

## MODEL MATEMATIK PENGERINGAN LAPIS TIPIS WORTEL

Puguh Setyoprato

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik - Universitas Surabaya  
Jalan Raya Kalirungkut, Surabaya 60292, Telp. (031)2981158, Fax. (031)2981178  
e-mail : puguh\_sptm@yahoo.com

### ABSTRAK

*Pengeringan merupakan salah satu metode yang sangat penting dalam pengawetan bahan pangan. Studi ini dimaksudkan untuk menginvestigasi model matematik pengeringan lapis tipis wortel. Kinetika pengeringan lapis tipis wortel diinvestigasi melalui percobaan pengeringan dengan udara panas secara konveksi. Model solusi Crank untuk difusi dalam bahan berbentuk slab dalam pengeringan lapis tipis digunakan untuk memprediksi profil pengeringan. Karakteristik pengeringan wortel ditentukan dengan menggunakan udara pada suhu 50 °C, 60 °C, 70 °C dan 80 °C pada kecepatan 0.4167 m/s. Hasil studi menunjukkan bahwa sebelum terjadinya deformasi bahan model solusi Crank cukup sesuai untuk waktu pengeringan yang cukup lama.*

**Kata kunci:** model matematik, pengeringan, wortel

### ABSTRACT

*Drying is one of the most significant method in food preservation. This study was conducted to investigate mathematical models of thin layer drying of carrot slices. The kinetic of thin layer drying of carrot slices was experimentally investigated in a hot air convective dryer. Crank solution for diffusion in slab model for drying in thin layer were used to predict the drying profile. Drying characteristic of carrot slices were determined using air at 50 °C, 60 °C, 70 °C and 80 °C at air linear velocity 0.4167 m/s. The result showed that before material deformation was taken place the Crank solution model was suitable for long- periode drying.*

**Key words:** carrot, drying, mathematical model

### PENDAHULUAN

Wortel merupakan satu diantara jenis sayuran yang mempunyai nilai ekonomi tinggi. Akhir-akhir ini mulai berkembang perdagangan wortel dalam bentuk potongan tipis wortel kering. Produk potongan tipis wortel kering mempunyai keunggulan bisa disimpan dalam waktu yang cukup lama tanpa mengalami kerusakan pada kandungan mineral dan komponen-komponen nutrisi penting lainnya. Lapis tipis wortel kering diperoleh dengan jalan mengeringkan wortel segar sampai kadar air tertentu dimana wortel akan tahan lama dalam penyimpanan. Ada beberapa pilihan proses pengeringan yang dapat dilakukan, diantaranya *freeze drying*, *vacuum drying*, *microwave drying* dan *convective air drying*. Masing-masing proses mempunyai keunggulan dan kelemahan dari aspek teknis dan ekonomis.

Pengeringan adalah proses yang kompleks di mana di dalamnya terjadi fenomena perpindahan massa dan panas yang berlangsung secara simultan. Pengeringan banyak digunakan dalam industri pengolahan pangan, sering menjadi proses utama dan

merupakan yang paling mahal dari serangkaian tahap pengolahan pasca panen. Proses pengeringan akan memperbaiki daya tahan (*shelf life*) produk tanpa penambahan bahan kimia pengawet dan mengurangi volume produk maupun biaya transportasi. Sayuran segar mempunyai kadar air yang tinggi, sehingga mengakomodasi tingginya aktivitas metabolik. Aktivitas metabolik ini berlangsung terus pada masa pasca panen sehingga sayuran cepat membusuk.

Pemodelan matematik proses pengeringan pada berbagai kondisi operasi sangat penting untuk mendapatkan profil yang dapat digunakan untuk kepentingan pengendalian selama proses pengeringan skala komersial dan meningkatkan perbaikan menyeluruh terhadap kualitas produk akhir. Beberapa model sering digunakan untuk mempelajari pengaruh variabel-variabel yang digunakan dalam proses, memprediksi kinetika pengeringan produk dan mengoptimalkan parameter-parameter dan kondisi operasi.

Dalam proses pengeringan bahan dikenal dua periode laju pengeringan, yaitu pengeringan periode

laju konstan dan periode laju menurun. Pengerinan periode laju konstan berlangsung sampai mencapai kadar air tertentu yang disebut dengan kadar air kritik. Pengerinan bahan yang dilakukan dibawah kadar air kritik merupakan pengerinan periode laju menurun. Kadar air terendah yang dapat dicapai untuk setiap proses pengerinan disebut kadar air kesetimbangan. Besarnya kadar air kesetimbangan bahan ditentukan oleh jenis bahan, suhu dan humiditas medium pengering. Proses pengerinan bahan pangan umumnya berlangsung pada periode laju pengerinan menurun. Persamaan model pengerinan lapis tipis digunakan untuk mengestimasi waktu pengerinan beberapa produk dan memprediksi profil kurva pengerinan. Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan profil pengerinan, kinetika pengerinan dan menguji kesesuaian model matematik yang dikembangkan untuk pengerinan lapis tipis.

**METODE PENELITIAN**

**Bahan**

Wortel segar diperoleh dari pasar lokal. Setelah dilakukan pengupasan kulitnya terlebih dahulu, wortel kemudian dipotong-potong sehingga dihasilkan potongan yang berupa lapis tipis dengan tebal 5mm.

**Model Matematik**

Proses pengerinan, umumnya berlangsung melalui empat mekanisme transfer (Mounir & Allaf, 2009), yaitu: 1) perpindahan panas dari sumber panas (*outside*) ke permukaan bahan, dimana energi dipindahkan dengan kontak, konveksi atau radiasi; 2) perpindahan panas dalam bahan, energi dipindahkan secara konduksi; 3) perpindahan air dalam bahan, berlangsung baik dalam bentuk cairan (dengan berbagai mekanisme mencakup kapilaritas dan difusi molekuler, dimana gaya penggerakannya berupa gradien kadar air) dan/atau berupa gas (gaya penggerakannya gradien tekanan parsial uap air); 4) perpindahan uap air dari permukaan bahan ke bulk (*outside*).

Bahan-bahan yang berasal dari produk pertanian dan perkebunan, perpindahan panas ke permukaan bahan pada saat kandungan air dalam bahan tinggi menghasilkan pengerinan periode konstan. Peristiwa ini terjadi dalam waktu yang sangat singkat, sehingga praktis keseluruhan proses pengerinan berlangsung dengan laju menurun.

Pengerinan secara konveksi dengan udara panas dengan laju alir dan suhu udara yang mencukupi dapat diasumsikan perpindahan panas dan

massa yang terjadi di luar bahan (*eksternal*) tidak mempengaruhi perpindahan massa secara keseluruhan, sehingga hanya perpindahan panas dan massa yang terjadi dalam bahan (*internal*) yang dianggap mengendalikan keseluruhan proses (Mounir, 2007).

Mounir & Allaf (Mounir & Allaf, 2008) mengasumsikan bahwa ketika perpindahan massa jauh lebih lambat dari perpindahan panas konduksi dalam bahan, maka kinetika pengerinan dikendalikan oleh perpindahan massa secara umum terjadi pada pengerinan bahan-bahan biopolimer.

Pemodelan yang dilakukan dengan menganalisis proses difusi uap air pada bahan yang terjadi pada pengerinan periode laju menurun menghasilkan persamaan diferensial (Arevalo-Pinedo, 2006) seperti yang diformulasikan di persamaan (1),

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef} \nabla W) \tag{1}$$

dimana W adalah konsentrasi uap air (kg/m<sup>3</sup>), t adalah waktu (s) dan D<sub>ef</sub> adalah difusivitas efektif uap air (m<sup>2</sup>/s).

Untuk proses pengerinan, konsentrasi bisa digantikan dengan kandungan air persatuan massa kering bahan. Dengan mengabaikan terjadinya pengerutan (*shrinkage*) persamaan (1) dapat dinyatakan sebagai :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} (\nabla^2 X) \tag{2}$$

Dengan kondisi batas :

$$\begin{aligned} t = 0, X &= X_0 \\ t > 0; z = 0; \partial X / \partial z &= 0 \\ t > 0; z = L; X &= X_e \end{aligned}$$

dimana :

L adalah jarak difusi (m), X adalah kandungan air bahan (kg air/kg bahan kering), X<sub>e</sub> adalah kandungan air kesetimbangan (kg air/kg bahan kering) dan X<sub>0</sub> adalah kandungan air bahan awal (kg air/kg bahan kering).

Bahan berbentuk slab (lapis tipis) penguapan melalui permukaan dari sisi-sisi bahan dapat diabaikan. Karena relatif kecil dibandingkan dengan luas permukaan bahan yang paralel terhadap aliran udara panas, sehingga difusi air di dalam slab dianggap satu arah dan akan berlaku :

$$\left( \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \right) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left( - \frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4L^2} \right) \tag{3}$$

Untuk waktu pengerinan yang panjang, persamaan (3) dapat disederhanakan dengan

hanya mengambil suku pertama (Pakowski & Mujumdar, 2006) yang dikenal sebagai Solusi Crank, dalam bentuk logaritmik dituliskan seba-

gai berikut:

$$\ln\left(\frac{X - X_e}{X_o - X_e}\right) = \ln\frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{ef} t}{4L^2} \quad (4)$$

Difusivitas ditentukan dengan cara membuat plot data pengeringan yang diperoleh dari percobaan dalam bentuk  $\ln [(X-X_e)/(X_o-X_e)]$  terhadap

waktu  $t$  dalam persamaan (4). Plot tersebut akan berupa garis lurus dengan slope:

$$Slope = \frac{\pi^2 D_{ef}}{4L^2} \quad (5)$$

### Prosedur dan Variabel Percobaan

Lapis tipis wortel disusun di atas satu *tray* yang terbuat dari bahan *stainless steell* dengan luas 150 mm x 150 mm. Lapis tipis wortel disusun sedemikian rupa sehingga sebagian besar permukaan *tray* terisi. *Tray* yang telah terisi kemudian dimasukkan di dalam pengering konveksi dengan medium pengering udara panas dan proses pengeringan dijalankan. Penguapan air dari bahan ke udara pengering praktis dianggap hanya terjadi dari permukaan atas bahan. Alat pengering konveksi yang digunakan pada prinsipnya terdiri dari fan sentrifugal untuk mensuplai aliran udara, pemanas listrik, dan alat pengendali suhu udara panas (*controller*). Sebelum dilewatkan permukaan bahan, udara dipanaskan dengan pemanas listrik dan suhu udara dipertahankan konstan dengan menggunakan alat pengendali suhu. Selama percobaan pengeringan laju udara diukur dengan Anemometer. Pengeringan dilakukan pada suhu udara pengering 50°C, 60°C, 70°C dan 80°C, dengan laju 0.4167 m/s. Perubahan kandungan air bahan dari waktu ke waktu diukur dengan menimbang berat bahan selama pengeringan.

Dari data kandungan air dari waktu ke waktu, difusivitas efektif ditentukan dengan membuat plot  $\ln [(X - X_e)/(X_o - X_e)]$  terhadap  $t$ . Difusivitas efektif dihitung dari harga slope plot ini dengan menggunakan persamaan (5). Dari harga difusivitas efektif yang didapat, selanjutnya model solusi Crank yang disederhanakan (persamaan 4) digunakan untuk menghitung perubahan kandungan air terhadap waktu yang dinyatakan sebagai  $[(X - X_e)/(X_o - X_e)]$ .

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Perubahan kadar air bahan selama proses pengeringan, disajikan sebagai perubahan  $[(X - X_e)/(X_o - X_e)]$  terhadap waktu, ditunjukkan pada Gambar 1. Dari kurva tersebut terlihat bahwa untuk

mencapai kadar air tertentu pengeringan dengan suhu yang lebih tinggi memerlukan waktu yang lebih singkat. Jadi jelas terlihat bahwa suhu udara pengering sangat berpengaruh terhadap kinetika proses pengeringan.

Difusivitas efektif ( $D_{ef}$ ) diperoleh dengan melakukan regresi linier mengikuti persamaan (4) dan hasil regresi juga ditunjukkan pada Gambar 2. Menjelang akhir waktu pengeringan terjadi deviasi kurva terhadap garis regresi linier. Hal ini dikarenakan terjadinya deformasi bahan pada menjelang akhir masa pengeringan sehingga. Bentuk bahan yang berupa slab datar tidak lagi bisa dipertahankan dan penguapan air tidak hanya terjadi dari permukaan atas bahan tetapi juga terjadi dari sebagian permukaan bawah bahan. Harga  $D_{ef}$  dihitung mengikuti persamaan (5) dan hasilnya disajikan pada Tabel 1.

Pengaruh suhu terhadap difusivitas digambarkan dengan menggunakan korelasi Arrhenius (persamaan 6) untuk mengetahui kesesuaian antara harga prediksi dan data percobaan.

$$D_{ef} = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (6)$$

Dimana  $D_o$  : faktor pre-eksponensial ( $m^2/s$ );  $E_a$  : energi aktivasi ( $kJ/mol$ );  $T$ : suhu udara ( $K$ );  $R$ : konstanta gas ( $kJ/(mol K)$ )

Harga  $D_{ef}$  pada berbagai suhu yang diperoleh dari percobaan disajikan pada Gambar 3. Plot tersebut menunjukkan korelasi linier yang berarti pengeringan lapis tipis wortel mengikuti korelasi Arrhenius. Dari slope garis linier korelasi Arrhenius tersebut didapatkan harga  $E_a$  sebesar 20,77 ( $kJ/mol$ ).

Deviasi harga  $[(X - X_e)/(X_o - X_e)]$  yang dihitung dari model solusi Crank (persamaan 4) terhadap data percobaan disajikan pada Gambar 4 dan Gambar 5. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa intersep yang dihasilkan dari model solusi Crank akan selalu bernilai  $\ln(8/\pi^2)$ , sehingga pasti akan terjadi deviasi

model ini di awal periode pengeringan, sedangkan untuk waktu pengeringan yang cukup lama, yaitu untuk harga  $[(X-X_e)/(X_o-X_e)]$  antara 0,2 – 0,1 model solusi Crank cukup sesuai dengan data percobaan. Untuk  $[(X-X_e)/(X_o-X_e)] < 0,1$  deviasinya menjadi lebih besar lagi karena terjadinya deformasi potongan bahan, dan asumsi penguapan hanya terjadi dari permukaan atas saja tidak sesuai lagi.

**SIMPULAN**

Laju pengeringan lapis tipis wortel secara keseluruhan berada pada periode laju menurun. Hal ini sesuai dengan karakteristik pengeringan bahan-bahan biopolimer yang umumnya berlangsung dengan laju menurun. Untuk waktu pengeringan yang cukup lama, yaitu untuk harga  $[(X - X_e)/(X_o - X_e)]$  antara 0,1 – 0,2 model solusi Crank cukup sesuai dengan data percobaan, sedangkan untuk  $[(X - X_e)/(X_o - X_e)] < 0,1$  terjadi deviasi antara model solusi Crank dengan data percobaan. Pengaruh suhu terhadap difusivitas ( $D_{ef}$ ) uap air dalam lapis tipis wortel mengikuti korelasi Arrhenius dengan nilai energi aktivasi harga  $E_a$  sebesar 20,77 (kJ/mol).

**DAFTAR PUSTAKA**

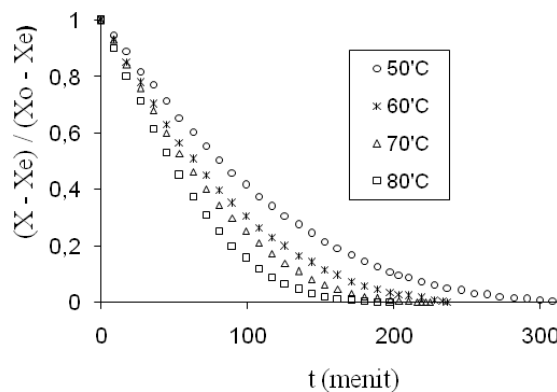
Are'valo-Pinedo, A. et al. 2006. Influence Of Pre-Treatments On The Drying Kinetics During Vacuum Drying Of Carrot And Pumpkin. *Journal of Food Engineering* 80<sup>th</sup> ed. p : 152–156

S. Mounir. 2007. Etude De Nouveaux Procédés De Fabrication De Poudres Par Insertion De La Technologie De Détentes Instantanée Contrôlée Dic, Dans Les Processus D'atomisation, De Séchage/ Texturation Et De Pulvérisation Contrôlée Sous Vide De Produits Laitiers. *PhD (Thèse de doctorat)*. University of La Rochelle.

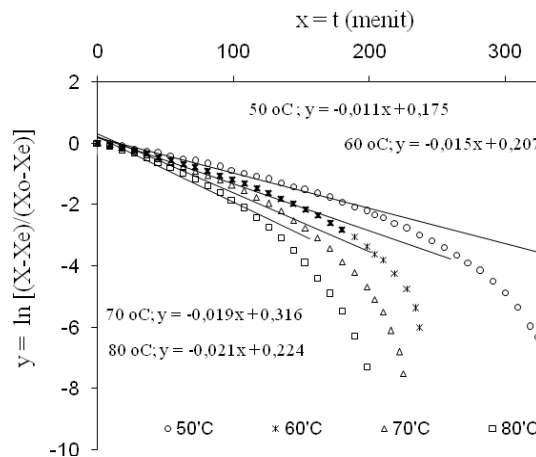
S. Mounir & K. Allaf. 2008. Three-Stage Spray Drying: New Process Involving Instant Controlled Pressure Drop (DIC). *Journal of Drying Technology*, Vol. 26, No. 4. pp. 452-463.

S. Mounir & K. Allaf. 2009. Study And Modeling Of Dehydration And Rehydration Kinetics Within Porous Medium. *Proceedings of AFSIA*, Lyon (France), 14-15 May.

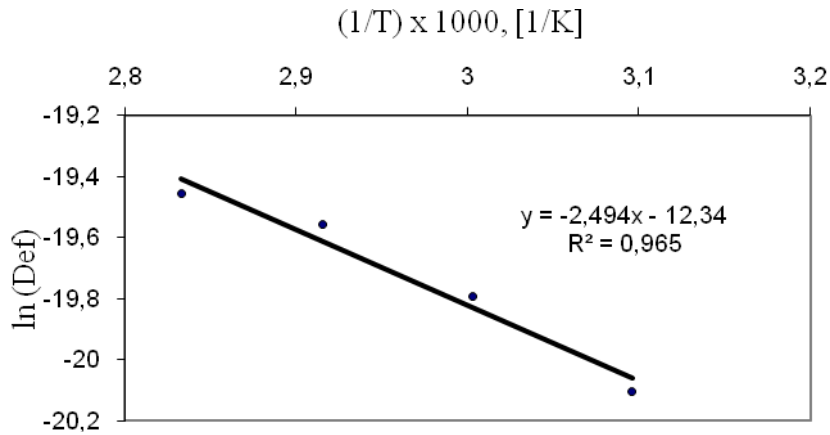
Pakowski, Z. & A.S. Mujumdar. 2006. Basic Process Calculations And Simulations In Drying. *Handbook Of Industrial Drying*, 3<sup>rd</sup> Edition. Edited by CRC Taylor & Francis Group Press.



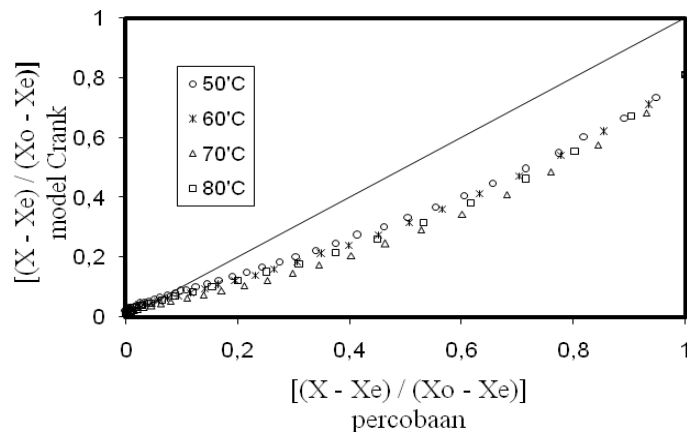
Gambar 1. Kurva Pengeringan



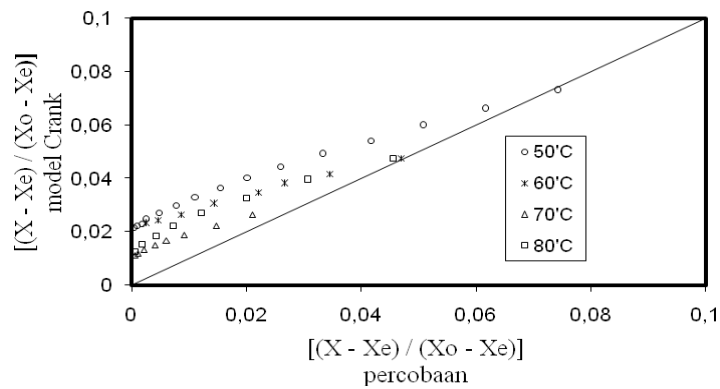
Gambar 2. Regresi untuk model solusi Crank



Gambar 3. Kurva  $\ln(D_{ef})$  terhadap  $(1/T)$



Gambar 4. Deviasi  $[(X - X_e) / (X_o - X_e)]$  model Solusi Crank terhadap data percobaan



Gambar 5. Deviasi hasil dari model Solusi Crank terhadap data percobaan untuk harga  $[(X - X_e) / (X_o - X_e)] < 0,1$

Tabel 1. Hasil perhitungan  $D_{ef}$  pada suhu percobaan

<b>T (°C)</b>	<b>T (K)</b>	<b>Slope</b>	<b><math>D_{ef}</math> (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
50	323	-0,011	1,86 E-09	0,985
60	333	-0,015	2,54 E-09	0,980
70	343	-0,019	3,21 E-09	0,963
80	353	-0,021	3,55 E-09	0,975