

**MODEL MATEMATIKA PENGERINGAN SAWUT UBIJALAR
DENGAN PENGERING ROTARI TIPE *CO-CURRENT*¹**
(Mathematical model for the drying of sweet potato grates with co-current rotary dryer)

Hendri Syah², Suroso³ dan Leopold O Nelwan³

ABSTRACT

The objective of this research were to estimate moisture equilibrium content and constant of drying of sweet potato grates, and to develop mathematical model of rotary drying and it's simulation. Drying characteristics of product need to be established because of important information for the design, prediction, and modelling. The model of rotary drying was constructed based on energy and mass balance. The differential equations were solved by simultaneous-numerically. This model applied to predict temperature dryer chamber, temperature product, moisture content and RH.

The result showed model can be used to obtain temperature profiles of air and the product in dryer chamber. Using the model, change of air temperature and product during drying were successfully predicted. Coefficient of determination (COD) between measured and calculated ranges 0.819-0.992, respectively. However, the model could not predict moisture content and RH accurately.

Keywords: *rotary dryer, feed rate, model, COD*

¹ Ditampilkan poster dalam Gelar Teknologi dan Seminar Nasional Teknik Pertanian 2008 di Jurusan Teknik Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian UGM, Yogyakarta 18-19 November 2008

² Staf Pengajar Jurusan Teknik Pertanian Unsyiah Banda Aceh

³ Staf Pengajar Departemen Teknik Pertanian IPB

A. PENDAHULUAN

Salah satu rantai pengolahan tepung ubijalar yang kritis adalah pengeringan. Hal ini dikarenakan proses ini sangat mempengaruhi mutu, daya guna untuk pengolahan selanjutnya, serta penyimpanan. Oleh karena itu dibutuhkan metode pengeringan sawut ubijalar yang sesuai dengan kebutuhan industri pengolahan yaitu kualitas, kuantitas, dan kontinuitas produksi. Pengeringan tipe *batch* dirasa tidak sesuai lagi untuk proses pengeringan bahan baku industri tepung karena kapasitas yang terbatas dan walaupun mutu dapat dijaga. Alternatif pengering buatan yang cocok untuk proses pengeringan sawut ubijalar adalah pengering tipe kontinyu.

Pengering rotari merupakan pengering kontak langsung yang beroperasi secara kontinyu dan terdiri dari cangkang silinder yang berputar perlahan serta biasanya dimiringkan beberapa derajat dari bidang horizontal untuk membantu perpindahan umpan basah yang dimasukan pada ujung atas silinder (Mujumdar, 2001). Pengering tipe kontinyu ini banyak digunakan di industri kimia, farmasi, dan pertanian. Salah satu keunggulan pengering ini dibandingkan dengan pengering pesaingnya adalah memiliki kapasitas yang tinggi. Adapun kelemahan dari pengering dengan kapasitas tinggi adalah kebutuhan energi yang besar dalam pengoperasiannya.

Naiknya harga bahan bakar saat ini menyebabkan biaya operasi dari pengering rotari juga ikut naik, sehingga diperlukan penelaahan terhadap kondisi operasi pengering serta sifat termofisik bahan yang akan dikeringkan. Pengkajian dengan percobaan yang berulang-ulang membutuhkan biaya yang tinggi serta memakan waktu yang lama, untuk itu perlu dikembangkan model yang dapat digunakan untuk melihat karakteristik pengeringan dan juga untuk simulasi kondisi proses. Menurut Stoecker (1971), penyusunan model dan simulasi merupakan bagian penting dalam mendesain proses. Pemodelan yang dimaksudkan untuk meniru suatu sistem sebenarnya dalam bentuk hubungan matematis

Pengembangan model matematis untuk menerangkan proses pengeringan, dan merupakan topik yang telah banyak diteliti selama beberapa dekade. Sekarang ini, lebih banyak model pengeringan yang tersedia terdiri dari tiga aspek utama dari sebuah model yaitu sifat termofisik, kinetika pengeringan, dan keseimbangan massa dan energi. Model pengeringan keseluruhan terdiri dari keseimbangan massa dan energi di dalam pengering yang dikombinasikan dengan model kinetika pengering dan termofisik yang cocok (Kouris *et al.* 1996). Distribusi suhu udara, suhu bahan, kadar air dan kelembaban relatif (RH) di dalam

pengering rotari sulit diukur secara langsung, maka diperlukan model matematis untuk menduganya.

Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan kadar air keseimbangan dan konstanta pengeringan sawut ubijalar, serta mengembangkan model matematika pengering rotari dan melakukan simulasi pengeringan sawut ubijalar.

B. METODOLOGI PENELITIAN

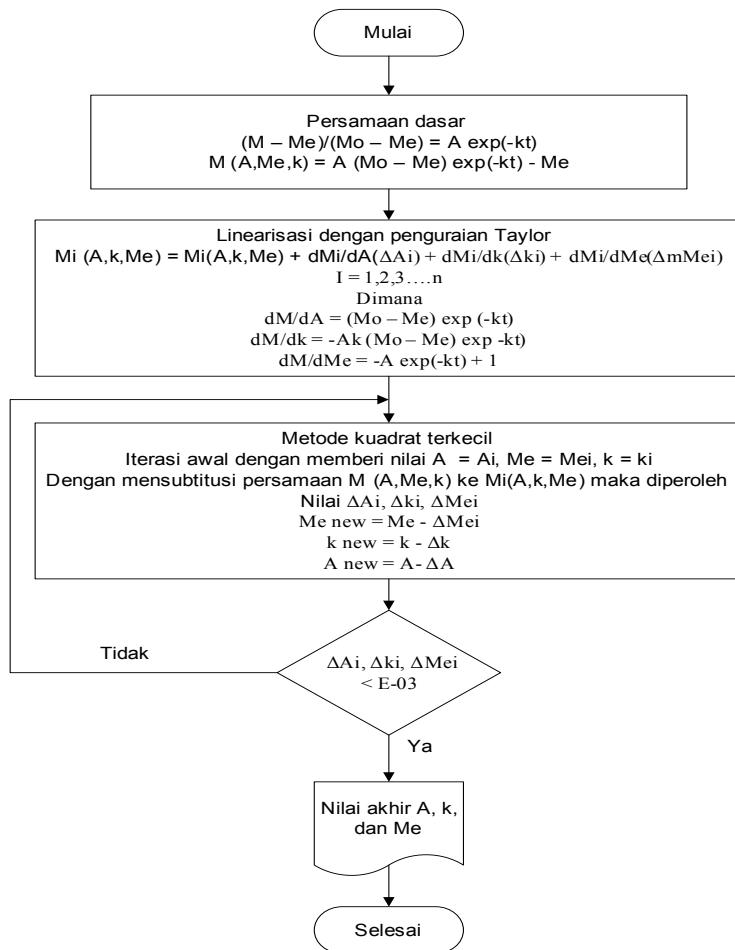
1. Bahan dan Alat

Penelitian dilakukan di Laboratorium Energi dan Elektrifikasi Pertanian, Departemen Teknik Pertanian, FATETA IPB dan Gudang Pengolahan KUD Jasa Mukti Cibungbulang Bogor. Waktu penelitian dimulai pada bulan Desember 2006 sampai Agustus 2007. Bahan yang dipakai pada penelitian ini adalah ubijalar. Bahan kimia yang dipakai adalah *natrium bisulfit* dan bahan bakar yang digunakan minyak tanah. Peralatan yang digunakan adalah oven pegering, timbangan digital, anemometer, termokopel (CC), termokopel (CA), *chino recorder*, multimeter YF-3503, *clampmeter*, termometer, mesin penyawut, mesin peniris mekanis, timbangan (10 kg dan 50 kg), *stop watch*, pengering biji-bijian udara terkendali (PBUT), dan pengering rotari.

2. Prosedur Penelitian

a. Penentuan sifat termofisik (Me dan k)

Pengambilan data kadar air keseimbangan (Me) dilakukan dengan menggunakan PBUT dengan 10 tingkat suhu dan RH yang terbentuk dijaga konstan. Tahap pertama adalah mempersiapkan sampel (sawut ubijalar), kemudian ditimbang massa awalnya (± 100 gram) dan kadar air awalnya. Selama pengeringan suhu dan RH dijaga agar konstan. Produk ditimbang setiap interval waktu tertentu, dimana interval ini semakin diperbesar setelah waktu tertentu, karena perubahannya semakin berkurang. Setelah perubahan massanya menjadi sangat kecil, maka pengeringan dihentikan. Perhitungan nilai Me dan k menggunakan metode *non linear least square*. Algoritma perhitungan A, K, Me dapat dilihat pada Gambar 1.



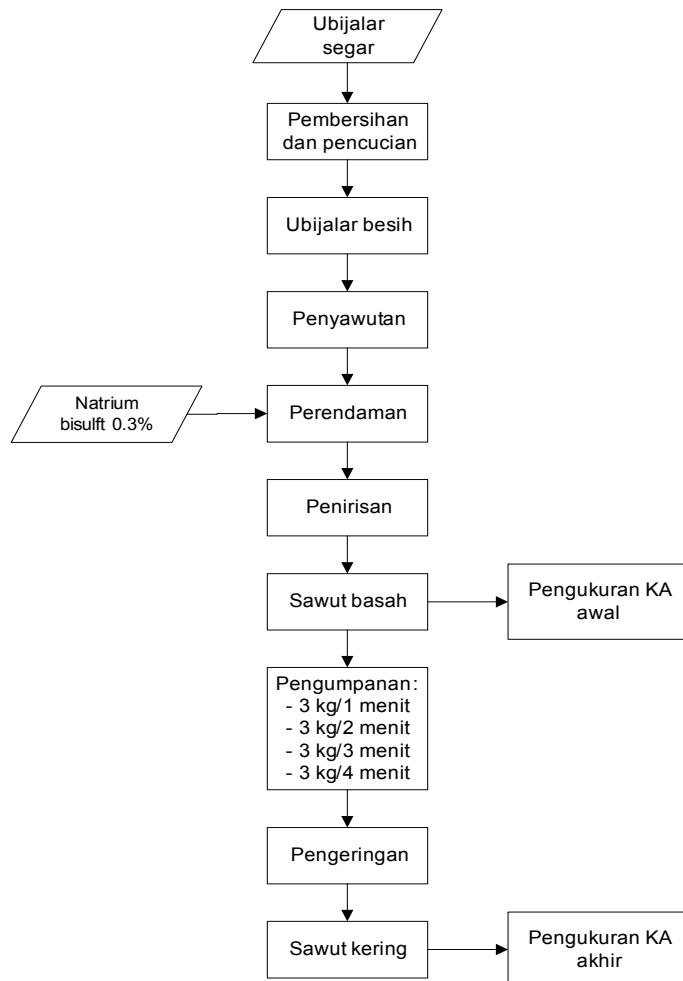
Gambar 1. Algoritma perhitungan A, k, dan Me (Abdullah *et al.* 2007)

b. Percobaan

Penelitian ini terdiri dari 4 percobaan yang dibagi berdasarkan laju pengumpunan yaitu I (3 kg/1 menit), II (3 kg/2 menit), III (3 kg/3 menit), dan IV (3 kg/4 menit). Prosedur pengeringan dapat dilihat pada Gambar 2.

c. Parameter Pengukuran

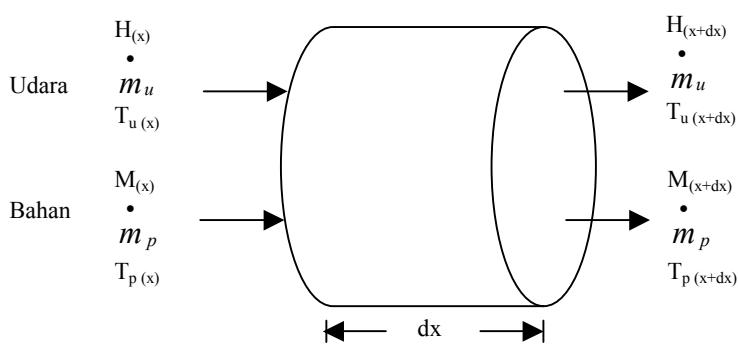
Parameter yang diukur meliputi : (1) kadar air (SNI 01-4493-1998); (2) suhu; (3) RH; (4) *residence time*; (5) kecepatan udara; (6) kemiringan silider dan (7) rpm.



Gambar 2. Diagram alir proses pengeringan sawut ubijalar

3. Model Fisik Pengering Rotari

Dalam mengembangkan model, pengering dibagi secara transversal menjadi beberapa volume kendali, dimana produk dan udara bergerak pada setiap volume kendali. parameter-parameter pada volume kendali dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Volume kendali

Persamaan diferensial yang diperoleh dari keseimbangan massa dan energi di dalam volume kendali sebagai berikut.

Perubahan kelembaban mutlak terhadap jarak (dH/dx)

Perubahan kadar air terhadap jarak (dM/dx)

Perubahan suhu udara terhadap jarak (dT_u/dx)

$$\frac{dT_u}{dx} = \frac{-h_{cv}A(T_u - T_p) - \dot{m}_u \left(\frac{dH}{dx} \right) (C_{pw}T_u + L_u)}{\dot{m}_u (C_{pu} + C_{pw}H)} \quad \dots \dots \dots \quad 3)$$

Perubahan suhu bahan terhadap jarak (dT_p/dx)

$$\frac{dT_p}{dx} = \frac{h_{cv} A (T_u - T_p) + \dot{m}_u \left(\frac{dH}{dx} \right) (L_p + (C_{pw} - C_{pl}) T_p)}{\dot{m}_p (C_{pp} + C_{pl} M)} \quad \dots \dots \dots \quad 4)$$

Dalam mengembangkan model pengeringan maka dibutuhkan persamaan laju pengeringan sebagai berikut

Kelembaban relatif (RH) menggunakan persamaan 6 (ASAE, 1994).

Simulasi model pengeringan rotari digunakan untuk menduga suhu ruang pengering, suhu sawut, kadar air, dan RH. Simulasi model pindah panas dan massa dilakukan untuk menyelesaikan persamaan diferensial (1) – (4) secara simultan dengan menggunakan metode numerik beda hingga *Euler*. Simulasi dilakukan dengan bantuan komputer (*Microsoft Office Excel*). Validasi model dilakukan untuk membandingkan hasil pengukuran dengan hasil simulasi yang diperoleh pada titik-titik pengukuran. Acuan yang digunakan menganalisis hasil validasi adalah kurva fitting dan COD (*Coefficient of Determination*).

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Kadar air keseimbangan (Me) dan Konstanta Pengeringan (k)

Kadar air keseimbangan dari sawut ubijalar diperoleh dari pengujian pengeringan lapisan tipis dengan berbagai tingkat suhu dan RH yang terbentuk. Nilai M_e hasil pengukuran digunakan sebagai input pada program komputer. Keluaran dari program tersebut adalah M_e , konstanta pengeringan, dan faktor bentuk yang dihitung secara simultan. Nilai M_e perhitungan digunakan untuk menentukan persamaan kadar air keseimbangan sawut ubijalar dengan suhu dan RH udara. Persamaan M_e sawut ubijalar untuk $50^{\circ}\text{C} \leq T \leq 84^{\circ}\text{C}$, $7.3\% \leq RH \leq 42.5\%$ sebagai berikut :

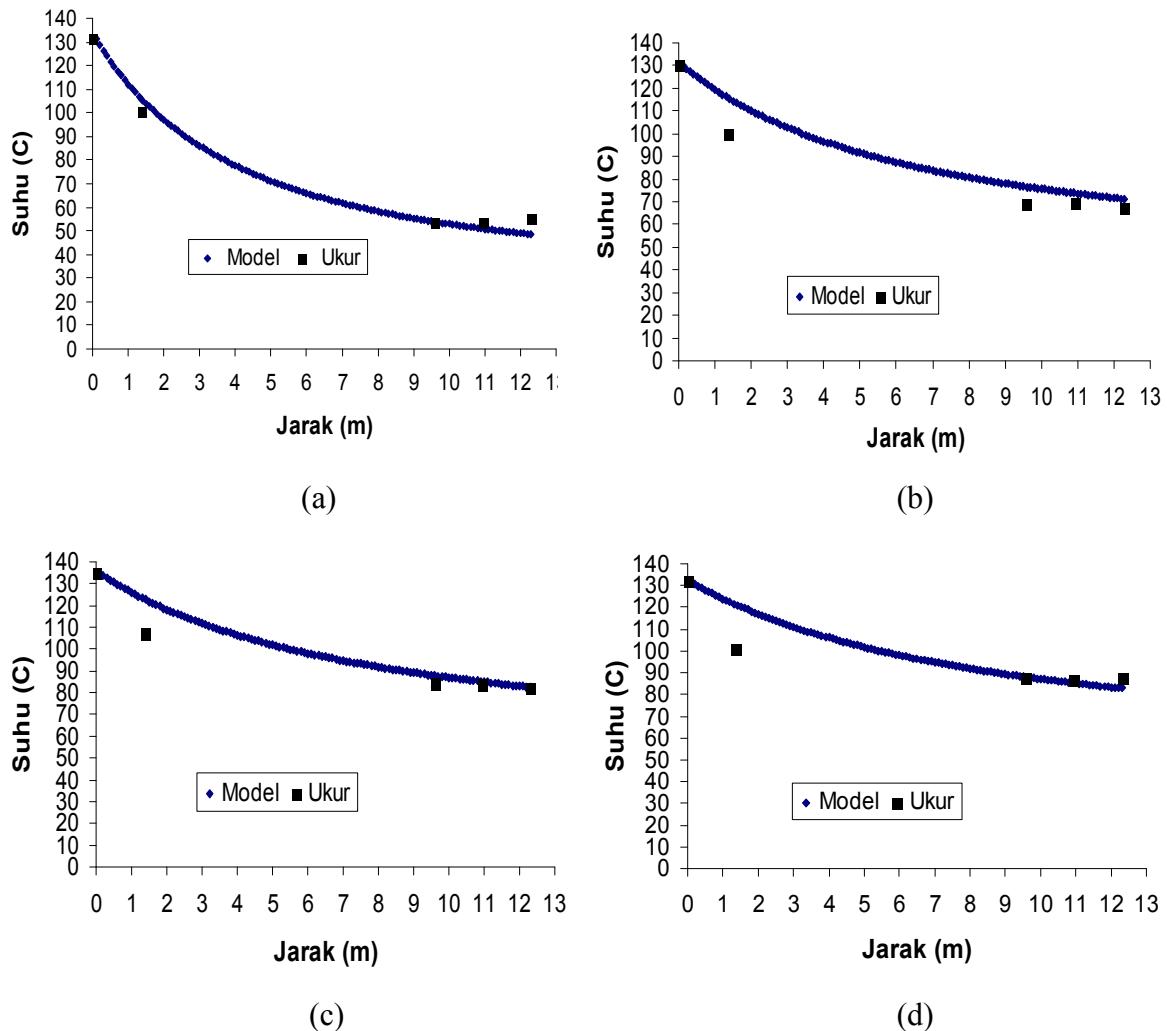
Persamaan konstanta pengeringan (k) terhadap suhu absolut untuk $323 \text{ K} \leq T \leq 357 \text{ K}$ menggunakan model sebagai berikut :

Pada umumnya untuk suhu semakin tinggi, nilai k akan semakin besar. Hal ini dapat dimengerti karena nilai k menunjukkan kecepatan pengeringan, apabila kondisi pengeringannya dalam keadaan sama (Nelwan, 1997).

2. Validasi Model

Model matematik digunakan untuk menduga distribusi suhu udara pengering di dalam silinder, suhu produk, kadar air, dan RH. Keluaran dari model divalidasi dengan data-data hasil pengukuran pada kondisi *steady state*. Input data yang digunakan pada model adalah laju pengumpanan sawut, laju aliran massa udara, kadar air awal sawut (%bk), suhu inlet, suhu sawut basah, panas jenis udara, panas jenis sawut, kelembaban mutlak udara lingkungan, panjang silinder, waktu tinggal, dan panas spesifik air, tekanan udara, koefisien perpindahan konveksi volumetrik, dan luas permukaan bahan yang terkena udara pengering.

Kesesuaian data pengukuran dengan hasil model dapat dilihat dari kurva fitting. Gambar 4 menunjukkan perbandingan antara suhu ruang pengering hasil pengukuran dengan keluaran model pada masing-masing laju pengumpaman.



Gambar 4. Suhu ruang pengering (model dan pengukuran) pada pengumpanan (a) 3 kg/1 menit, (b) 3 kg/2 menit (c) 3 kg/3 menit dan 4 kg/4 menit

Model dapat digunakan untuk menjelaskan profil suhu ruang pengering dan produk dalam arah aksial. Profil suhu pada percobaan I (laju pengumpanan yang tinggi) kecenderungan menurun dengan tajam dibandingkan dengan percobaan II, III, dan IV (laju pengumpanan yang rendah) terlihat agak datar. Hal ini dikarenakan banyaknya panas yang ditransfer ke bahan untuk proses penguapan sehingga terjadinya penurunan suhu udara pengering. Semakin tinggi laju pengumpanan maka semakin banyak panas yang ditransferkan dan semakin besar penurunan suhu. Menurut Iguaz *et al.* (2003) pada awal pengeringan laju perpindahan panas maksimum karena adanya perbedaan yang besar antara suhu udara dengan suhu produk, panas dibutuhkan untuk menguapkan air dari produk sehingga jumlah uap air lebih tinggi pada awal pengeringan.

Simulasi model untuk suhu ruang pengering telah mengikuti kecenderungan data dengan cukup baik, dimana nilai COD untuk masing-masing percobaan I, II, III, dan IV adalah 0.992, 0.955, 0.928, dan 0.819. Nilai COD yang berbeda setiap percobaan dikarenakan kesalahan (*error*) nilai pengukuran dan perhitungan (model) pada titik pengukuran 1.36 m sangat besar. *Error* masing-masing percobaan pada titik pengukuran 1.36 m adalah 4.7 °C, 15.8 °C, 15.8 °C, dan 20 °C. Penyebab dari *error* yang besar pada titik tersebut adalah asumsi dari model yaitu kehilangan panas pada *feeder* (bagian pengering rotari yang lebih dekat dengan titik pengukuran 1.36 m) diabaikan. Pada Gambar 4 terlihat suhu di titik pengukuran 1.36 m hasil model lebih tinggi dibandingkan dengan pengukuran, hal ini dikarenakan panas yang terbuang melewati lubang *feeder* tidak diperhitungkan didalam model. Selain itu, kemungkinan sensor suhu pada saat pengukuran tertutup oleh sawut yang diumpulkan sehingga suhu udara yang terukur kurang akurat. Berdasarkan hasil simulasi bahwa semakin tinggi laju pengumpanan maka semakin rendah suhu ruang pengering begitu pula sebaliknya.

Keakuratan profil suhu sawut sulit untuk dibuktikan karena suhu sawut di dalam silinder sulit untuk diukur, tetapi dalam kajian ini, suhu sawut di bagian outlet yang dapat diukur suhunya. Acuan yang digunakan untuk melakukan validasi model adalah *error* antara data pengukuran dengan model. Pengukuran suhu sawut dapat pada Gambar 39. Data pengukuran suhu sawut dengan menggunakan model masing-masing percobaan adalah 42.7 °C, 47.7 °C, 48.4 °C, dan 51.5 °C. Model suhu sawut memiliki kecenderungan cukup baik, hal ini dapat dilihat dari *error* yang dihasilkan cukup rendah. *Error* masing-masing pengukuran suhu sawut masing-masing percobaan adalah 1.3 °C, 0.9 °C, 1.2 °C, dan 0.6 °C. Semakin tinggi laju pengumpanan maka akan semakin rendah suhu sawut yang dikeluarkan dari ruang pengering begitu pula sebaliknya, hal ini sama dengan suhu ruang pengering. Input yang banyak pengaruhnya terhadap keluaran model adalah laju pengumpanan. Semakin besar laju pengumpanan maka selisih antara suhu udara pengering dengan suhu produk akan semakin kecil, begitu juga sebaliknya.

Pendugaan kadar air sawut dan RH dengan menggunakan model hampir sama dengan pendugaan suhu bahan, karena sulit untuk melakukan pengukuran di dalam ruang pengering yang berputar dan sawut yang bergerak. Dalam melakukan validasi terhadap model, data pengukuran yang digunakan hanya kadar air dan RH outlet saja. Berdasarkan hasil validasi diperoleh *error* yang sangat besar, baik untuk kadar air sawut maupun RH.

Error untuk kadar air pada percobaan I, II, III, dan IV masing-masing adalah 10.5% bk, 4.66% bk, 11.56% bk, dan 20.53% bk. Hasil validasi untuk RH outlet juga memiliki kecederungan yang sama dengan kadar air yaitu *error* yang besar. Model pendugaan untuk kadar air bahan dan RH belum bisa digunakan untuk memprediksi kedua parameter tersebut. Ada beberapa asumsi yang menyebabkan perbedaan yang cukup jauh antara data pengukuran dengan model adalah :

- a. Model dari M_e dan konstanta pengeringan (k) yang dihasilkan dari pengeringan lapisan tipis menggunakan selang suhu dan RH yang sempit, sedangkan kenyataannya selang suhu dan RH proses pengeringan rotari sangat lebar.
- b. Bentuk geometri dari sawut yang sangat beragam, hal ini ditambah lagi dengan bentuk sawut yang tidak utuh (patah) pada saat pengeringan karena *cascade action*, bentuk geometri sawut pada saat pengeringan lapisan tipis tidak mengalami kondisi tersebut. Perbedaan ini sangat berpengaruh terhadap konstanta pengeringan, bentuk sawut yang lebih kecil memiliki nilai k yang tinggi dibandingkan dengan sawut yang masih utuh.
- c. Nilai panas laten sawut yang digunakan sebagai input adalah panas laten air pada kondisi jenuh, hal ini sangat berpengaruh terhadap jumlah uap air yang diuapkan. Panas laten produk pertanian lebih tinggi dibandingkan dengan panas laten air.

Brooker *et al.* (1974) dalam Manalu dan Abdullah (2001) menyatakan penyebab perbedaan antara simulasi dan percobaan adalah kurang akuratnya model pengeringan lapisan tipis, kurang tepatnya persamaan kadar air isotermis bahan pada RH tinggi dan tidak tepatnya nilai parameter masukkan (input) model.

Ketidaktepatan nilai kadar air antara model dengan pengukuran diduga karena nilai konstanta pengeringan (k) hasil pengeringan lapisan tipis (model) tidak representatif terhadap pengeringan rotari karena bentuk geometri sawut ubijalar yang digunakan pada kedua pengujian berbeda. Untuk itu diperlukan faktor koreksi nilai k pada model yang digunakan. Setiap percobaan memiliki nilai faktor koreksi yang berbeda-beda. Pada Tabel 1 menunjukkan nilai faktor koreksi dengan kisaran 1.25 - 2. Faktor koreksi ditentukan pada model secara *trial and error*, dengan melihat *error* antara kadar air hasil pengukuran dengan model serta nilai COD untuk suhu udara pengering. Nilai faktor koreksi yang ditetapkan berdasarkan *error* kadar air yang rendah dan nilai COD suhu udara pengering yang tinggi. Pada tabel juga terlihat nilai *error* kadar air tanpa faktor koreksi lebih besar

dibandingkan setelah menggunakan faktor koreksi, begitu pula dengan COD tanpa faktor koreksi lebih kecil dibandingkan setelah menggunakan faktor koreksi pada model. Perbandingan tersebut menggunakan data input yang konstan pada model baik sebelum maupun sesudah menggunakan faktor koreksi.

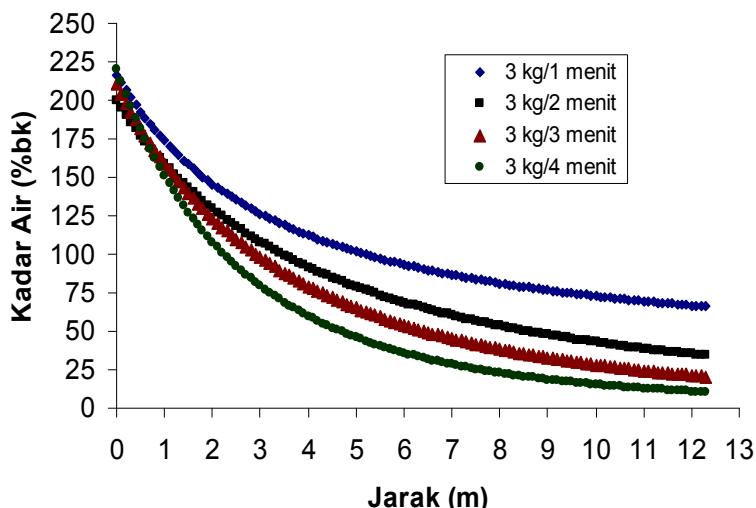
Perbedaan faktor koreksi setiap percobaan dikarenakan sawut yang lebih cepat kering akan lebih mudah patah yang kemudian menghasilkan ukuran sawut yang lebih kecil, sehingga konstanta pengeringannya juga tinggi. Faktor koreksi pada percobaan IV lebih besar dibandingkan dengan percobaan lain karena pada percobaan ini sawut lebih cepat kering (kadar airnya lebih rendah) dan mudah patah sehingga konstanta pengeringannya lebih tinggi, untuk itu diperlukan faktor koreksi yang lebih besar pada model. Perkalian faktor koreksi dengan konstanta pengeringan tidak berpengaruh terhadap keakuratan antara hasil pengukuran dan model untuk RH. Model yang menggunakan faktor koreksi dapat digunakan untuk menduga kadar air secara akurat karena *error* antara pengukuran dan model cukup rendah berkisar 0.98-2.04%bk.

Tabel 1. Faktor koreksi yang digunakan pada persamaan konstanta pengeringan

Parameter	tanpa faktor koreksi				faktor koreksi			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
faktor koreksi	-	-	-	-	1.25	1.25	1.45	2
KA ukur	64.98	36.23	19.29	9.01	64.98	36.23	19.29	9.01
KA model	75.48	45.46	38.35	40.45	65.96	34.19	20.59	10.48
<i>error</i>	10.5	9.23	19.06	31.44	0.98	2.04	1.3	1.47
RH ukur	81.62	-	56.8	19.3	81.62	-	56.8	19.3
RH model	67.2	17.4	9.7	8.5	81.7	19.54	10.88	9.5
<i>error</i>	14.42	-	47.1	10.8	0.08	-	45.92	9.8
COD	0.992	0.954	0.928	0.819	0.996	0.964	0.947	0.869

Sama halnya dengan peningkatan suhu sawut, penurunan kadar air sawut di ruang pengering juga sulit diukur secara langsung. Oleh karena itu, model simulasi dari kadar air dapat membantu melihat perilaku penurunan kadar air di ruang pengering. Penurunan kadar air pada pengumpanan 3 kg/l menit lebih lambat dibandingkan dengan pengumpanan yang lebih rendah. Sulitnya air keluar dari sawut karena suhu udara pengering yang rendah dan RH yang tinggi merupakan penyebab lambatnya penurunan kadar air pada pengumpanan 3 kg/l menit. Berdasarkan penelitian Iguaz *et al.* (2003), kehilangan kadar air bahan sangat cepat pada awal pengeringan, kira-kira 52% dari kadar

air awal hilang pada segmen awal pengering, dan pada segmen berikutnya kadar air berkurang lebih lambat. Penurunan kadar air setiap pengumpunan hasil simulasi dengan faktor koreksi dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Simulasi penurunan kadar air setiap pengumpunan (faktor koreksi)

D. KESIMPULAN DAN SARAN

1. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh persamaan Me untuk sawut ubi jalar yaitu $Me = 24.9 - 5.24\ln T - 0.33\ln(1 - RH)$ dan persamaan untuk konstanta pengeringan $k = -2.632 + 0.4607 \ln T$.
2. Model pengering yang digunakan telah dapat mengikuti kecenderungan suhu ruang pengering dengan COD berkisar antara 0.819-0.992, begitu juga dengan suhu produk dengan *error* sebesar 0.6 – 1.3 °C. Model tidak dapat digunakan untuk memprediksi kadar air dan RH outlet dengan akurat.
3. Faktor koreksi yang digunakan pada model konstanta pengeringan dapat meningkatkan COD antara model dengan pengukuran untuk udara pengering dan menurunkan error antara model dan pengukuran untuk kadar air dan suhu bahan. Faktor koreksi yang digunakan pada model konstanta pengeringan berkisar antara 1.25–2.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Program kemitraan *Agro-Machinery Industrial Interface Unit* (AMIn unit) Departemen TEP IPB yang telah membantu penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah K, Nelwan LO, Fasirun. 2007. Parameter pengeringan ikan kembung (*Rastrelliger sp*). Di dalam : Abdullah K, editor. *Teknologi Berbasis Sumber Energi Terbarukan untuk Pertanian*. Bogor: IPB Press.
- Alvarez PI, Shene C. 1994. Experimental determination of volumetric heat transfer coefficient in a rotary dryer. *Drying Technologi* 12(7), 1003-1027.
- Anonim. 1994. ASAE Standad. USA.
- Bala RK. 1997. *Drying and Storage of Cereal Grains*. New Delhi: Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd.
- Damardjati, Said D, Widowati S. 1994. Pemanfaatan ubijalar dalam program diversifikasi guna mensukseskan swasembada pangan. Malang : balitan No.3 : 1-25. ubi I-2.
- Hafsah MJ. 2004. *Prospek Bisnis Ubijalar*. Jakarta: Pustaka Sinar Harapan.
- Iguaz A, et al. 2003. Mathematical modelling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer. *Food Engineering* 59: 151-160.
- Kelly JJ. 1995. Rotary drying. Didalam : Mujumdar AS. Editor. *Handbook of industrial drying*. Ed ke-2. New York : Marcel Dekker Inc.
- Liu XY, Specht E. 2006. Mean residence time and hold-up of solids in rotary kilns. *Chemical Engineering Science* 61: 5176-5181.
- Manalu LP, Abdullah K. 2001. Model simulasi proses pengeringan kakao memakai pengering surya efek rumah kaca. *Buletin Teknik Pertanian* 15(3) : 154.
- Mujumdar AS. 2000. Pengeringan untuk bahan berbentuk padatan partikulat, bubur dan lembaran. Penerjemah : Armansyah dkk, editor. Bogor : IPB Press. Terjemahan dari : Mujumdar's practical guide to industrial drying.
- Nelwan, L. O. 1997. Pengeringan Kakao dengan Energi Surya Menggunakan Rak Pengering dengan Kolektor Tipe Efek Rumah Kaca. Tesis. Program Studi Keteknikan Pertanian. Program Pascasarjana. IPB. Bogor.
- Nelwan LO. 2005. Study on solar-assisted dryer with rotating rack for cocoa beans [dissertation]. Bogor: The Graduate School Bogor Agricultural University.
- Sarwono B. 2005. *Ubijalar*. Jakarta : Penebar Swadaya