 1 mm – 1m dan memiliki frekuensi 300 MHz – 300 GHz. Gelombang dengan panjang seperti ini dapat menembus langsung ke dalam material dan akan membuat molekul saling bergesekan sehingga menimbulkan panas (Pozar, 2011). Energi elektromagnetik pada pita 915 hingga 2450 MHz dapat diserap dan diubah menjadi panas oleh bahan yang bersifat dielektrik seperti air atau zat lain seperti karbon dan produk organik (Maskan, 2000). Pemanasan yang terjadi bersifat volumetrik dan memberikan efek yang cepat dan seragam di seluruh produk. Penyerapan energi yang lebih cepat oleh molekul air menyebabkan penguapan air yang terjadi juga lebih cepat. Metaxas dan Meredith, 1983 menyebutkan bahwa terjadinya pengeringan material menggunakan *microwave* disebabkan terjadinya konduksi ionik dan rotasi bipolar molekul air. Faktor-faktor yang

paling mempengaruhi proses pengeringan oleh *microwave* adalah massa dan jumlah energi gelombang mikro yang diserap (Silva et al., 2021).

Ampas tebu adalah biomassa merupakan hasil samping setelah perasan air dari batang tebu di pabrik gula. Biomassa ini digunakan sebagai bahan bakar organik untuk boiler. Ampas tebu memiliki kelemahan yaitu kadar air yang tinggi sekitar 50% (Hugot dan Jenkins, 1986). Ampas tebu ini perlu dikeringkan untuk meningkatkan unjuk kerja pembangkit daya. Ada banyak metode pengeringan yang dapat diterapkan. Salah satunya adalah pengeringan dengan *microwave*.

Penelitian mengenai kinetika pengeringan, difusi efektif dan aspek energi pada pengeringan ampas tebu belum menggunakan *microwave* belum ada dilakukan. Penelitian ini menggunakan *microwave* sebagai alat pengering karena konsumsi energi yang lebih efisien dibanding alat pengering lain seperti pengering *tray dryer*, *heat-pump dryer* dan *freeze dryer* (Baysal et al., 2015) dan ketersediaan alat di pasaran. Sedangkan pada bahan pangan sudah cukup banyak seperti pada delima (Horuz dan Maskan, 2015) apel (Aghilinategh et al., 2015) dan kentang (Wojdylo et al., 2014). Pengeringan biomassa menggunakan *microwave* dilakukan terhadap ampas sorgum (Fennell dan Boldor, 2014). Selain itu juga untuk membantu proses torrefaksi (Amer et al., 2019), penghematan energi pada pengeringan wortel, karet latex dan lada menggunakan gelombang mikro oleh Hartulistiyoso, 2012.

Analisis model matematika pengeringan ampas tebu dengan gelombang mikro disertai analisis difusi, energi aktivasi dan ekstraksi *moisture* masih sangat sulit ditemukan. Ada banyak persamaan yang memodelkan kinetika pengeringan. Persamaan diperoleh dengan cara meregesikan perubahan rasio kelembapan kemudian dievaluasi dengan metode statistik untuk menentukan persamaan yang paling sesuai. Pada penelitian ini model matematika kinetika pengeringan diperoleh dari berbagai literatur kemudian dicari model yang paling sesuai dengan metode statistik. Persamaan yang

paling sesuai dievaluasi berdasarkan nilai-nilai koefisien korelasi (R), koefisien determinasi (R²) yang paling tinggi. Selain itu nilai Chi kuadrat tereduksi (χ^2) dan RMSE yang paling rendah adalah yang paling baik (Kingsly dan Singh, 2007).

Penelitian ini ditujukan untuk mendapatkan informasi mengenai model matematika kinetika pengeringan, difusi efektif, energi aktivasi, *specific moisture extraction rate* dan *specific energy consumption (SEC)* pada pengeringan ampas tebu menggunakan *microwave*.

BAHAN DAN METODE

Bahan

Penelitian ini menggunakan bahan baku ampas tebu hasil samping dari pabrik gula di Kota Medan. Material ini dicacah dengan ukuran sekitar 3 cm. Setiap percobaan, massa sampel yang digunakan seberat 150 g.

Alat

Aluminium foil microwaveable digunakan sebagai wadah sampel memiliki berat 14,13 g seperti ditunjukkan pada **Gambar 1**. *Microwave* yang dipakai adalah yang ada di pasaran dengan merek Sharp R-728 (W) IN dan memiliki volume 25 liter. *Microwave* ini memiliki ukuran panjang, lebar dan tinggi masing-masing sebesar 514 x 249 x 308 mm seperti ditunjukkan pada **Gambar 1**. Sampel diletakkan pada piringan gelas yang berputar. Frekuensi operasi *microwave* ini adalah 2,45 MHz dan memiliki daya maksimal 900 W serta 11 tingkat pengaturan daya. Neraca massa yang digunakan untuk mengukur massa sampel adalah SF-400C dengan akurasi 0,01 g. Variasi daya yang digunakan pada penelitian ini berdasarkan level Daya yang tersedia pada *microwave* dan tidak terlalu rendah mengingat waktu pengeringan harus relatif singkat. Variasi tersebut adalah 50, 60, 70, 80, 90 dan 100 % dari daya maksimum. Daya ini ekuivalen dengan daya 450, 540, 630, 720, 810 dan 900 Watt.



Gambar 1 Bahan dan alat percobaan

Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimen. Sampel yang ada dikeringkan dimana massanya ditimbang setiap menit untuk mengetahui perubahan kadar air yang terjadi. Sampel ditimbang bersama wadah untuk menghindarkan adanya massa yang tercecer. Setelah itu dimasukkan kembali secepatnya ke dalam *microwave* untuk melanjutkan pengeringan.

Analisis data

Pengukuran berat sampel dilakukan setiap menit, selanjutnya dianalisis untuk menghasilkan berbagai data, seperti kadar air, rasio kelembaban, laju pengeringan, data statistik, difusi efektif SMER dan SME Kemudian dievaluasi secara statistik berdasarkan persamaan-persamaan berikut ini :

Pada penelitian ini kadar air dihitung berdasarkan basis basah menurut persamaan (1).

$$MC = \frac{M_w}{M_{total}} \quad (1)$$

dimana:

MC = kadar air (%)

M_w = massa air (g)

M_{total} = massa air + padatan (g)

Rasio kelembaban (besaran tidak memiliki satuan) dihitung berdasarkan persamaan (2)

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

dimana

MR = rasio kelembaban

M_t = kadar air sesaat

M_i = kadar air awal

M_e = kadar air kesetimbangan

Proses pengeringan mencakup pengeringan tahap pertama, periode laju konstan dan laju menurun (Touil *et al.*, 2014). Pada material yang sangat lembap, periode laju konstan akan mengambil rentang waktu yang cukup lama. Sedangkan untuk benda yang memiliki kelembaban lebih rendah maka periode ini memiliki rentang waktu yang singkat. Laju pengeringan kandungan air pada material dihitung berdasarkan persamaan (3):

$$DR = \frac{Mt_1 - Mt_2}{\Delta t} \quad (3)$$

dimana

DR = laju pengeringan, g/menit

Mt_1 = kadar air pada waktu t, %

Mt_2 = kadar air pada waktu t + 1 menit, %

Δt = selang waktu, menit

Pada penelitian ini rasio kelembaban dihitung dari 7 model persamaan seperti ditunjukkan pada **Tabel 1**. Ketujuh model tersebut merupakan yang sering digunakan sebagai model persamaan kinetika pengeringan pada penelitian lain. Data rasio kelembaban diregresikan dengan persamaan-persamaan tadi dengan *software* CurveExpert Professional 2.3.0. Kemudian dilihat nilai-nilai koefisien korelasi (R^2). Analisa statistik dilakukan untuk memperoleh nilai nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) dan *Chi-Square* (χ^2) masing-masing persamaan dengan MS-Excel sehingga diperoleh satu model kinetika pengeringan yang paling sesuai dengan hasil percobaan. Koefisien determinasi dihitung berdasarkan persamaan (4):

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum(MR - MR_{Prd})^2}{\sum(MR - \overline{MR})^2} \right] \quad (4)$$

dimana:

R = koefisien determinasi

MR = rasio kelembaban hasil percobaan (tak berdimensi) atau persamaan 2

MR_{Prd} = rasio kelembaban prediksi (tak berdimensi) atau model persamaan yang digunakan (**Tabel 1**)

\overline{MR} = rasio kelembaban hasil percobaan rata-rata

Setelah perhitungan nilai R^2 , maka dihitung nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk mengetahui kesalahan antara hasil prediksi dan hasil percobaan. Nilai RMSE dihitung mengikuti persamaan (5)

$$RSME = \left(\frac{\sum(MR_{Prd} - MR)^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Kemudian dihitung nilai *Chi-square* (χ^2) yang diperoleh dari persamaan (6)

$$\chi^2 = \frac{\sum(MR - MR_{Prd})^2}{N - n} \quad (6)$$

dimana

χ^2 = *chi-square* tereduksi

N = jumlah observasi

n = jumlah parameter, bilangan integer positif

Difusi efektif menjelaskan laju pergerakan kelembaban tanpa memperhitungkan mekanisme yang terlibat. Nilai difusi efektif dihitung menurut persamaan (7).

$$MR = \frac{M_t}{M_o} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff}}{4L^2} t\right) \quad (7)$$

Bentuk persamaan di atas dapat disederhanakan dalam bentuk logaritma menjadi persamaan (8).

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

dimana

L = tebal material, m

D_{eff} = difusi efektif, m^2/s

n = bilangan positif

Nilai difusi efektif pada persamaan (8) adalah kemiringan kurva yang dilinierkan dengan cara mem-plot nilai ln MR dan waktu pengeringan. Nilai D_{eff} dihitung berdasarkan persamaan (9).

$$D_{eff} = \text{kemiringan} \times \frac{4L^2}{\pi^2} \quad (9)$$

Energi aktivasi E_a adalah energi minimum yang harus diberikan supaya reaksi/penguapan dapat terjadi. Energi aktivasi pada pengeringan dihitung melalui persamaan (10)

$$D_{eff} = D_o \exp\left(-\frac{E_a \times m}{P}\right) \quad (10)$$

dimana:

- D_o = faktor difusi (m^2/s),
- E_a = energi aktivasi (kJ/mol)
- m = massa sampel (kg)
- P = daya *microwave* (W)

Nilai energi aktivasi E_a dan faktor difusi D_o dapat diperoleh dengan mem-plot nilai ln (D_{eff}) dan m/P dari persamaan

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_o) - \left(\frac{E_a \times m}{P}\right)$$

Laju ekstraksi kelembapan spesifik (*specific moisture extraction rate, SMER*) menunjukkan keefektifan pemakaian energi

yang digunakan dalam proses pengeringan. SMER didefinisikan sebagai perbandingan antara massa uap air yang diuapkan dengan energi total yang dibutuhkan (Baysal *et al.*, 2015). Nilai SMER dihitung berdasarkan persamaan (11).

$$SMER = \frac{\text{Jumlah air diuapkan selama pengeringan}}{\text{Energi digunakan selama proses pengeringan}} \frac{kg}{kWh} \quad (11)$$

Laju ekstraksi kelembapan (*moisture extraction rate, MER*) didefinisikan sebagai jumlah massa kandungan air yang diuapkan per satuan waktu dan menunjukkan kapasitas pengering (Prasertsan dan Saensaby, 1998). Nilai MER dihitung berdasarkan persamaan (12).

$$MER = \frac{\text{Jumlah air diuapkan selama pengeringan}}{\text{Waktu yang dibutuhkan}} \frac{kg}{h} \quad (12)$$

Konsumsi energi spesifik (*specific energy consumption, SEC*) merupakan kebalikan dari SMER. Sering digunakan untuk membandingkan efisiensi energi dari berbagai jenis pengering (Jindarat *et al.*, 2011). SEC didefinisikan sebagai energi total yang dibutuhkan untuk menguapkan satu satuan massa air. SEC dihitung berdasarkan persamaan (13).

$$SEC = \frac{\text{Energi digunakan selama proses pengeringan}}{\text{Jumlah air yang diuapkan selama pengeringan}} \frac{kWh}{kg} \quad (13)$$

Tabel 1 Model matematika kinetika pengeringan

| No | Nama Model | Persamaan | Referensi |
|----|---------------------------|---|-----------------------------|
| 1 | Modified Page Equation II | $MR = a \exp\left(-k \left(\frac{t}{L_2}\right)^n\right)$ | Diamante dan Munro, 1991 |
| 2 | Wang dan Singh | $MR = 1 + at + bt^2$ | Akpinar, 2010 |
| 3 | Logaritmik | $MR = a \exp(-kt) + c$ | Togul dan Pehlivan, 2004 |
| 4 | Two Term Exponential | $MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-kat)$ | Inyang, Oboh dan Etuk, 2018 |
| 5 | Verma <i>et al.</i> | $MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$ | Verma <i>et al.</i> , 1985 |
| 6 | Weibull | $MR = a \exp\left(-c \left(\frac{t}{2L}\right)\right)$ | Diamante dan Munro, 1991 |
| 7 | Rasional | $MR = (a + bx) / (1 + cx + dx^2)$ | Çinkır dan Süfer, 2020 |

HASIL DAN PEMBAHASAN

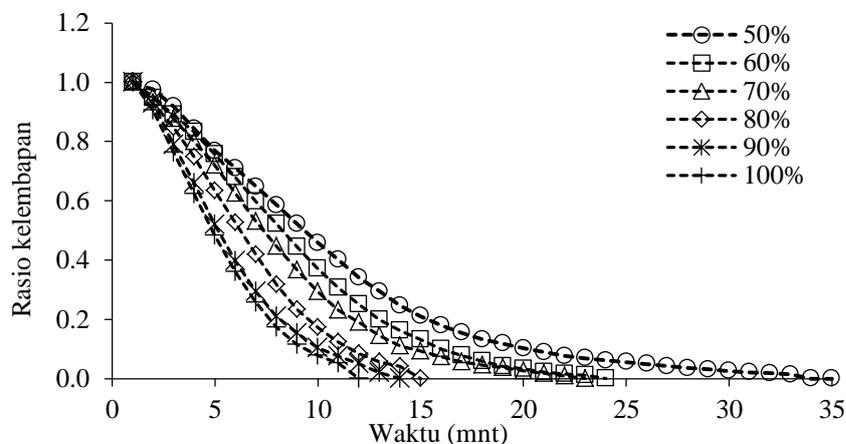
Rasio Kelembapan

Ketika proses pengeringan berlangsung, kandungan air akan berkurang karena penguapan. Perubahan kadar air dan rasio kelembapan yang diperoleh dari percobaan ditunjukkan pada **Gambar 2**. Grafik menunjukkan kecepatan pengurangan rasio kelembapan sangat dipengaruhi oleh daya yang diterapkan. Daya yang besar akan menguapkan air lebih cepat dibandingkan dengan daya yang lebih kecil. Hal ini karena peningkatan daya akan menyebabkan peningkatan medan elektromagnetik, sehingga dapat memberi efek terhadap intensitas gesekan molekul air yang semakin tinggi, air menjadi lebih cepat panas dan akan lebih cepat menguap. Fenomena yang serupa juga ditemukan oleh Zhao et al., 2019 dan Silva et al., 2021. Daya 90 dan 100 % memberikan selisih yang tidak signifikan dibandingkan dengan selisih daya yang lain. Kejadian yang sama juga dijumpai pada pengeringan kacang hijau oleh Doymaz et al., 2015. Perubahan rasio kelembapan pada pengeringan dengan daya 600 dan 800 W menunjukkan selisih yang berbeda tidak jauh. Sedangkan pengeringan dengan daya 360 dan 600 W memberikan selisih yang sedikit lebih jauh. Hal ini terjadi karena pada daya tingkat daya 90% dan 100% tidak terlalu mempengaruhi kecepatan penguapan. Hal ini diindikasikan oleh rasio kelembapan

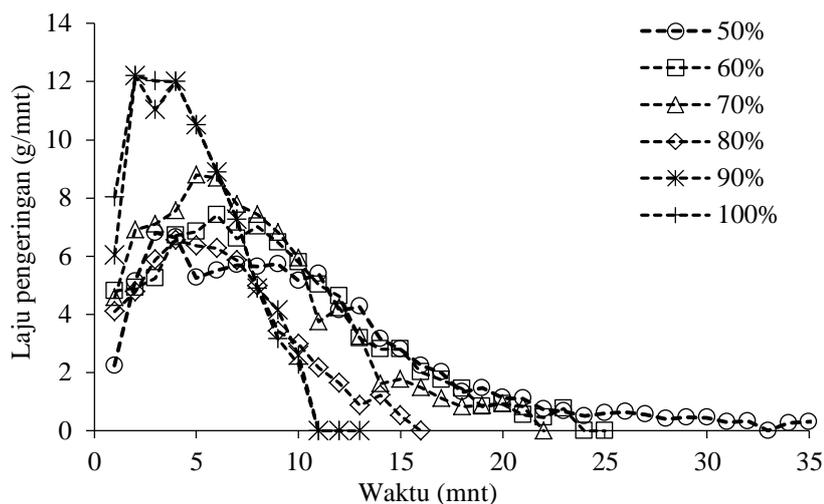
yang hampir sama dan laju penguapan yang hampir sama.

Laju Pengeringan

Laju pengeringan merupakan kecepatan pengurangan kadar air per satuan waktu. Nilai laju pengeringan pada penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 3**. Awal pengeringan merupakan periode awal pemanasan kemudian diikuti periode konstan dan dilanjutkan dengan periode *falling rate*. Waktu yang dibutuhkan masing masing periode untuk tiap-tiap daya yang dibutuhkan berbeda. Semakin besar daya yang digunakan maka masing-masing periode membutuhkan waktu yang semakin singkat. Pada penggunaan daya 90 dan 100 % periode persiapan berlangsung selama 2 menit, sedangkan periode konstan berlangsung selama 4 menit dan berikutnya adalah periode laju jatuh hingga pengeringan selesai. Pada pengeringan dengan daya 50 %, periode laju konstan berlangsung hingga menit ke- 8, kemudian diikuti periode laju jatuh. Pada periode pemanasan dan periode laju konstan, laju pengeringan memiliki nilai yang besar karena air yang terdapat di bagian permukaan masih cukup banyak sehingga sangat mudah untuk terdifusi ke udara. Periode laju jatuh menunjukkan penurunan laju pengeringan karena jumlah air yang tinggal sedikit dan kecepatannya akan dikendalikan oleh kecepatan difusi dari bagian dalam ke permukaan sebelum terdifusi ke udara.



Gambar 2 Rasio kelembapan vs Waktu



Gambar 3 Laju pengeringan air vs Waktu

Analisa Statistik

Tabel 2 menunjukkan nilai koefisien determinasi, *standard error*, RMSE dan *chi-square* tereduksi dari ketujuh model persamaan yang diuji, tabel juga memuat model, daya yang digunakan dan konstanta untuk tiap persamaan. Data pada **Tabel 2** menunjukkan nilai R^2 tertinggi adalah persamaan model Rasional dengan bentuk umum

$$MR = (a + bx)/(1 + cx + dx^2).$$

Persamaan ini memiliki nilai R^2 yang lebih tinggi dan nilai RMSE yang lebih kecil dibanding model-model lain. Kemudian diikuti oleh model Modifikasi II persamaan Page dengan bentuk umum $MR = a \exp(-k \left(\frac{t}{L_2}\right)^n)$. Hasil regresi ini menunjukkan bahwa persamaan yang paling sesuai pada penelitian ini adalah model Rasional. Model ini memiliki koefisien korelasi yang paling mendekati nilai 1 dibanding model model persamaan yang lain.

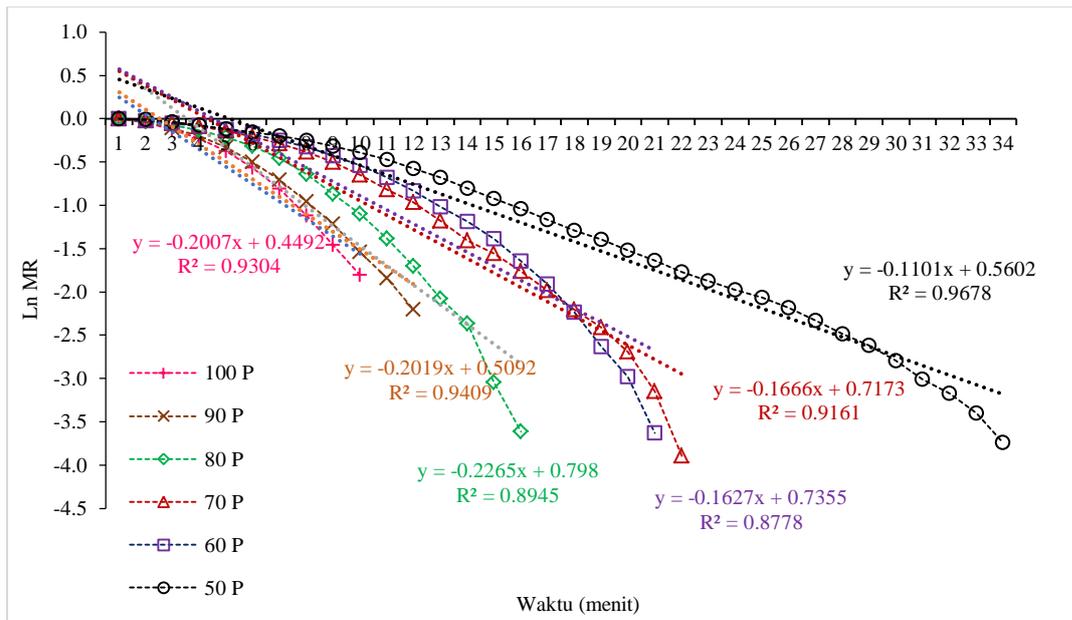
Model Rasional pernah digunakan oleh Çinkir and Süfer, 2020 pada pengeringan lobak merah serta Haghi dan Ghanadzadeh, 2005 pada pengeringan serat wool.

Difusi Efektif dan Energi Aktifasi

Gambar 4 menunjukkan linierisasi In MR terhadap waktu. Nilai diffuse efektif D_{eff} yang diperoleh berdasarkan persamaan (8) ditampilkan pada **Tabel 3**. Difusi efektif terlihat meningkat seiring peningkatan daya yang digunakan. Nilai D_{eff} terendah adalah sebesar $1,044 \times 10^{-7}$ (m^2/s) pada daya 50% dan tertinggi adalah sebesar $2,009 \times 10^{-7}$ (m^2/s) pada daya 100%. Selisih yang terjadi dapat disebut berubah secara linier. Hal ini diperjelas pada **Gambar 5** dimana nilai R^2 sebesar 0,894. Peningkatan energi yang diterapkan akan meningkatkan intensitas gesekan antar molekul sehingga meningkatkan panas di dalam material. Hal seperti ini juga disampaikan oleh Zhao et al., 2019 dan Fu et al., 2017.

Tabel 2 Hasil analisis statistik untuk model matematika kinetika pengeringan

| Model | Daya | Konstanta | R ² | Std Error | RMSE | Chi Square (χ^2) |
|---------------------------|------|--|----------------|-----------|----------|-------------------------|
| Rasional | 50% | a = 9,8747 E-01; b = -2,62711 E-02; c = -2,58944 E-02; d = 4,54539 E-03 | 0,99926 | 0,99966 | 0,008874 | 8,34E-05 |
| | 60% | a = 9,84375 E-01; b = -4,66146 E-02; c = -4,55234 E-02; d = 4,89791 E-03 | 0,99946 | 0,00901 | 0,008198 | 7,36E-05 |
| | 70% | a = 9,86416 E-01; b = -4,40904 E-02; c = -4,62012 E-02; d = 6,89325 E-03 | 0,99937 | 0,00955 | 0,008678 | 8,25E-05 |
| | 80% | a = 9,86079 E-01; b = -6,29708 E-02; c = -6,34694 E-02; d = 1,01402 E-02 | 0,99940 | 0,00991 | 0,008664 | 8,51E-05 |
| | 90% | a = 9,9915 E-01; b = -7,33494 E-02; c = -5,44614 E-02; d = 1,28406 E-02 | 0,99966 | 0,00761 | 0,006522 | 4,91E-05 |
| | 100% | a = 9,87271 E-01; b = -8,14217 E-02; c = -6,43566 E-02; d = 1,40900 E-02 | 0,99948 | 0,00899 | 0,007432 | 6,53E-05 |
| Weibull | 50% | b = 1,509712 E+01; n = 1,69490 E+00 | 0,99876 | 0,01217 | 0,01152 | 0,000141 |
| | 60% | b = 1,18246 E+01; n = 2,12911 E+00 | 0,99818 | 0,01569 | 0,044689 | 0,002187 |
| | 70% | b = 1,1107 E+01; n = 1,95905 E+00 | 0,99921 | 0,01021 | 0,009756 | 0,000104 |
| | 80% | b = 8,53715 E+00; n = 2,09957 E+00 | 0,99882 | 0,01292 | 0,012137 | 0,000167 |
| | 90% | b = 7,13089 E+00; n = 1,92684 E+00 | 0,99825 | 0,01576 | 0,014669 | 0,000248 |
| | 100% | b = 6,58841 E+00; n = 1,95543 E+00 | 0,99719 | 0,01878 | 0,01545 | 0,000282 |
| Verma | 50% | a = 3,07144 E+01; k = 1,5245 E-01; g = 1,58387 E-01 | 0,99732 | 0,01814 | 0,016548 | 0,00029 |
| | 60% | a = 5,82233 E+01; k = 2,08667 E-01; g = 2,13473 E-01 | 0,98157 | 0,05119 | 0,047739 | 0,002496 |
| | 70% | a = 5,07491 E+01; k = 2,17646 E-01; g = 2,23244 E-01 | 0,99092 | 0,03548 | 0,033089 | 0,001199 |
| | 80% | a = 5,15470 E+01; k = 2,88550 E-01; g = 2,96074 E-01 | 0,99228 | 0,04831 | 0,21003 | 0,049994 |
| | 90% | a = 4,811952 E+01; k = 3,38397 E-01; g = 3,47408 E-01 | 0,98930 | 0,04063 | 0,036343 | 0,001524 |
| | 100% | a = 4,68737 E+01; k = 3,63603 E-01; g = 3,73476 E-01 | 0,98376 | 0,04760 | 0,038085 | 0,001714 |
| Two Term Exponential | 50% | a = 2,13838 E+00; k = 1,144025 E-01 | 0,99558 | 0,02298 | 0,021377 | 0,000484 |
| | 60% | a = 2,23328 E+00; k = 1,50916 E-01 | 0,97574 | 0,05732 | 0,054772 | 0,003286 |
| | 70% | a = 2,21287 E+00; k = 1,58848 E-01 | 0,98685 | 0,04167 | 0,039823 | 0,001737 |
| | 80% | a = 2,23433 E+00; k = 2,09174 E-01 | 0,97926 | 0,05418 | 0,050894 | 0,002936 |
| | 90% | a = 2,19743 E+00; k = 2,48142 E-01 | 0,98530 | 0,04576 | 0,0426 | 0,002094 |
| | 100% | a = 2,188777 E+00; k = 2,66390 E-01 | 0,978488 | 0,05196 | 0,044073 | 0,002296 |
| Modified Page Equation II | 50% | a = 1,00268 E+00; k = 4,90526 E-01; L = 9,887749 E+00; n = 1,68723 E+00 | 0,99877 | 0,01251 | 0,011482 | 0,00014 |
| | 60% | a = 9,73320 E-01; k = 1,56692 E-01; L = 5,27136 E+00; n = 2,24683 E+00 | 0,99903 | 0,01209 | 0,010951 | 0,000131 |
| | 70% | a = 9,89657 E-01; k = 2,03195 E+00; L = 5,06322 E+00; n = 1,99717 E+00 | 0,99933 | 0,00991 | 0,009012 | 8,9E-05 |
| | 80% | a = 2,23433 E+00; k = 2,09174 E-01 | 0,97926 | 0,05418 | 0,00927 | 9,74E-05 |
| | 90% | a = 9,861043 E-01; k = 2,95226 E-01; L = 3,88572 E+00; n = 1,97736 E+00 | 0,99847 | 0,01605 | 0,013745 | 0,000218 |
| | 100% | a = 9,60849 E-01; k = 1,24728 E-01; L = 2,52657 E+00; n = 2,11283 E+00 | 0,99842 | 0,01575 | 0,016042 | 0,000304 |
| Wang dan Singh | 50% | a = -4,91950 E-02; b = 5,70803 E-04 | 0,97928 | 0,04973 | 0,048177 | 0,002458 |
| | 60% | a = -4,86677 E-02; b = -4,64548 E-05 | 0,97686 | 0,05599 | 0,057352 | 0,003603 |
| | 70% | a = -5,78142 E-02; b = 4,30991 E-04 | 0,97433 | 0,05822 | 0,10308 | 0,011637 |
| | 80% | a = -6,95241 E-02; b = 1,31829 E-04 | 0,97546 | 0,05894 | 0,055367 | 0,003474 |
| | 90% | a = -8,99190 E-02; b = 9,76347 E-04 | 0,98200 | 0,05064 | 0,047147 | 0,002565 |
| | 100% | a = -9,04087 E-02; b = 2,31046 E-04 | 0,98119 | 0,04858 | 0,042783 | 0,002163 |
| Logaritmik | 50% | a = 1,40500 E+00; k = 4,79055 E-02; c = -2,97799 E-01 | 0,98460 | 0,04352 | 0,04125 | 0,001802 |
| | 60% | a = 3,70066 E+00; k = 1,70611 E-02; c = -2,61878 E+00 | 0,98429 | 0,04727 | 0,044085 | 0,002129 |
| | 70% | a = 2,08795 E+00; k = 3,61583 E-02; c = -9,95415 E-01 | 0,98284 | 0,04876 | 0,045475 | 0,002265 |
| | 80% | a = -6,95241 E-02; b = 1,31829 E-04 | 0,97546 | 0,05894 | 0,046311 | 0,002431 |
| | 90% | a = 2,30021 E+00; k = 4,85051 E-02; c = -1,22636 E+00 | 0,98780 | 0,04339 | 0,038811 | 0,001738 |
| | 100% | a = 2,28862 E+00; k = 5,88195 E-02; c = -1,15885 E+00 | 0,99300 | 0,03132 | 0,044433 | 0,002333 |



Gambar 4 Ln MR vs Waktu

Koefisien difusi menunjukkan kecepatan perpindahan massa air (kelembapan) selama percobaan pengeringan oleh gelombang mikro. Hal ini menunjukkan kadar air yang diuapkan per satuan waktu. Perhitungan dilakukan dengan asumsi penyusutan yang dapat diabaikan serta koefisien dan temperatur yang konstan. Hasil perhitungan menurut persamaan (9) dan (10) menunjukkan nilai difusi efektif diperoleh seperti ditunjukkan pada **Tabel 3**.

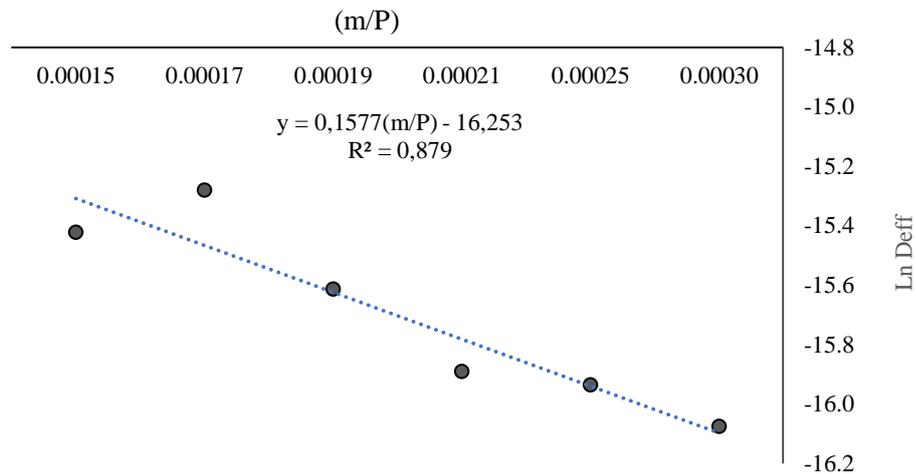
Energi aktivasi merupakan energi minimum untuk terjadinya suatu reaksi. Pada penelitian ini nilai energi aktivasi diperoleh dari persamaan (10). Nilai E_a pada penelitian ini diperoleh sebesar 4,789 W/g seperti

ditunjukkan pada **Tabel 3**. Nilai ini lebih kecil dibandingkan hasil penelitian Zhao et al., 2019 sebesar 13,455 W/g pada pengeringan batubara. Nilai yang kecil menandakan kandungan air yang terdapat pada ampas tebu lebih mudah menguap dibandingkan dengan yang terdapat pada batubara. Hal ini dimungkinkan mengingat bentuk ampas tebu yang berupa serat sehingga air relatif lebih mudah keluar dibandingkan dengan batubara yang berupa bongkahan. Selain itu juga struktur porositas yang berbeda antara ampas dan batubara. Hal ini mengakibatkan air pada ampas tebu lebih mudah terdifusi ke udara dibanding dengan batubara.

Tabel 3 Koefisien difusi efektif dan energi aktivasi

| Daya (%) | Deff (m ² /s) | Energi Aktivasi (W/g) | SMER (kg/kWh) | MER (kg/h) | SEC (kWh/kg) | m/P (kg/W) |
|----------|--------------------------|-----------------------|---------------|------------|--------------|------------|
| 50 | 1,044E-07 | 4,789 | 0,3229 | 1,45E-01 | 3,10 | 3,00E-04 |
| 60 | 1,201E-07 | 4,789 | 0,3957 | 2,14E-01 | 2,53 | 2,50E-04 |
| 70 | 1,258E-07 | 4,789 | 0,4025 | 2,54E-01 | 2,48 | 2,14E-04 |
| 80 | 1,659E-07 | 4,789 | 0,4549 | 3,28E-01 | 2,20 | 1,88E-04 |
| 90 | 2,316E-07 | 4,789 | 0,4546 | 3,68E-01 | 2,20 | 1,67E-04 |
| 100 | 2,009E-07 | 4,789 | 0,4756 | 4,28E-01 | 2,10 | 1,50E-04 |

$$D_o = 4,67 \times 10^{-7} \text{ (m}^2\text{/s)}$$



Gambar 5 Perbandingan m/P vs Ln Deff

SMER dan SEC

Specific moisture extraction rate hasil percobaan ditunjukkan pada **Tabel 3**. Nilai SMER terlihat meningkat sesuai dengan penggunaan daya. Pada daya 50% nilai SMER diperoleh 0,3229 kg/kWh dan pada penggunaan daya 100 % sebesar 0,4756 kg/kWh. Nilai SMER yang semakin tinggi mengindikasikan kandungan air yang diuapkan semakin banyak untuk setiap satuan energi sehingga proses pengeringan berlangsung lebih efisien. Nilai ini tidak jauh berbeda dengan yang diperoleh Baysal et al., 2015 yaitu sebesar 0,58 kg/kWh ketika mengeringkan irisan apel setebal 2 mm dengan daya 360 W. Sama halnya dengan SMER, laju ekstraksi kandungan air (MER) juga terlihat meningkat. Pada pemakaian daya 50%, nilai MER sebesar 3,10 kWh/kg dan pada pemakaian daya 100 % sebesar 2,10 kWh/kg. Sesuai dengan nilai SMER dan MER, konsumsi energi spesifik (SEC) menurun ketika daya diperbesar. Hal yang sama juga ditemukan oleh Çelen, 2019. Peningkatan daya yang digunakan akan mengakibatkan daya untuk evaporasi bertambah dan waktu pengeringan menjadi lebih singkat. Dengan demikian waktu menguapkan air akan berkurang dan energi yang dibutuhkan juga berkurang. Pada daya 50% SEC sebesar 3,10 kWh/kg dan pada daya 100% adalah sebesar 2,10 kWh/kg.

KESIMPULAN

Dari penelitian yang dilakukan diperoleh beberapa kesimpulan. Model matematika kinetika pengeringan yang paling sesuai adalah model rasional dengan bentuk umum $MR = (a + bx)/(1 + cx + dx^2)$. Model ini memiliki nilai R^2 terkecil yaitu sebesar 0,99926 pada daya 50 % dan RMSE terbesar adalah 0,008874 pada daya 50%. Nilai difusi efektif sebesar $1,044 \times 10^{-7}$ (m^2/s) hingga $2,009 \times 10^{-7}$ (m^2/s). Nilai energi aktivasi E_a adalah sebesar 4,789 W/g. SMER terkecil adalah 0,3229 pada daya 50% dan yang terbesar adalah sebesar 0,4756 pada daya 100%. Konsumsi energi spesifik SEC adalah sebesar 3,10 kWh/kg pada daya 50% dan terkecil adalah sebesar 2,10 kWh/kg pada daya 100%. Semakin besar daya yang digunakan maka D_{eff} , SMER, MER semakin besar sedangkan SEC akan semakin kecil.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Medan atas pendanaan yang diberikan untuk penelitian ini melalui skema Penelitian Dasar Kompetensi dengan sumber dana DIPA Polmed 2019.

DAFTAR PUSTAKA

- Aghilinategh, N., Rafiee, A., Golhikhani, A., Hosseinpour, S., Omid, M., Mohtasebi, S. S., dan Maleki, N. (2015). A comparative study of dried apple using hot air, intermittent and continuous microwave: evaluation of kinetic parameters and physicochemical quality attributes. *Food Science & Nutrition*, 3(6), 519–526.
- Akpınar, E. K. (2010). Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: modelling, performance analyses. *Energy Conversion Management*, 51, 2407–2418.
- Amer, M., Ahmed, M., Okawara, S., Nada, S., dan Elardany A. (2019). The effect of microwave drying pretreatment on dry torrefaction of agricultural biomasses. *Bioresource Technology*, 286, 1–11.
- Baysal, T., Ozbalita, N., Gokbulut, S., Capara, B., Tastan, O., dan Gurlek, G. (2015). Investigation of effect of various drying methods on the quality characteristics of apple slice and energy efficiency. *J. of Thermal Science and Technology*, 35(1), 135–144.
- Çelen, S. (2019). Effect of Microwave Drying on the Drying Characteristics, Color, Microstructure, and Thermal Properties of Trabzon Persimmon. *Foods*, 8(2), 1–19.
- Çinkır, N. İ. dan Süfer, Ö. (2020). Microwave drying of TURKISH red meat (watermelon) radish (*RAPHANUS SATIVUS* L.): effect of osmotic dehydration, pre-treatment and slice thickness. *Heat and Mass Transfer*, 56(12). <https://doi.org/10.1007/s00231-020-02930-w>
- Diamante, L. M. dan Munro, P. A. (1991). Mathematical modeling of hot air drying of sweet potato slices. *International Journal of Food Science and Technology*, 99.
- Doymaz, I., Kipcak, S. I., dan Piskin, S. (2015). Microwave drying of green bean slices: drying kinetics and physical quality. *Czech Journal Food Science*, 33(4), 367–376.
- Fennell, L. P. dan Boldor, B. (2014). Continuous microwave drying of sweet sorghum bagasse biomass. *Biomass and Bioenergy*, 70, 542–552.
- Haghi, A. K. dan Amanifard, N. (2008). Analysis of heat and mass transfer during microwave drying of food products. *Brazilian Journal Chemical Engineering*, 25, 491–501.
- Haghi, A. K. dan Ghanadzadeh, H. (2005). A study of thermal drying process. *Indian Journal of Chemical Technology*, 12, 654–663.
- Hartulistiyoso, E. (2012). Penghematan Energi Pada Proses Pengeringan dengan Gelombang Mikro. *Seminar Nasional Perteta*.
- Horuz, E. dan Maskan, M. (2015). Hot air and microwave drying of pomegranate (*Punica granatum* L.) arils. *Journal of Food Science Technology*, 52(1), 285–293.
- Hugot, E. dan Jenkins, G. H. (1986). *Handbook of Sugarcane Engineering*. Elsevier.
- Inyang, U. E., Oboh, I., dan Etuk, B. (2018). Kinetics models for drying technique-food material. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 8, 27–48.
- Jindarat, W., Rattanadecho, P., dan Vongpradubchai, S. (2011). Analysis of energy consumption in microwave and convective drying process of multi-layered porous material inside a rectangular wave guide. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35, 728–737.
- Li, C., Liao, J., Yin, Y., Mo, M., Chang L., dan Bao, W. (2018). Kinetic analysis on the microwave drying of different forms of water in Lignite. *Kinetic Analysis on the Microwave Drying of Different Forms of Water in Lignite*, 176, 174–181.
- Maskan, M. (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44, 71–78.
- Metaxas, A. C., dan Meredith, R. J. (1983). *Industrial Microwave Heating*. Peter Peregrinus Ltd.

- Pozar, M. D. (2011). *Microwave Engineering* (4th Edition). John Wiley & Sons, Inc.
- Prasertsan, S. dan Saensaby, P. (1998). Heat pump drying of agricultural materials. *Drying Technology: An International Journal*, 16(1 & 2), 235–250.
- Silva, E. G., Gomez, R. S., Gomes J. P., Silva, W. P., Porto, K. Y. N., Rolim, F. D., Carmo, J. E. F., Andrade, R. O., Santos, I. B., Sousa, R. A. A., Diniz, D. D. S., Aragão, M. M. C. A., dan Lima, A. G. B. (2021). Heat and mass transfer on the microwave drying of rough rice gains: An experimental analysis. *Agriculture*, 11(8), 1–17.
- Togul, I. T. dan Pehlivan, D. (2004). Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air under drying process. *Journal of Food Engineering*, 65, 413–425.
- Verma, L. R., Bucklin, R. A., Endan, J. B., dan Wratten, F. T. (1985). Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the ASAE*, 28, 296–301.
- Wojdylo, A., Liu, C., Qu, W., He, Z., Gao, J., Jia, L., Ji, S., dan Ruan, R. (2014). Effect of Convective and Vacuum–Microwave Drying on the Bioactive Compounds, Color, and Antioxidant Capacity of Sour Cherries. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 829–841.
- Zhao, P., Liu, C., Qu, W., He, Z., Gao, J., Jia, L., Ji, S., dan Ruan, R. (2019). Effect of temperature and microwave power levels on microwave drying kinetics of zhaotong lignite. *Processes*, 7(74).