

PEMODELAN DAN SIMULASI PROSES PENGERINGAN *CHIPS MOCAF*

Didik Ariwibowo¹⁾, Eflita Yohana²⁾, M. Endy Yulianto³⁾, Vita Paramitha³⁾, Fahmi Arifan³⁾

¹⁾ PSDIII Teknik Mesin Universitas Diponegoro Semarang

²⁾ Jurusan Teknik Mesin Universitas Diponegoro Semarang

³⁾ PSDIII Teknik Kimia Universitas Diponegoro Semarang

Jl. Prof. Sudharto, SH. Kampus UNDIP Tembalang Semarang 50239

Email: didik_ariwibowo@ymail.com

Abstract

This study was to propose the use of a simple heat and mass transfer based model to predict the evolutions of the moisture content and temperature of cassava chip undergoing superheated steam drying (SSD). Cassava chip has been chosen as the product to be simulated because of its various uses in the food especially as modified cassava flour (mocaf). Recently, superheated steam drying (SSD) has received much attention as an alternative drying technique for heat-sensitive biomaterials. There are a very limited number of works that report attempts to model this drying process, although there are a number of works that report studies of this drying technique experimentally. The results showed that the drying of the product is affected by the drying steam temperature and the product characteristics. The model was found to be able to predict the heat and mass transfer behavior.

Keywords: *Cassava chip, mocaf, superheated steam drying*

PENDAHULUAN

Konsep pengeringan dengan uap panas lanjut (*superheated steam drying-SSD*) telah diaplikasikan untuk beberapa bahan yang sensitive terhadap temperatur. Dibandingkan dengan pengeringan menggunakan udara panas (*hot-air drying*), SSD memberikan banyak keuntungan (Bond 1992; Dibella 1996; Erdesz and Kudra 1990; Jensen 1992) diantaranya: (i) Sirkulasi uap panas lanjut dalam sistem tertutup akan mengurangi kehilangan energi, (ii) Koefisien transfer panas pada uap panas lanjut lebih tinggi sehingga meningkatkan laju pengeringan, memperbaiki efisiensi produksi, (iii) Oksidasi tidak terjadi pada SSD, karena lingkungan pengeringan tidak terdapat oksigen, yang dapat memperbaiki kualitas produk dan mengeliminasi potensi kebakaran atau peledakan, (iv) Polusi lingkungan dapat diminimalkan, karena uap yang keluar ke lingkungan relatif dalam jumlah kecil. Uap yang keluar dapat dikondensasikan dan ditampung dengan mudah, (v) Beberapa senyawa organik yang keluar saat pengeringan dapat direcover dan dipisahkan dengan kondenser.

Kajian SSD pada udang, pisang, apel, kentang dan singkong secara eksperimental telah dilakukan (Elustondo et al., 2001). Sebuah model matematis semi-empiris telah dikembangkan berdasarkan teori mekanisme pengeringan, yang mengasumsikan bahwa pengurangan air terjadi karena evaporasi dalam suatu batas bergerak yang memberikan ruang gerak bagi uap untuk mengalir melalui lapisan kering yang terjadi saat pengeringan berproses.

Pengembangan sebuah model matematis dua dimensi telah dikembangkan oleh Defo (2004), yang didasarkan pada kombinasi antara persamaan kekekalan massa dan hukum Darcy dengan mengabaikan gradient temperatur untuk menyimulasikan pengeringan vakum dengan uap panas lanjut pada gula dari kayu tanaman maple atau ahorna. Nilai koefisien transfer massa dan panas ditentukan dengan regresi data eksperimen. Kurva pengeringan prediksi dan eksperimen menjadi baik ketika koefisien transfer diatur sebagai fungsi dari kandungan air kayu. Di sisi telaah eksperimen SSD, efek tekanan dan temperatur operasi pada perpindahan panas dan karakteristik pengeringan produk

dievaluasi (Devahastin et al, 2004; Suvarnakuta et al., 2005). Namun demikian, pengembangan model matematis pengeringan atau dehidrasi tidak muncul.

Tujuan dari kajian ini adalah untuk mengembangkan sebuah model difusi untuk memprediksi perubahan kandungan air dalam chip singkong selama pengeringan dengan SSD. Model terdiri dari persamaan difusi dan perpindahan panas.

MODEL MATEMATIS

Proses pengeringan ditimbulkan oleh kondisi ketidak-setimbangan antara tekanan uap air pada medium pengering dan pada permukaan bahan yang dikeringkan. Banyak mekanisme untuk mendiskripsikan proses migrasi air di dalam bahan selama proses pengeringan, seperti: difusi, aliran kapiler, variasi tekanan, dan kombinasi diantaranya. Mekanisme tersebut tergantung pada kandungan air, keterkaitan antara air dan padatan penyusun bahan, temperatur dan ukuran pori. Kebanyakan dari variabel tersebut kompleks untuk diukur dan beberapa diantaranya berubah ketika proses pengeringan berlanjut (Treybal, 1987; Johnson, 1999).

Model yang dikembangkan ini untuk memprediksikan profil temperatur dan kandungan air dalam chip singkong. Model diselesaikan dengan mengidentifikasi asumsi-asumsi untuk penyederhanaan model, mendefinisikan persamaan pengatur untuk perpindahan panas dan massa dengan kondisi batas dan kondisi awal yang sesuai.

Asumsi

Berikut ini asumsi-asumsi yang ditetapkan untuk mendiskripsikan proses pengeringan SSD:

1. Kondensasi tidak terjadi di awal proses (Devahastin, 2004).
2. Perpindahan massa di dalam chip singkong hanya dikendalikan oleh difusi air. Hal ini mengasumsikan bahwa tidak terjadi penguapan di dalam chip.
3. Sifat-sifat termal chip singkong sebagai fungsi dari kandungan air, sedangkan difusivitas merupakan fungsi dari temperatur dan kandungan air (Chukwunke et. al, 2013).

4. Konduksi tak-tunak dianalisis dengan metode *lumped capacitance*.

Persamaan pengatur perpindahan panas dan massa

Simulasi dilakukan pada daerah pengeringan dengan laju pengeringan konstan (*constant rate period – CRP*). Penguapan dalam periode ini melepaskan kandungan air bebas yang berada di pori bahan.

Persamaan pengatur perpindahan panas dan massa dibagi menjadi dua bagian yaitu bagian lingkungan di luar chip yang dikendalikan oleh persamaan konveksi tunak dan pada chip yang diatur oleh persamaan konduksi tak-tunak. Persamaan konveksi tunak bertujuan untuk menentukan koefisien transfer panas dari aliran steam ke chip. Dengan asumsi aliran turbulens, persamaan yang digunakan adalah (Incropera and De Witt, 1990):

$$Nu_L = h L / k = 0,037 Re_L^{4/5} Pr^{1/3} \quad (1)$$

Perpindahan massa dalam chip hanya terjadi secara difusi cairan dan diwakili oleh hukum kedua Fick dengan persamaan:

$$\frac{\partial X_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial X_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{eff} \frac{\partial X_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{eff} \frac{\partial X_f}{\partial z} \right) \quad (2)$$

Kondisi awal dan kondisi batas

Pada permulaan proses, temperatur dan kandungan air adalah seragam:

$$T = T_i \quad (3)$$

$$X = X_{f,i} \quad (4)$$

Untuk chip yang diletakkan di pengeringan konveksi, kondisi batas pada permukaan ditentukan dengan persamaan:

$$-k(\nabla T \cdot n) = h(T_{steam} - T_s) - \rho L_v D_{eff}(\nabla X_f \cdot n) \quad (5)$$

Suku di sebelah kiri merupakan konduksi dari permukaan ke bagian dalam, suku pertama sebelah kanan adalah penetrasi panas dari uap panas lanjut ke benda padat karena konveksi, dan suku kedua sebelah kanan menyatakan panas laten penguapan.

Perpindahan massa pada permukaan dimodelkan dengan asumsi bahwa tidak terdapat hambatan pada permukaan chip. Karenanya, kondisi batas perpindahan massa adalah:

$$X_f = 0 \quad (6)$$

X_f menyatakan kandungan air bebas ($X_f = X - X_{eq}$). Kondisi ini menyederhanakan kondisi bahwa kandungan air pada permukaan selalu pada kesetimbangan pada kondisi operasi yang terjadi.

ESTIMASI PARAMETER

Sifat-sifat termofisika singkong

Sifat-sifat termal dan fisika singkong dalam model ditunjukkan pada Tabel 1 (Chukwuneke, 2013).

Tabel 1. Sifat-sifat chip yang digunakan

Sifat-sifat	Satuan	Persamaan
Panas spesifik, c_p	J/kg.K	$C_p = 0,04 X + 1,5$
Konduktivitas termal, k	W/m.K	$k = 0,00575 X + 0,22$

Koefisien diffusi efektif, D_{eff} , singkong dapat diestimasi dengan persamaan berikut:

$$D_{eff} = \exp \left[-c_1 - \left(\frac{c_2}{T_{abs}} \right) + c_3 X \right] \quad (7)$$

T_{abs} adalah temperatur absolut produk (K) dan c_1 , c_2 dan c_3 merupakan konstanta. Dalam kajian ini, konstanta tersebut ditentukan dari data sekunder beberapa penelitian tentang pengeringan singkong. T_{abs} ditentukan dengan mengaplikasikan persamaan perpindahan panas tak-tunak sebagai berikut (Incropera and De Witt, 1990):

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = \exp \left[- \left(\frac{hA_s}{\rho Vc} \right) t \right] \quad (8)$$

Koefisien perpindahan panas

Koefisien perpindahan panas dari proses pada SSD dapat diestimasi dari laju pengeringan selama *constant rate period* (CRP) sebagai berikut (Mujumdar, 1995):

$$h = \frac{NL_v}{A(T_{steam} - T_s)} \quad (9)$$

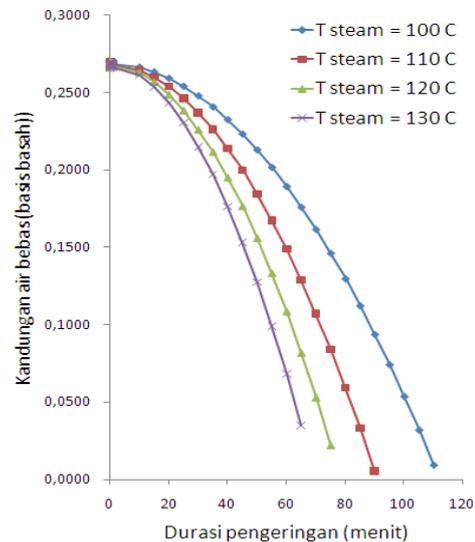
T_s adalah temperatur permukaan, yang merupakan titik didih air pada tekanan

operasi, dan T_{steam} adalah temperatur uap panas lanjut. L_v merupakan panas laten penguapan pada tekanan operasi dan A adalah permukaan perpindahan panas.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi pengeringan disimulasikan sebagai berikut: temperatur steam 120, 130, 140, dan 150 °C, temperatur jenuh pada chip 80 °C dan 100 °C. Kecepatan steam 0,2 m/s dan 1 m/s. Kondisi awal chip bertemperatur 26 °C dan kandungan air 65% serta kandungan air bebas (*free moisture*) 27%. Dimensi chip 30x30x5 mm.

Simulasi perubahan kandungan air dalam chip dilakukan secara numerik dengan interval waktu 20 menit, sedangkan perubahan temperatur chip disimulasi dengan interval waktu 0,2 menit. Hasil simulasi diplot dalam grafik kandungan air bebas (basis basah) versus durasi pengeringan (menit) dan temperatur (°C) versus durasi pengeringan (menit). Grafik hasil simulasi tersaji pada Gambar 1 sampai dengan Gambar 8.



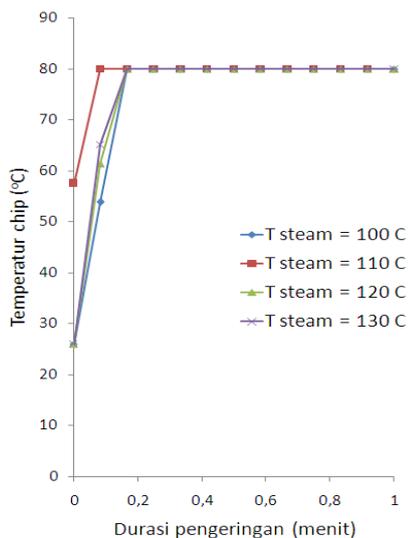
Gambar 1. Kandungan air bebas vs. durasi pengeringan pada kecepatan steam 0,5 m/s dan temperatur proses 80°C.

Gambar 1 menunjukkan proses pengeringan, yang diindikasikan oleh penurunan kandungan air seiring dengan peningkatan waktu. Kecuraman gradient kurva tersebut menunjukkan bahwa pengeringan tersebut

berada dalam periode laju pengeringan konstan yaitu periode penguapan kandungan air bebas.

Hasil simulasi tersebut memperlihatkan bahwa peningkatan temperatur steam berdampak pada kecepatan pengeringan. Penyelesaian proses pengeringan pada periode ini menjadi lebih cepat 10-25 menit seiring dengan kenaikan temperatur steam yang digunakan sebagai media pengering. Proses pengeringan tercepat terjadi dengan medium uap panas lanjut bertemperatur 130°C, yang ditempuh dalam waktu 65 menit, dan berturut-turut untuk temperatur uap panas lanjut 120, 110, dan 100°C adalah 75, 90, dan 110 menit.

Kecuraman gradien ini identik dengan model pengeringan eksponensial Henderson and Pabis, Page, dan Newton (Ajala, 2012) untuk daerah laju pengeringan konstan.

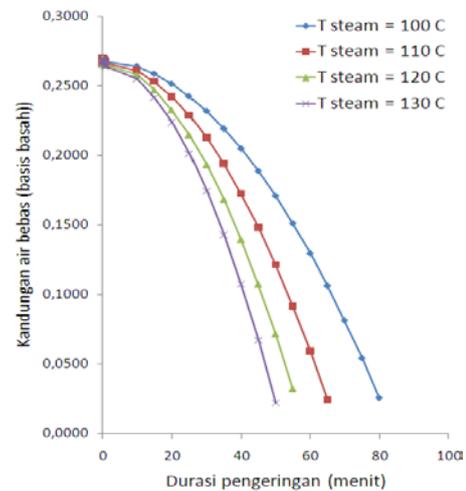


Gambar 2. Profil temperatur chip mocaf selama proses pengeringan pada kecepatan steam 0,5 m/s dan temperatur proses 80°C.

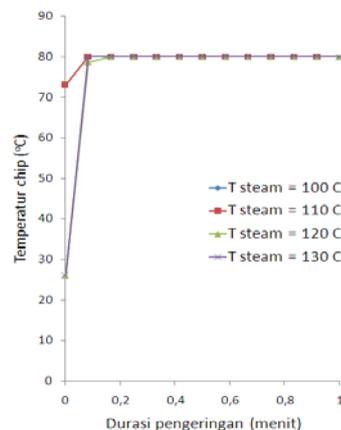
Perubahan temperatur pada chip mocaf dalam fungsi waktu pengeringan, yang mengikuti persamaan (8), dapat dilihat pada Gambar 2. Temperatur permukaan chip sama dengan temperatur uap jenuh pada tekanan operasi (Mujumdar, 1995). Simulasi ini mengatur temperatur permukaan 80°C. Dengan mengikuti asumsi lumped capacitance maka temperatur chip selalu seragam setiap waktunya. Karenanya

temperatur permukaan mengikuti profil perubahan temperatur chip. Profil temperatur menunjukkan bahwa temperatur uap jenuh pada permukaan chip tercapai dalam durasi 10-12 detik. Hal ini dikarenakan dimensi chip yang disimulasikan relatif kecil. Keempat temperatur uap panas lanjut yang digunakan sebagai medium pengeringan memberikan profil pencapaian temperatur uap jenuh chip yang relatif sama

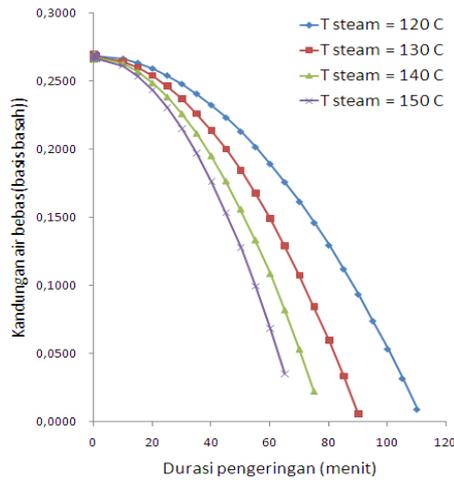
Simulasi dengan parameter kecepatan dan temperatur operasi yang lain dapat dilihat pada Gambar 3 sampai dengan Gambar 8 berikut ini:



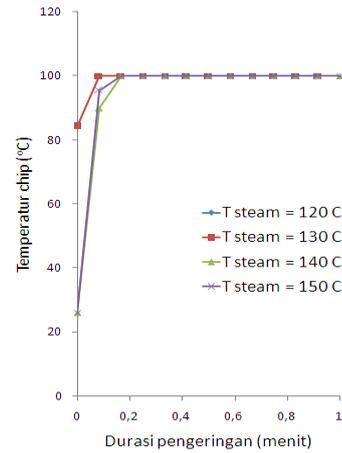
Gambar 3. Kandungan air bebas vs. durasi pengeringan pada kecepatan steam 1 m/s dan temperatur proses 80°C.



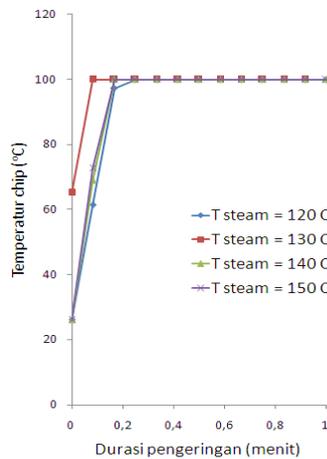
Gambar 4. Profil temperatur chip mocaf selama proses pengeringan pada kecepatan steam 1 m/s dan temperatur proses 80°C.



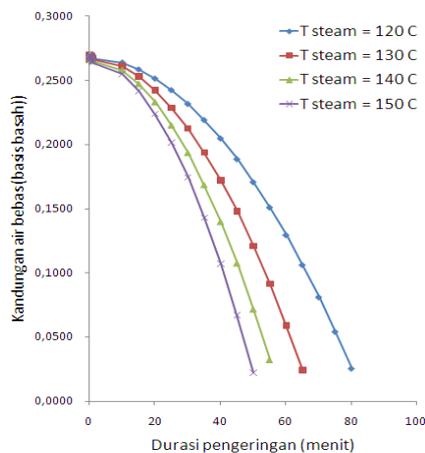
Gambar 5. Kandungan air bebas vs. durasi pengeringan pada kecepatan steam 0,5 m/s dan temperatur proses 100°C.



Gambar 8. Profil temperatur chip mocaf selama proses pengeringan pada kecepatan steam 1 m/s dan temperatur proses 100°C.



Gambar 6. Profil temperatur chip mocaf selama proses pengeringan pada kecepatan steam 0,5 m/s dan temperatur proses 100°C.



Gambar 7. Kandungan air bebas vs. durasi pengeringan pada kecepatan steam 1 m/s dan temperatur proses 100°C

Profil pengurangan kandungan air dalam chip yang ditunjukkan pada Gambar 1, 3, 5, dan 7 memiliki tren dan nilai yang hampir sama. Kondisi ini diprediksi karena objek simulasi memiliki dimensi kecil. Namun, profil secara keseluruhan sesuai dengan profil pengeringan baik pada pengeringan konveksi udara panas – *convective hot-air drying* (Ajala, 2012; Tunde, 2010), pengeringan dengan medium udara panas - *still hot-air drying* (Wikaningtyas, 2010), ataupun *fluidized bed drying* (Santamaria, 2011).

Dibandingkan dengan ketiga jenis pengeringan tersebut, laju pengeringan pada SSD lebih cepat karena nilai koefisien perpindahan panas konveksi pada SSD lebih tinggi. Di samping itu, diffusifitas air dalam chip pada SSD lebih tinggi karena temperatur permukaan chip lebih tinggi. Temperatur chip pada SSD merupakan temperatur uap jenuh pada tekanan operasi sedangkan temperatur permukaan chip pada hot-air adalah temperatur bola basah atau *wet bulb temperature* pada kelembaban relatif operasi.

Peningkatan kecepatan uap panas lanjut dari 0,5 m/s menjadi 1 m/s berdampak signifikan pada laju pengeringan dari 110 menit menjadi 80 menit. Peningkatan kecepatan ini berkontribusi pada peningkatan nilai koefisien perpindahan panas konveksi dari $15,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ menjadi $27 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ baik pada temperatur operasi 80°C maupun 100°C .

KESIMPULAN

1. Penurunan temperatur proses dari 100°C menjadi 80°C tidak berpengaruh secara signifikan pada laju pengeringan. Oleh karenanya, pengeringan dengan uap panas lanjut dapat diatur temperatur prosesnya sesuai dengan sensitivitas bahan terhadap temperatur.
2. Peningkatan laju alir uap panas lanjut dari 0,5 m/s menjadi 1 m/s, dalam proses pengeringan SSD, dapat meningkatkan laju pengeringan hingga 27%.
3. Pengeringan dengan uap panas lanjut dapat meningkatkan laju pengeringan pada periode laju pengeringan konstan, yaitu 1-2 jam dibandingkan dengan pada pengeringan udara panas yang berkisar pada rentang 3-5 jam.
4. Model yang dikembangkan ini sesuai dengan model-model pengeringan eksponensial. Kesesuaian model ini adalah pada bagian periode laju pengeringan konstan.
5. Pengujian eksperimental untuk validasi model ini diperlukan agar didapatkan validitas model yang lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajala, A.S., Aboiye, A.O., Popoola, J.O., Adeyanju, J.A., 2012. Drying Characteristics and Mathematical Modelling of Cassava Chips. *Chemical and Process Engineering Research*. ISSN 2224-7467 (Paper) ISSN 2225-0913 (Online) Vol 4, 2012.
- Bond, J.F. 1992. Drying paper by impinging jets of superheated steam: Drying rates and thermodynamic cycles. *Drying Technology* 10(4):1131-1134.
- Chukwunke J.L, Achebe C.H, Okolie P.C, and Okafor E.A, 2013. *International Journal of Scientific Knowledge*. Vol. 1 Issue 5 ISSN 2305-1493, Jan 2013.
- Defo, M., Y. Fortin, A. Cloutier, Modeling superheated steam vacuum drying of wood, *Drying Technol.* 22 (2004) 2231–2253.
- DiBella, F.A.1996. Advanced steam atmosphere drying system. Report TR7020-003-96. Waltham, MA: TECOGEN Division, Thermo Power Corporation.
- Elustondo D., M.P. Elustondo, M.J. Urbicain,, 2001. Mathematical modeling of moisture evaporation from foodstuffs exposed to subatmospheric pressure superheated steam, *J. Food Eng.* 49 15–24.
- Erdesz, K. and T. Kudra. 1990. Superheated-steam drying Book review. *Drying Technology* 8(4):891-893.
- Incropera, F. and D. De Witt, 1990. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Son, New York.
- Jensen, A.S. 1992. Pressurized drying in a fluid bed with steam. In *Drying'92*, ed. A.S. Mujumdar, 1593-1602. New York, NY: Hemisphere Publishing Corporation.
- Johnson, A., 1999. *Biological process engineering*, John Wiley, Maryland.
- Mujumdar A.S, 1995. *Handbook of industrial drying*. 2nd edition Vol. 2. Marcel Dekker, Inc. New York.
- P. Suvarnakuta, S. Devahastin, S. Soponronnarit, A.S. Mujumdar, 2005. Drying kinetics and inversion temperature in a low-pressure superheated steam drying system, *Ind. Eng. Chem. Res.* 44 pp.1934–1941.
- H. Santamaria, N. Durango, A. Bula and M. Sanjuan, 2011. Non dimensional analysis of cassava transient drying in packing bed. *Latin American Applied Research* 41:87-93 (2011).
- S. Devahastin, P. Suvarnakuta, S. Soponronnarit, A.S. Mujumdar, 2004. A comparative study of low-pressure superheated steam and vacuum drying

of a heat-sensitive material, *Drying Technol.* 22 pp. 1845–1867.

Treybal, R., 1987. *Mass Transfer Operations*, Mc Graw Hill, New York.

Tunde-Akintunde T. Y, A. A Afon, 2010. Modeling of hot-air drying of pretreated cassava chips. *Agriculture Engineering Int: CIGR Journal*. Vol. 12, No.2. June, 2010 Open access at <http://www.cigrjournal.org>.

Wikaningtyas A.K., 2010. *Laporan mingguan pengeringan singkong*. Jurusan Teknologi Pangan Fakultas Teknik Universitas Pasundan. 27 November 2010.

