

# Penentuan Konstanta Pengeringan Dalam Sistem Pengeringan Lapis Tipis (*Thin Layer Drying*)

Istadi <sup>\*) \*\*)</sup>, S. Sumardiono <sup>\*)</sup> dan D. Soetrinanto <sup>\*)</sup>

<sup>\*)</sup> Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Sudharto, Tembalang, Semarang, 50239

<sup>\*\*)</sup> Group for Applied Combustion, Heat Transfer and Fluid Dynamics (GACHEFD)  
E-mail: [istadi@alumni.undip.ac.id](mailto:istadi@alumni.undip.ac.id)

## Abstrak

*Proses pengeringan dipengaruhi oleh kondisi udara pengering, sifat internal bahan dan sistem pengeringan yang diterapkan. Kinetika pengeringan dikendalikan oleh besarnya konstanta pengeringan (K) dalam sistem atau model pengeringan lapis tipis (thin layer drying) yang tergantung pada laju alir udara pengering, difusivitas air di dalam bahan, kondisi udara pengering, struktur mikro pori-pori bahan, serta kadar air dan ketebalan bahan. Koefisien-koefisien dalam model konstanta pengeringan ditentukan dengan melakukan pengkorelasian model empiris pada data-data eksperimen yang dilakukan dalam sistem pengeringan lapis tipis. Dalam makalah ini, model empiris konstanta pengeringan untuk produk kentang merupakan fungsi dari kadar air bahan (X) dan temperatur udara pengering (T) yang akan diuji pada rentang temperatur 40 – 60 °C. dan kadar air 0,001 – 0,45 kg air/kg bahan kering.*

$$K = 0,00458 \exp(-0,2474 X) \exp\left(\frac{-7401,9}{RT}\right)$$

*Pengkorelasian model ini pada data-data eksperimen ini menggunakan algoritma Levenberg-Marquardt untuk menentukan koefisien-koefisiennya. Persamaan kinetika pengeringan termasuk konstanta pengeringan yang diperoleh dapat digunakan dalam model kinetika pengeringan lapis tipis untuk memprediksi dinamika pengeringan secara lebih akurat.*

## Abstract

*Drying process was mainly influenced by the drying air condition, internal properties of solid and the drying system. The drying kinetic was controlled by a drying constant (K) with respect to thin layer drying model dependent on drying air flow-rate, moisture diffusivity, drying air conditions, the structure of solid micro porous, and solid moisture content and thickness. Coefficients of the drying constant were determined by fitting an empirical model on a set of experimental data of the thin layer drying. The empirical drying constants for potato was expressed as function of solid moisture content (X) and drying air temperature (T) investigated in the temperature and the moisture content ranges of 40 – 60 °C, and 0,001 – 0,45 kg water/kg dry solid, respectively as described as follows:*

$$K = 0,00458 \exp(-0,2474 X) \exp\left(\frac{-7401,9}{RT}\right)$$

*The Levenberg-Marquardt algorithm was implemented for the model fitting to determine the model coefficients. The drying kinetic including the drying constant can be used to predict the drying dynamic precisely in the thin layer drying system.*

## 1. Pendahuluan

Pemodelan pengeringan terus berkembang hingga dekade terakhir yang melibatkan proses-proses yang kompleks meliputi perpindahan massa, energi dan momentum. Pemodelan pengeringan dimulai dari sesuatu yang sederhana hingga kompleks yang semuanya dapat diterapkan sesuai dengan kondisi dan situasinya. Optimisasi proses dilakukan untuk mendapatkan kondisi-kondisi proses yang menghasilkan efisiensi pengeringan yang lebih baik sehingga diperlukan informasi parameter-parameter proses tertentu yang diperlukan. Parameter-parameter proses tersebut dapat ditentukan dengan pengkorelasian model empiris terhadap data-data eksperimen yang dilakukan dengan metode-metode tertentu tergantung dari kompleks tidaknya persamaan yang dikorelasikan.

Pemodelan proses pengeringan yang paling sederhana adalah model kinetika pengeringan untuk sistem pengeringan lapis tipis atau lebih dikenal dengan *thin layer drying*. Model pengeringan tipe ini dapat dikategorikan sebagai sistem model parameter *lump* dimana konsentrasi air dan temperatur setebal bahan yang dikeringkan diasumsikan sama dan mempunyai karakteristik yang sama pula (Zogzas & Maroulis, 1996). Karakteristik-karakteristik pengeringan untuk sistem ini dapat dinyatakan dengan konstanta pengeringan. Pemodelan pengeringan yang lain yang lebih kompleks dan akurat adalah model pengeringan difusif dimana konsentrasi air dan temperatur terdistribusi setebal bahan yang dikeringkan. Model pengeringan tipe ini dikategorikan sebagai sistem model parameter terdistribusi.

Pemodelan pengeringan yang lebih kompleks yang meninjau perpindahan massa, panas dan momentum telah dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu baik untuk sistem pengeringan difusif unggun diam (*deep-bed*) (Sitompul *et al.*, 2001; Istadi *et al.*, 2002), unggun terfluidisasi (Istadi *et al.*; 2001), dan permasalahan-permasalahan pemodelan dalam pengeringan yang lebih kompleks (Oliveira *et al.*, 1995; Turner *et al.*, 1997). Teknik-teknik pemodelan perpindahan massa dan panas khususnya dalam pengeringan serta penentuan parameter-parameter model telah disajikan oleh Kiranoudis *et al.* (1993; 1995). Parameter-parameter model yang dapat ditentukan adalah difusifitas moisture efektif, konduktifitas panas efektif, dan konstanta pengeringan. Parameter-parameter model ini dapat berupa persamaan empiris ataupun konstanta yang dapat ditentukan melalui optimasi proses ataupun penentuan secara khusus sehingga diperoleh nilai-nilainya.

Dalam penelitian ini, disajikan penentuan konstanta pengeringan berdasarkan pada model pengeringan lapis tipis yang berupa persamaan empiris dengan tiga parameter yang akan ditentukan. Penentuan parameter-parameter ini dilakukan dengan pengkorelasi (*curve fitting*) terhadap data-data eksperimen dengan memanfaatkan teknik-teknik optimasi proses.

## 2. Model Kinetika Pengeringan dan Penentuan Konstanta Pengeringan

Pengeringan merupakan proses yang kompleks meliputi perpindahan massa, panas dan momentum yang terjadi secara simultan. Mekanisme perpindahan moisture di dalam pori-pori padatan meliputi difusi molekular, aliran kapiler, difusi cairan melalui pori-pori padatan, difusi uap di dalam pori, aliran Knudsen, dan aliran hidrodinamik. Namun demikian tidak semua mekanisme perpindahan tersebut dapat terlibat di dalam model pengeringan karena kompleksnya persamaan yang akan diselesaikan. Kebanyakan mekanisme difusi saja yang dilibatkan dalam pemodelan pengeringan.

Proses pengeringan dapat dibagi menjadi periode laju konstan (*constant rate*) dan periode laju menurun (*falling rate*). Namun demikian, kebanyakan periode laju konstan hanya terjadi singkat saja untuk bahan-bahan tertentu, sedangkan paling banyak terdiri dari proses pengeringan dengan laju menurun, yang sangat tergantung pada sifat-sifat alami bahan yang dikeringkan. Pada periode menurun ini laju perpindahan massa dikendalikan oleh perpindahan internal bahan, sedangkan tahanan perpindahan massa eksternal dapat diabaikan. Disamping itu, laju pengeringan juga dikendalikan oleh perubahan volume bahan, bentuk dan tekstur bahan, serta perubahan komposisi kimia di dalam bahan.

Model pengeringan yang paling sederhana adalah model pengeringan lapis tipis yang pertama kali dikenalkan oleh Lewis (1921) (Zogzas & Maroulis, 1996; Marinos-Kouris *et al.*, 1995).

$$\frac{dX}{dt} = -K(X - X_e) \quad (1)$$

dengan K menyatakan konstanta empiris yang dinamakan dengan konstanta pengeringan (*drying constant*). Nilai kandungan air kesetimbangan ( $X_e$ ) tergantung pada kondisi udara pengering ( $a_w$ ) yang dinyatakan dalam korelasi kandungan air setimbang (EMC). Persamaan ini dapat diselesaikan dengan integrasi analitik hingga diperoleh persamaan:

$$\frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \exp(-Kt) \quad (2)$$

Persamaan ini lebih akurat jika bahan yang dikeringkan dianggap cukup tipis, atau kecepatan aliran udara cukup tinggi sehingga kondisi udara pengering konstan selama melewati bahan. Persamaan kinetika pengeringan lapis tipis paling cocok digunakan untuk sistem pengeringan bahan makanan dengan konstanta pengeringan (K) tergantung pada kadar air bahan dan kondisi udara pengering (Keech *et al.*, 1995; Wongwises *et al.*, 2000). Konstanta pengeringan ini tergantung pada kombinasi dari beberapa sifat-sifat perpindahan selama proses pengeringan seperti difusifitas air, konduktifitas termal, serta koefisien perpindahan massa dan panas. Kiranoudis *et al.* (1993) menyatakan bahwa harga konstanta pengeringan dalam persamaan kinetika pengeringan merupakan fungsi dari temperatur, laju alir, kelembaban dan kecepatan udara pengering, kadar air, ketebalan, dan

konduktifitas panas bahan yang akan dikeringkan, serta koefisien perpindahan massa dan panas (Marinos-Kouris *et al.*, 1995).

Konstanta pengeringan dalam sistem pengeringan lapis tipis merupakan fungsi dari beberapa sifat-sifat perpindahan berupa persamaan empiris yang dinyatakan dalam beberapa parameter. Pada dasarnya, model konstanta pengeringan atau difusifitas moisture efektif disusun berdasarkan pada hubungan Arrhenius. Macam-macam persamaan empiris model konstanta pengeringan yang telah diusulkan oleh beberapa peneliti terdahulu disajikan pada Tabel 1 (Marinos-Kouris *et al.*, 1995).

Tabel 1. Model-model empirik konstanta pengeringan (K) untuk beberapa bahan makanan

No.	Nama Bahan	Persamaan Empirik
1	Biji-bijian dan jewawut	$K(T) = b_0 \exp(-b_1/T)$
2	Gandum, Jewawut	$K(T) = b_0 \exp(-b_1/(b_2+b_3T))$
3	Melon	$K(a_w, T) = b_0 \exp((-b_1+b_2a_w)/T)$
4	Padi	$K(a_w, T) = b_0 + b_1 T - b_2 a_w$
5	Kentang, bawang, wortel, lada	$K(a_w, T, d, u) = b_0 a_w^{b_1} * T^{b_2} * d^{b_3} * u^{b_4}$

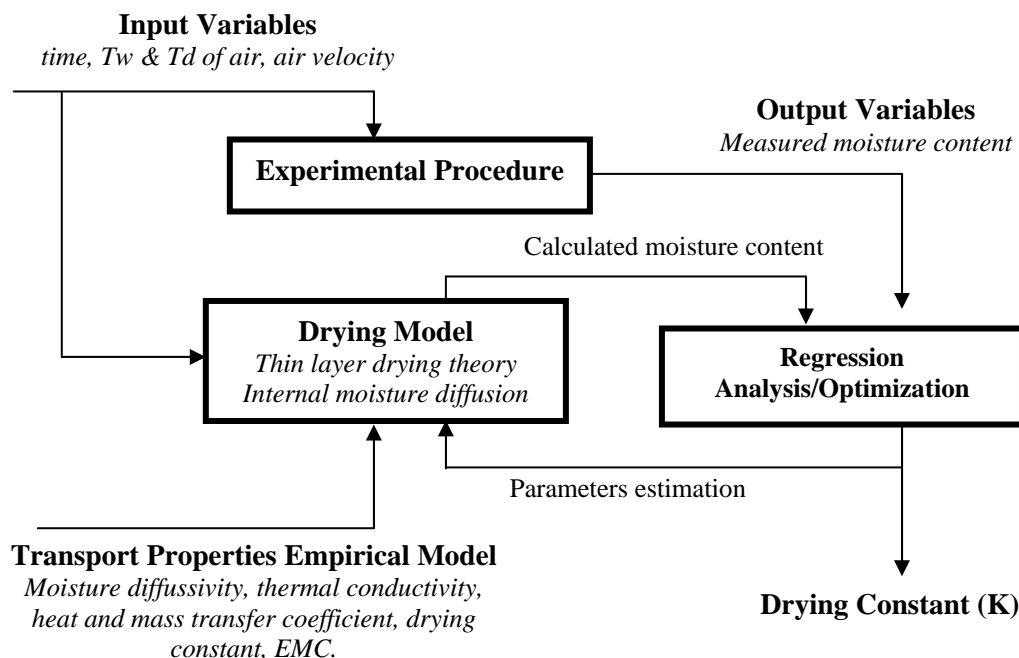
Model yang diusulkan dalam penelitian ini dikhususkan untuk produk pertanian kentang (*potato*) dan disusun berdasarkan hubungan Arrhenius, yaitu:

$$K(T, X) = b_0 \exp(b_1 X) \exp\left(\frac{b_2}{RT}\right) \tag{3}$$

Parameter-parameter empiris dalam model ini ( $b_0$ ,  $b_1$ , dan  $b_2$ ) dievaluasi dengan analisa regresi nonlinier dengan algoritma Levenberg-Marquardt dengan memanfaatkan tool yang telah tersedia di MATLAB. Analisa regresi nonlinier dilakukan dengan meminimasi fungsi objektif yang berupa jumlah kuadrat dari kesalahan absolut untuk tiap-tiap data ke-i yang disajikan pada Persamaan (4).

$$FO = \min \sum_{i=1}^n (X_{\text{perhitungan}} - X_{\text{eksperimen}})^2 \tag{4}$$

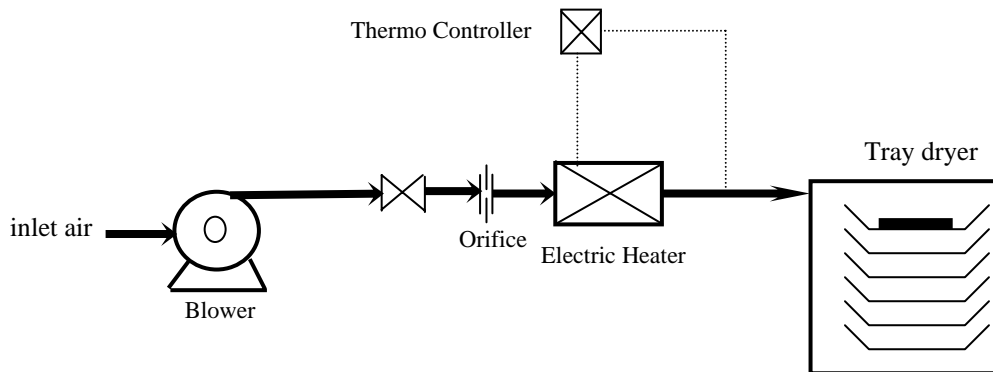
Infomasi diagram alir untuk analisis ini disajikan pada Gambar 1 untuk model kinetika pengeringan lapis tipis.



Gambar 1. Analisis dan metode penentuan model empirik konstanta pengeringan dalam sistem pengeringan lapis tipis

### 3. Bahan dan Metode

Dalam penelitian ini bahan yang dikeringkan atau ditentukan konstanta pengeringannya adalah produk pertanian kentang (*potato*). Kentang diiris tipis setebal 5 mm dan ditentukan dulu berat awalnya. Udara dialirkan dengan kecepatan tertentu kemudian pemanas listrik dihidupkan. Setelah diperoleh aliran udara panas dengan temperatur yang diinginkan (40, 50, dan 60 °C) tercapai, kemudian bahan diletakkan di atas rak pengering. Setiap waktu tertentu diukur dan dicatat penurunan berat bahan tersebut. Hal ini dilakukan terus menerus hingga mencapai berat bahan konstan. Setelah proses pengeringan selesai, maka perlu diukur berat kering dari masing-masing bahan yang dikeringkan.



Gambar 2. Skema percobaan pengeringan untuk penentuan konstanta pengeringan

Konfigurasi sistem pengeringan dalam percobaan ini disajikan pada Gambar 2. Udara dialirkan menuju pemanas elektrik oleh sebuah blower. Sebelum udara dipanaskan dilewatkan terlebih dahulu melalui sebuah orifice untuk menentukan laju alir udara pengering. Temperatur udara pengering diatur pada suhu tertentu sesuai variabel proses, yang dikendalikan oleh pengendali temperatur. Pengukuran temperatur udara pengering dilakukan sebelum udara masuk ke dalam pengering.

### 4. Hasil dan Pembahasan

Besarnya laju pengeringan untuk sistem pengeringan lapis tipis tergantung pada beberapa parameter model yang menyatakan sifat-sifat perpindahan dan termodinamika dalam proses pengeringan, meliputi: difusifitas massa dan panas efektif, konduktifitas termal efektif, koefisien perpindahan massa dan panas, kandungan air setimbang, yang dapat dinyatakan secara global dalam bentuk konstanta pengeringan (K) (Zogzas *et al.*, 1996; Marinos-Kouris *et al.*, 1995).

Penentuan parameter-parameter model dilakukan dengan mengkorelasikan model kinetika pengeringan lapis tipis beserta model empiris konstanta pengeringan (K) pada data-data eksperimen yang dilakukan dengan memanfaatkan algoritma Levenberg-Marquardt sehingga diperoleh persamaan empiris Konstanta Pengeringan (K) untuk pengeringan kentang (*potato*) dengan rentang temperatur udara antara 40-60 °C dan kadar air bahan 0,001 – 4,5 kg air/kg bahan kering adalah:

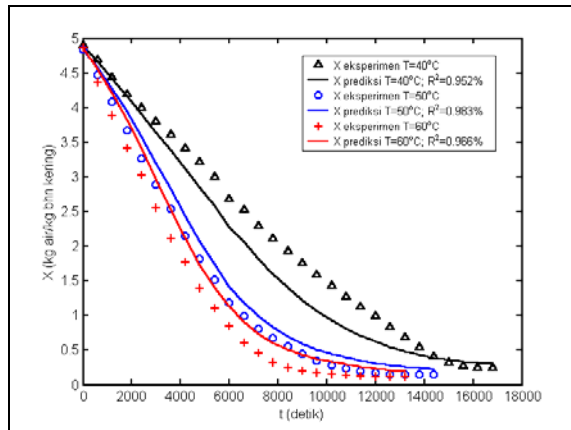
$$K = 0,00458 \exp(-0,2474 X) \exp\left(\frac{-7401,9}{RT}\right) \quad (5)$$

Dengan sistem pengkorelasian cara ini diperoleh koefisien korelasi ( $R^2$ ) untuk persamaan ini adalah antara 0,95 – 0,98 dengan kesalahan relatif rata-rata antara 20 – 30 %. Keberhasilan metode optimasi ini juga sangat tergantung oleh tingkat ketidak linieran dari persamaan model yang diselesaikan disamping nilai tebakan awalnya.

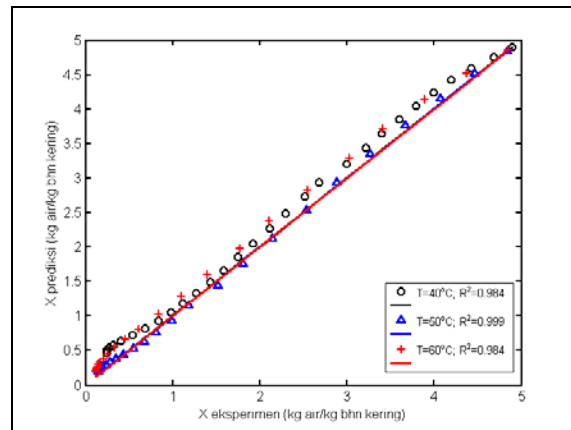
Perbandingan antara kadar air hasil prediksi dan eksperimen pada pengeringan kentang untuk temperatur udara 40, 50 dan 60 °C disajikan pada Gambar 3. Dari gambar ini dapat dilihat bahwa semakin tinggi temperatur maka proses pengeringan akan semakin cepat dan kandungan air setimbang (EMC) makin kecil. Tingginya temperatur udara menyebabkan kelembaban relatif udara makin kecil sehingga meningkatkan besarnya gaya pendorong antara permukaan bahan dengan udara. Semakin tinggi beda temperatur antara udara dengan permukaan bahan akan meningkatkan gaya dorong panas antara udara dan permukaan bahan yang mengakibatkan peningkatan penguapan moisture di dalam bahan. Proses pengeringan dalam bahan padatan kentang ini sebenarnya berjalan secara bertahap dimulai dari permukaan bahan baru kemudian menuju internal

bahan hingga yang terakhir mengering adalah bagian tengah bahan. Namun demikian, karena bahan yang dikeringkan cukup tipis sehingga dapat dianggap bahwa distribusi konsentrasi setebal bahan dapat diabaikan dan dianggap mempunyai kadar air yang merata.

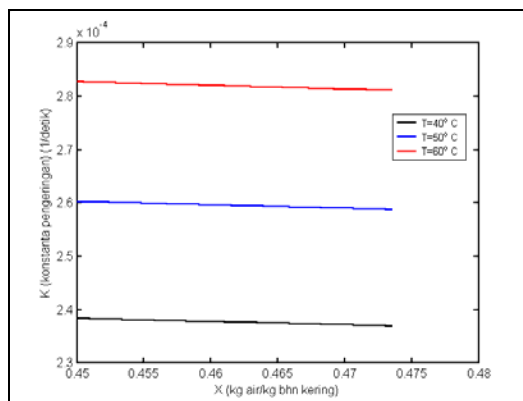
Perbandingan antara kadar air hasil prediksi dengan hasil eksperimen untuk temperatur 40, 50 dan 60 °C dapat disajikan pada Gambar 4. Dari gambar ini dapat dilihat bahwa terdapat kesesuaian yang cukup baik antara X hasil eksperimen dengan X hasil prediksi yang ditunjukkan oleh nilai koefisien korelasi ( $R^2$ ) dan rendahnya kesalahan relatifnya. Koefisien korelasi yang masih relatif rendah (0,95 - 0,98) dan kesalahan relatif rata-rata 20 – 30 % menunjukkan bahwa proses pengkorelasi cukup sulit dilakukan karena model yang non linier dan terdapat tiga variabel yang ditentukan. Penentuan nilai tebakan awal sangat mempengaruhi keberhasilan dari proses pengkorelasi tersebut.



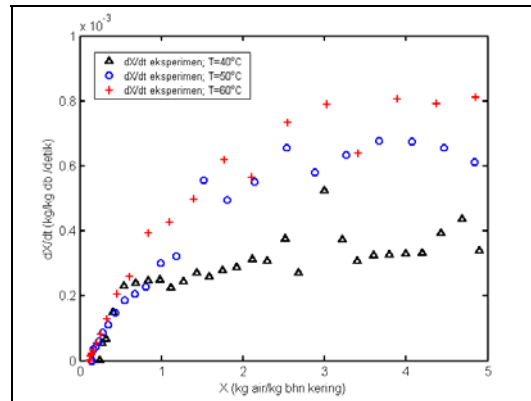
Gambar 3. Dinamika penurunan kadar air (prediksi dan eksperimen) untuk temperatur 40, 50 dan 60 °C



Gambar 4. Perbandingan antara kadar air prediksi dengan hasil eksperimen untuk temperatur 40, 50 dan 60 °C



Gambar 5. Simulasi konstanta pengeringan (K) untuk temperatur 40, 50 dan 60 °C sesuai dengan model yang diusulkan



Gambar 6. Laju pengeringan (dX/dt) hasil eksperimen untuk temperatur 40, 50 dan 60 °C.

Simulasi konstanta pengeringan (K) berdasarkan persamaan empiris yang sudah diperoleh disajikan pada Gambar 5 terhadap temperatur udara pengering dan kadar air bahan. Berdasarkan atas model yang disusun pada Persamaan (5) dapat diperlihatkan bahwa semakin tinggi temperatur maka konstanta pengeringan makin besar. Semakin tinggi temperatur udara dan kadar air bahan menyebabkan gaya dorong antara kandungan air di dalam bahan dan di udara makin besar sehingga akan cenderung mendorong keluarnya air dari dalam bahan sehingga difusifitas air makin besar, selanjutnya dapat meningkatkan besarnya konstanta pengeringan.

Perkiraan laju pengeringan (dX/dt) dari data-data eksperimen disajikan pada Gambar 6. Laju pengeringan disajikan untuk temperatur pengeringan 40, 50 dan 60 °C. Dari hasil ini dapat dilihat bahwa makin tinggi temperatur udara pengering maka laju pengeringan semakin besar. Makin tinggi temperatur udara pengering

maka kelembaban udara pengering makin rendah sehingga gaya dorong kandungan air antara bahan dengan udara makin besar. Disamping itu, makin tinggi temperatur udara pengering akan makin banyak pula panas yang dipindahkan dari udara ke permukaan bahan yang selanjutnya dapat menguapkan moisture di dalam bahan.

### 5. Kesimpulan

Konstanta pengeringan dalam sistem pengeringan lapis tipis tergantung pada beberapa sifat-sifat perpindahan termasuk temperatur udara pengering dan kadar air bahan. Dalam penelitian ini, model matematik konstanta pengeringan disusun berdasarkan fungsi dari temperatur udara pengering dan kadar air bahan yang diturunkan dari hubungan Arrhenius. Koefisien-koefisien dalam model empiris konstanta pengeringan ditentukan dengan mengkorelasikan model kinetika pengeringan lapis tipis terhadap data-data eksperimen yang dilakukan, sehingga diperoleh persamaan konstanta pengeringan yang berlaku untuk pengeringan produk kentang dengan rentang temperatur pengeringan 40-60 °C dan kadar air 0,001 – 4,5 kg air/kg bahan kering. Model empiris konstanta pengeringan hasil pencocokan kurva adalah:

$$K = 0,00458 \exp(-0,2474 X) \exp\left(\frac{-7401,9}{RT}\right)$$

dengan koefisien korelasi ( $R^2$ ) antara 0,95 - 0,98 dan kesalahan relatif rata-rata 20 – 30 %. Besarnya prosen kesalahan relatif rata-rata memungkinkan untuk penyusunan model yang lebih sesuai dengan karakteristik pengeringannya.

Model empiris konstanta pengeringan ini perlu di kembangkan lebih lanjut dalam hubungannya dengan laju udara pengering dan sifat-sifat dasar dari bahan serta untuk produk-produk pertanian yang lain. Metode penentuan ini dapat juga dikembangkan lebih lanjut untuk menentukan model sifat-sifat perpindahan yang lain seperti difusifitas mixture efektif, koefisien perpindahan massa dan panas efektif serta konduktifitas termal efektif.

### Ucapan Terima Kasih

Terima kasih disampaikan kepada Sdr. Dhani Soesilo W., E.H. Raharjo, Oni Fariza dan Nursy Savira, atas bantuannya dalam percobaan pengeringan di laboratorium.

### Daftar Notasi

$a_w$	aktifitas air udara pengering	[kg air/kg udara kering]
$b_0, b_1, b_2$	koefisien-koefisien konstanta pengeringan	[-]
K	konstanta pengeringan	[1/detik]
R	konstanta gas umum	[J/mol.K]
T	temperatur absolut udara	[K]
t	waktu	[detik]
X	kadar air bahan (basis kering)	[kg air/kg bahan kering]
$X_e$	kadar air kesetimbangan (EMC)	[kg air/kg bahan kering]
$X_0$	kadar air awal	[kg air/kg bahan kering]

### Daftar Pustaka

1. Istadi and J.P. Sitompul, (2002), "A Comprehensive Mathematical and Numerical Modelling of Deep Bed Grain Drying", *Drying Technology*, 20 (5), *In press by Marcel Dekker, Inc.*
2. Istadi, Y. Bindar and J.P. Sitompul, (2001), "Mathematical Modelling of Transport Dynamic in Fluidized-Bed Drying", *Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses 2001*, Teknik Kimia UNDIP, Semarang, hal. A11.1-A11.8
3. Keech, A.M., R.B. Keey, Q.J. Zhang, T.A.G. Langrish, I.C. Kemp and H.S. Pasley, (1995), "An Experimental Test of The Concept of The Characteristic Drying Curve Using The Thin-Layer Method", *Drying Technology*, 13 (5-7), hal. 1133-1152.
4. Kiranoudis, C.T., Z.B. Maroulis, and D. Marinos-Kouris, (1993), "Mass Transfer Model Building in Drying", *Drying Technology*, 11 (6), hal. 1251-1270
5. Kiranoudis, C.T., Z.B. Maroulis, and D. Marinos-Kouris, (1995), "Heat and Mass Transfer Model Building in Drying with Multiresponse Data", *Int. J. of Heat Mass Transfer*, 38 (3), hal. 463-480.

6. Marinos-Kouris, D., and Z.B. Maroulis, (1995), "*Transport Properties in The Drying of Solids*", in Handbook of Industrial Drying, Vol. 1, A.S. Mujumdar (Editor), Marcel Dekker, Inc., New York, hal. 113 – 159.
7. Oliveira, L.S., A.S. Franca and K. Haghghi, (1995), "An Adaptive Approach to Finite Element Modelling of Drying Problems", *Drying Technology*, 13 (5-7), hal. 1167-1185.
8. Sitompul, J.P., Istadi and I.N. Widiassa, (2001), "Modelling and Simulation of Deep-Bed Grain Drying", *Drying Technology*, 19 (2), hal. 269 – 280.
9. Turner, I. and A.S. Mujumdar (Editor), (1997), "*Mathematical Modeling and Numerical Techniques in Drying Technology*", Marcel Dekker, Inc., New York.
10. Wongwises, S., and M. Thongprasert, (2000), "Thin Layer and Deep Bed Drying of Long Grain Rough Rice", *Drying Technology*, 18 (7), hal. 1583-1599
11. Zogzas, N.P. and Z.B. Maroulis, (1996), "Effective Moisture Diffusivity Estimation from Drying Data. A Comparison Between Various Methods of Analysis", *Drying Technology*, 14 (7&8), hal. 1543 – 1573.