

Kajian Energi Pengeringan Beku dengan Penerapan Pembekuan Vakum dan Pemanasan dari Bawah

Belyamin

Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta
Kampus Baru UI Depok 16425
E-mail : belyamin@yahoo.com

Armansyah H Tambunan

Hadi K Purwadaria

Departemen Ilmu Keteknikan Pertanian, FATETA, Institut Pertanian Bogor
Kampus Darmaga, Bogor

M Idrus Alhamid

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia
Kampus Baru UI Depok 16242

Abstrak

Freeze drying is known as the best method of drying especially for high value product. Nevertheless the cost of the process is very high due to intensive energy consumption. The process last for at least 26 hours. This research is aimed to find out whether or not the energy consumption is reducible. The problem of the high energy consumption is solved by back heating, heating through the frozen side of the freeze dried material, and application of vacuum to freeze the material directly. The general aim of this research is to produce a freeze dryer with vacuum freezing and back heating. The research is started by doing a study of vacuum freezing, continued by simulating the process of freeze drying and then building the freeze dryer.

The dryer is build with operating pressure of 0.6 torr or 80 Pa, The overall dimensions is 75 cm x 165 cm x 120 cm. The capacity of the sample holder is 100 gram of aloe Vera, The simulation of the freeze drying with back heating as an addition to radiating heating, reduce the drying time of a bout 2 hours.

Key words : freeze drying, back heating, aloe vera, vacuum freezing

Pendahuluan

Latar Belakang

Pengeringan beku diakui sebagai metoda pengeringan yang memberikan mutu hasil pengeringan terbaik dibandingkan metoda pengeringan lainnya (Liapis, et al., 1996, Martinez-Soto, et al, 2001). Keunggulan produk hasil pengeringan beku antara lain berupa kemampuan mempertahankan struktur untuk tidak mengkerut sehingga memungkinkan rehidrasi yang sangat cepat, retensi *flavor* tinggi karena pengeringan berlangsung pada suhu rendah, daya hidup dan rekonstitusi sel-sel hidup pada produk kering-beku tetap tinggi (Hua, et al, 2003). Penerapan metoda pengeringan beku masih terbatas pada produk-produk dengan nilai jual tinggi karena konsumsi energinya yang tinggi. Tingginya tingkat konsumsi energi akhirnya menyebabkan pengeringan beku menjadi metoda pengeringan termahal dibanding metoda-metoda lain (Sadikoglu, 2005). Karena biaya pengeringan yang terlalu tinggi ini pula, penerapan metoda pengeringan beku pada produk-produk baru kurang diminati sehingga pengungkapan potensi produk baru dengan penerapan metoda pengeringan beku tidak dapat dijalankan. Cheng, et al., 2002 mengusulkan metoda penurunan konsumsi energi dengan pemanasan dari bawah. Pada tulisannya Cheng et al mengajukan analisa solusi pengeringan beku dengan pemanasan dari bawah berupa pemodelan, tanpa verifikasi pada penerapan langsung metoda ini di bahan yang dikering bekukan. Untuk keperluan ini maka akan dilakukan penelitian kajian energi pengeringan beku ini.

Tujuan umum penelitian ini adalah menyediakan *prototype* mesin pengering beku dengan penerapan sistem pembekuan vakum dan pemanasan dari bawah untuk pengeringan beku lidah buaya,

sedangkan tujuan khususnya : 1) menerapkan metoda pembekuan vakum dan pemanasan dari bawah 2) merancang-bangun *prototype* mesin pengering beku dengan penerapan metoda pembekuan vakum dan pemanasan dari bawah dan 3) melakukan simulasi proses pengeringan beku dengan sistim pemanasan dari bawah.

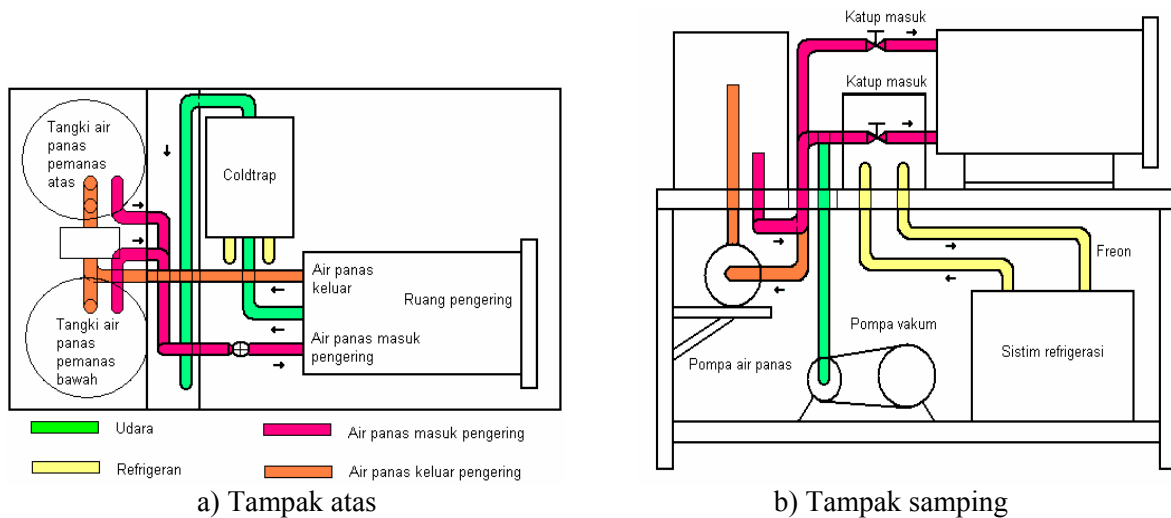
Metoda Penelitian Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Pindah Panas dan Massa Bagian Energi Listrik Pertanian, Departemen Teknik Pertanian, Institut Pertanian Bogor (IPB). Penelitian dilakukan mulai bulan Juni 2005 sampai Juli 2006.

Bahan dan Alat

Bahan yang akan dikeringkan adalah lidah buaya *Barbadensis* yang dipanen di kebun lidah buaya Atang Sanjaya, Bogor.

Alat yang digunakan selama penelitian berlangsung berupa mesin pengering beku yang telah dirancang, (dimensi umum 75 cm x 165 cm x 120 cm), yang terdiri dari 1) ruang pengering, tekanan 0,5 torr, 70 Pa, (diameter 34 cm, panjang 47 cm, volume 59 liter), 2) perangkat uap (cold trap), 3) dua buah tangki air panas masing-masing berkapasitas 30 liter dan menggunakan 1 filamen 2000W. Suhu air panas dikendalikan dengan thermostat dengan kisaran antara 30 °C sampai dengan 110 °C, 4) Pompa air Shinil SL126SP, 5) sistim refrigerasi menggunakan R134A dengan kompresor hermetik L'Unite Hermetique CAJ4511Y, 1 fasa, 5,3A, 220 V, dan 6) pompa vakum rotari Tokuda model RP6002, 0,75 kW, 3 fasa, laju aliran udara 600 l/menit dan tekanan *ultimate* $6,7 \cdot 10^{-2}$ Pa. Alat lain yang digunakan adalah timbangan elektronik AND EK1200A, wadah sampel lidah buaya berbentuk silinder diameter 9,5 cm dan tinggi 11 cm atau volume 0,9 liter, kapasitas wadah 100 gr lidah buaya dengan diisolasi bagian dasarnya. Blender Maspion MT 1210, *hibrid recorder* Yokogawa 3181, pengukur tekanan vakum Okano VA2076-6, gelas ukur, dan penyaring lidah buaya.



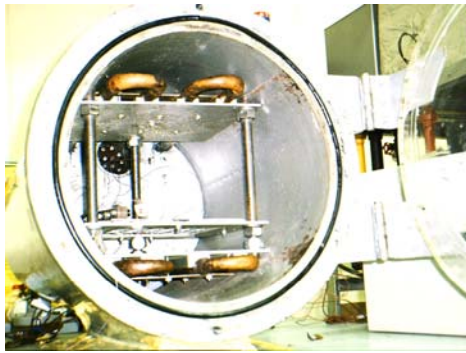
Gambar 1. Aliran udara, air panas dan refrigeran pada pengering beku dengan pembekuan vakum

Pengering yang dibuat, dirancang untuk mengalirkan fluida seperti pada gambar 1. Peralatan pengering beku yang telah dibuat ini ditunjukkan pada gambar 2. dan wadah sampelnya ditunjukkan pada gambar 3.

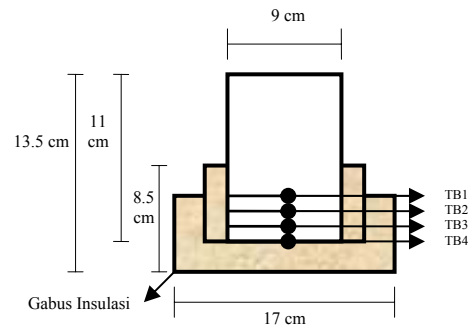
Tahapan Penelitian

Rancang Bangun Pengering Beku Dengan Pembekuan Vakum Dan Pemanasan Dari Bawah

Pada perancangan ini dilakukan perhitungan dan pemilihan bahan untuk : 1) ruang pengering termasuk pintunya, 2) perangkat uap 3) perpipaan air panas, dan 4) pemanas. Pengujian kinerja mesin pengering yang dibuat termasuk pada bagian ini.



Gambar 2. Pemanas atas dan bawah di dalam ruang pengering



Gambar 3. Wadah sampel

Penelitian Penerapan Pembekuan Vakum Pada Pengeringan Beku

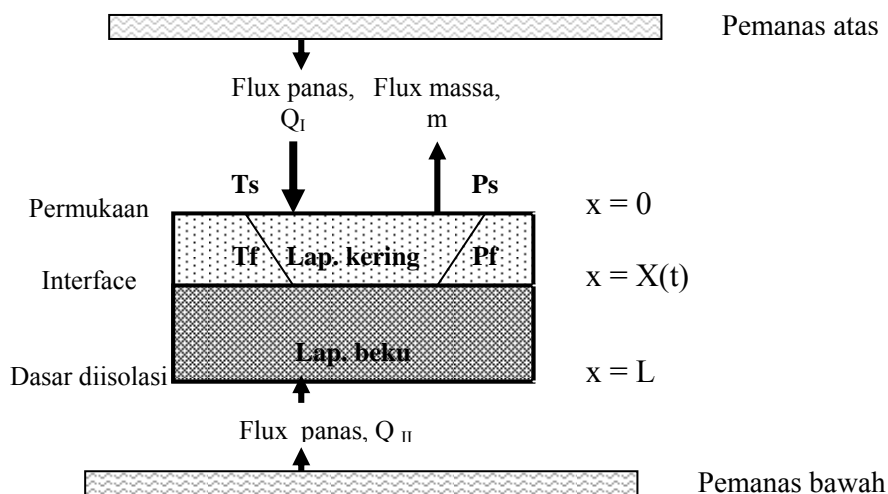
Pada tahap ini dilakukan penelitian pembekuan vakum lidah buaya untuk mengetahui laju pembekuan dan nilai konduktivitas termal. Tahapan penelitian ini meliputi pengupasan kulit lidah buaya, pembersihan getah dari daging lidah buaya dengan air yang mengalir, blansir, penguapan dengan air panas 70°C selama 10 menit dan penggilingan dengan blender untuk kemudian disaring. Tahapan selanjutnya meliputi penambahan Gum arab 2% dan Maltodextrin 3%, penimbangan dan penempatan dalam wadah sampel, dan perlakuan pengeringan beku. Peubah yang diukur adalah massa awal dan akhir bahan, suhu pada empat lapisan bahan, gambar 3, masing-masing: 1) lapisan dasar bahan yaitu lapisan bahan pada dasar wadah, TB4. 2) lapisan 0,5 cm dari dasar wadah, TB3. 3) 1 cm dari dasar, TB2. dan 4) 1,5 cm dari dasar wadah, TB1. Peubah lain yang diukur adalah tekanan ruang pengering, suhu perangkap uap dan suhu pemanas.

Simulasi Pengeringan Beku Dengan Pemanasan Dari Atas dan Dari Bawah

Setelah dilakukan penelitian penerapan pembekuan vakum, penelitian dilanjutkan dengan simulasi pengeringan beku dengan membuat program komputer dan menerapkan beberapa skenario berupa : 1) proses pengeringan beku dengan pengoperasian pemanas atas saja atau 2) pengeringan beku dengan pengoperasian pemanas bawah saja atau 3) pengeringan dengan pengoperasian pemanas atas dan pemanas bawah secara bersamaan.

PENDEKATAN TEORITIK

Model fisik pengeringan beku ditunjukkan dengan gambar 4



Gambar 4. Model fisik pengeringan beku

Pemodelan matematikanya seperti berikut

$$\left[\begin{array}{c} \text{laju perubahan} \\ \text{energi} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} (\text{Laju masuk}) \\ \text{energi} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} (\text{Laju keluar}) \\ \text{energi} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} (\text{pembangki tan}) \\ \text{energi} \end{array} \right]$$

$$\left[\begin{array}{c} \text{laju perubahan} \\ \text{energi} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{konduksi masuk} - \text{konduksi keluar} + \text{Aliran energi masuk} - \\ \text{Aliran energi keluar} + \text{pembangki tan energi} \end{array} \right]$$

a. Lapisan kering

$$\left[\frac{d}{dt} (m_{cp} T) \right] = kA \frac{dT}{dx} \Big|_x - kA \frac{dT}{dx} \Big|_{x+\Delta x} + \dot{m}_{\text{air} + \text{gas inert}} CpT \Big|_x - \dot{m}_{\text{air} + \text{gas inert}} CpT \Big|_{x+\Delta x} + \dot{m}_{\text{air beku}} \Delta H_v \quad [1]$$

$$\frac{\partial T_I}{\partial t} = \alpha_{te} \frac{\partial^2 T_I}{\partial x^2} - \frac{Cp_g}{\rho_{te} Cp_{te}} \left(\frac{\partial (Nt T_I)}{\partial x} \right) + \frac{\Delta H}{\rho_{te} Cp_{te}} \left(\frac{\partial C_{sw}}{\partial t} \right) \quad 0 \leq x \leq X(t) \quad [2]$$

b. lapisan beku

$$\frac{\partial T_{II}}{\partial t} = \alpha_{te} \frac{\partial^2 T_{II}}{\partial x^2} \quad X(t) \leq x \leq L \quad \alpha_{te} = \frac{k_{te}}{\rho_{te} Cp_{te}} \quad [3]$$

dengan kondisi batas

$$\text{pada } t = 0, T_I = T_{II} = T_x = T^0, \quad 0 \leq x \leq L \quad [5]$$

dan untuk pindah panas radiasi pada permukaan atas lapisan kering,

$$q_1 = \sigma F (T_{up}^4 - T_1^4) \Big|_{x=0} \quad t > 0 \quad [6]$$

pada $x = X(t)$,

$$k_{II} \frac{\partial T_{II}}{\partial x} - k_{te} \frac{\partial T_I}{\partial x} + V(\rho_{II} Cp_{II} T_{II} - \rho_I Cp_I T_I) + Nt Cp_g T_x = -\Delta H_s Nw \quad 0 < t \leq x = L \quad [7]$$

$$\text{pada } x = X(t), T_I = T_{II} = T_x, \quad t > 0 \quad [8]$$

$$\text{pada } x = L, \quad q_{II} = -k_{II} \frac{\partial T_{II}}{\partial x} \Big|_{x=L}, \quad t > 0 \quad [9]$$

Pemecahan model matematik

Dengan menggunakan metoda implisit maka dari persamaan 1. diperoleh persamaan

$$-r T_{I_{i-1}}^{j+1} + (1 + 2r - s) T_{I_i}^{j+1} + (-r + s) T_{I_{i+1}}^{j+1} = T_{I_i}^j \quad [10]$$

$$r = \frac{\Delta t \alpha_{te}}{\Delta x^2} \quad \text{dan} \quad s = \frac{\Delta t Cp_g Nt}{\rho_{te} Cp_{te} \Delta x}$$

T_I dicari dengan persamaan 10 dengan membuat matrik diagonal tiga.

Untuk $i = 1$ sampai N

$$\begin{bmatrix} -r & 1+2r-s & -r+s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r & 1+2r-s & -r+s & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & -r & 1+2r-s & -r+s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{I_1}^{j+1} \\ T_{I_1}^{j+1} \\ \cdot \\ T_{I_N}^{j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{I_1}^j \\ T_{I_2}^j \\ \cdot \\ T_{I_{N-1}}^j \end{bmatrix}$$

penyelesaian matriks ini dilakukan dengan menggunakan metoda numerik dengan algoritma Thomas

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel I. menunjukkan hasil penelitian pembekuan vakum lidah buaya. Tabel ini menunjukkan konsentrasi lidah buaya tidak mempengaruhi suhu pembekuan dan suhu sublimasinya tetapi mempengaruhi waktu pembekuan dan waktu sublimasinya. Ini dapat terjadi ketika sampel

lidah buaya dibuat sehomogen mungkin. Tabel ini juga menjelaskan bahwa waktu optimal pembekuan terjadi pada konsentrasi 65% baik pada lidah buaya blansir maupun tanpa blansir. Selain itu juga terlihat bahwa lidah buaya blansir dengan konsentrasi 65% menggunakan waktu sublimasi tersingkat. Ini dapat terjadi karena proses blansir akan berperan untuk menonaktifkan enzim pada lidah buaya ini. Dari hasil penelitian ini dapat diketahui bahwa lidah buaya yang harus dipersiapkan untuk mencapai hasil optimal adalah lidah buaya dengan konsentrasi 65 % dan perlu di blansir lebih dulu.

Panas pembekuannya dihitung dengan rumus :

$Q_{lt} = m C_{p1} (T_0 - T_{tb}) + m_i L_i + m_{sb} C_{p,fr} (T_{spds} - T_{tb})$ sedangkan panas yang dibutuhkan untuk sublimasi dihitung dengan $Q_{sb} = (m_{sb} H_{sb}) + m_{dr} C_{pte} (T_{spds} - T_{tb})$. Hasil perhitungan panas pembekuan dan panas sublimasi disajikan pada tabel I. Panas sublimasi lidah buaya blansir pada tabel I ini terlihat cenderung lebih tinggi. Jumlah yang tinggi ini terkait dengan jumlah air beku yang disublimasi. Lidah buaya blansir mensublimasi lebih banyak dari lidah buaya tanpa blansir.

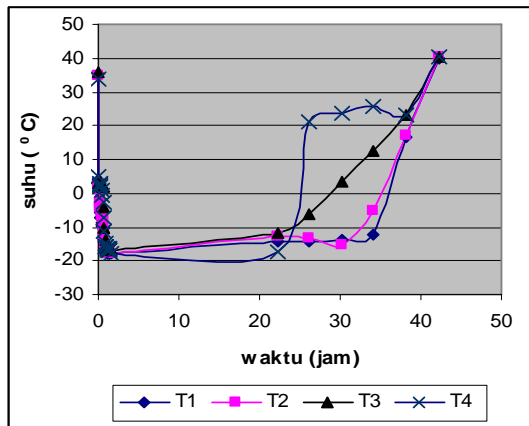
Tabel I menunjukkan laju pembekuan terbesar terjadi pada konsentrasi lidah buaya 65%. Hasil ini menunjukkan konsistensi bahwa konsentrasi optimal lidah buaya pada nilai ini. Demikian juga dengan panas pembekuan optimalnya.

Tabel I. Hasil pengujian lidah buaya diblansir dan tanpa blansir

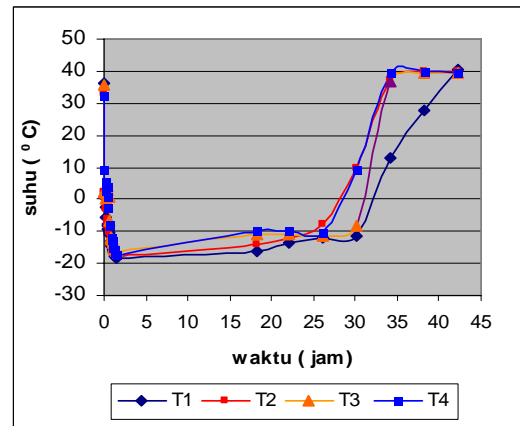
Kode sampel	B1	B2	B3	TB1	TB2	TB3
Konsentrasi[%]	73	65	45	73	65	45
Massa awal sampel [g]	93.3	93.3	93.3	93.3	93.3	93.3
Massa sublimasi [g]	82.1	80.9	79.7	79.9	79.1	80.1
Massa akhir [g]	11.2	12.4	13.6	13.4	14.2	13.2
Kadar air awal [%]	95.3	93.3	95.3	91.7	93.7	96.6
Kadar air akhir [%]	4.5	3.5	4.0	5.0	4.0	3.9
Suhu awal bahan [°C]	34	34	34	34	34	34
Suhu pembekuan [°C]	-18	-18	-18	-18	-18	-18
Suhu sublimasi[°C]	40	40	40	40	40	40
Waktu pembekuan [jam]	1.5	1.4	1.4	2.3	1.6	2.1
Waktu sublimasi [jam]	24.0	22.9	23.9	24.7	23.3	25.5
Panas pembekuan [kJ]	22.395	22.128	21.861	21.906	21.728	21.950
Laju pembekuan [cm/jam]	2.98	3.43	3.38	1.83	3.63	2.31
Panas sublimasi [kJ]	233.598	230.286	226.975	227.527	225.319	228.079

Keterangan: B = Lidah buaya diblansir, TB = lidah buaya tanpa blansir
Diblansir = diuapkan dengan air 70 °C selama 10 menit

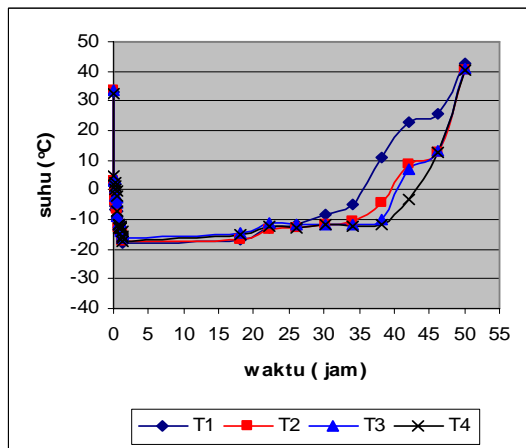
Distribusi suhu terhadap waktu pada pengeringan beku dengan pembekuan vakum ditunjukkan pada gambar 5,6 dan 7. Sebagai pembandingan terhadap hasil pengeringan beku dengan pembekuan vakum ini , data hasil pengeringan beku dengan lempeng sentuh ditunjukkan pada gambar 8. Pada gambar 8 ini terlihat suhu minimum bahan pada pembekuan lempeng sentuh jauh lebih rendah dari suhu minimum bahan pada pembekuan vakum. Ini terjadi karena pada pembekuan lempeng sentuh, suhu yang akan dicapai lebih bebas (tergantung besarnya pendinginan) sedangkan pada pembekuan vakum sangat dibatasi oleh tekanan vakum, tetapi yang menarik adalah perubahan suhu pada pembekuan vakum relatif lebih stabil daripada perubahan suhu pada pembekuan lempeng sentuh. Selain itu, pengeringan dengan pembekuan vakum membutuhkan waktu 45 jam untuk menyelesaikan pengeringan sementara pengeringan dengan lempeng sentuh hanya membutuhkan 33 jam.



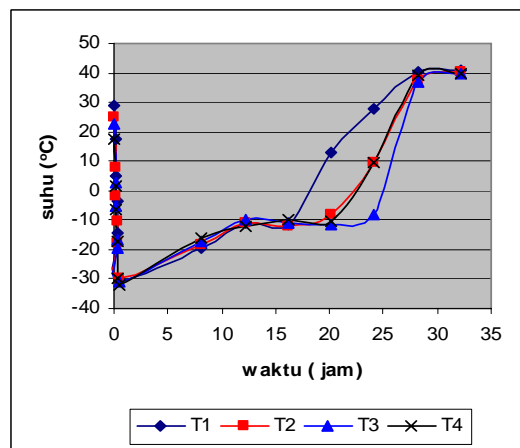
Gambar 5 Pengeringan vakum lidah buaya blansir konsentrasi 73%



Gambar 6 Pengeringan vakum lidah buaya blansir konsentrasi 65%



Gambar 7 Pengeringan vakum lidah buaya blansir konsentrasi 45 %



Gambar 8 Pengeringan lempeng sentuh lidah buaya blansir konsentrasi 65%

Keterangan gambar 5,6,7 dan 8.

- T1 : suhu lapisan permukaan atas bahan (1,5 cm dari dasar wadah sampel)
- T2 : suhu lapisan bahan 1 cm dari dasar wadah sampel
- T3 : suhu bahan 0,5 cm dari dasar
- T4 : suhu bahan tepat pada dasar wadah.

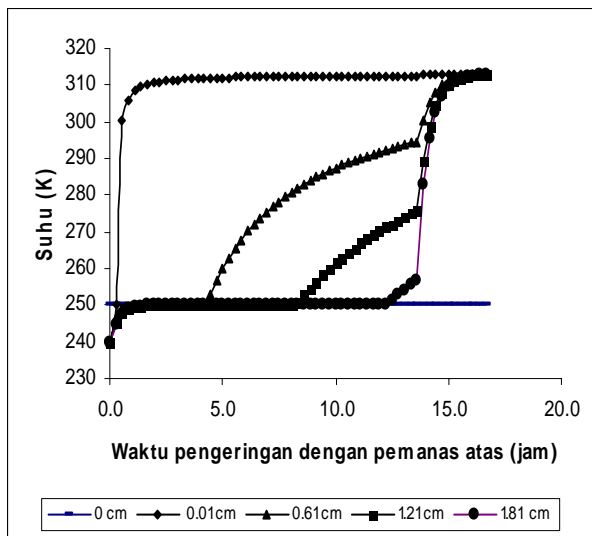
Hasil dari simulasi pemanasan atas ditunjukkan pada gambar 9, sedangkan hasil simulasi dengan pemanasan atas dan bawah seperti pada gambar 10.

Verifikasi

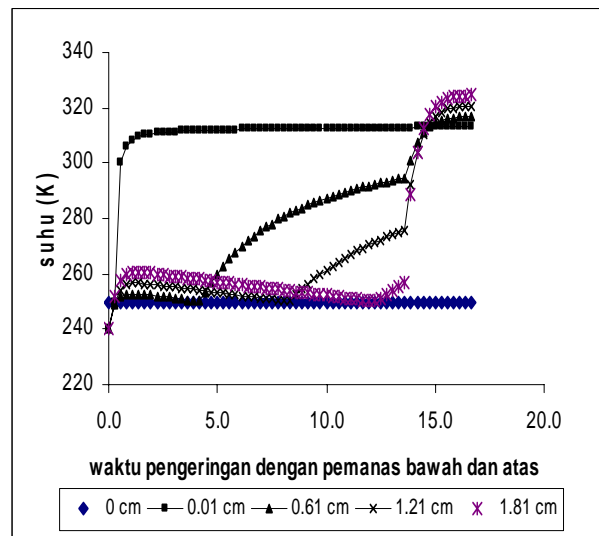
Sebagai salah satu cara untuk memverifikasi pemodelan, gambar hasil simulasi, gambar 9 dan gambar hasil pengambilan data, gambar 11 dibandingkan satu sama lainnya. Gambar 9 menunjukkan suhu lapisan pertama bahan naik dalam selang waktu yang cepat sedangkan pada gambar 11 suhu lapisan baru mulai terjadi kenaikan setelah 3 jam. Dari sini terlihat bahwa pemodelan ini masih harus diperbaiki dan atau ditinjau lagi penggunaan besaran-besaran peubahnya. Kecendrungan pergerakan kenaikan suhu sudah sesuai tetapi kecepatannya berbeda.

Gambar 10 menunjukkan bahwa dengan pengoperasian pemanasan bawah selain pemanasan atas, kenaikan suhu lapisan bahannya terjadi pada bagian bawah dan atas. Kenaikan suhu ini jika dikendalikan secara tepat (sehingga tidak terjadi pencairan, *melting*, bahan yang disublimasi) dapat mempercepat waktu pengeringan yang akhirnya akan dapat mengurangi penggunaan energi untuk

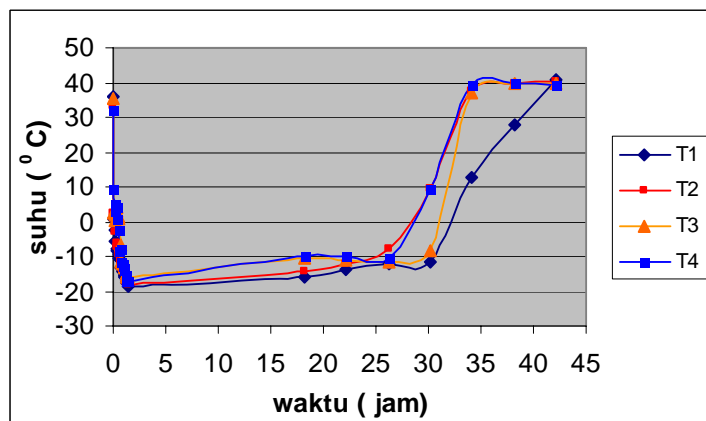
pengeringan beku. Besar penghematan energi dapat dihitung setelah didapatkan pemodelan yang lebih baik.



Gambar 9. Pengeringan beku dengan pemanasan atas



Gambar 10. Pengeringan beku dengan pemanasan atas dan bawah



Gambar 11. Sublimasi lidah buaya

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

1. Bahan lidah buaya yang diblansir lebih baik kecepatan pembekuannya dan waktu sublimasinya dibanding dengan yang tidak diblansir.
2. Mesin pengering beku dengan pembekuan vakum telah dapat dibuat dengan tekanan operasi 0,6 torr atau 80 Pa
3. Pengeringan beku dengan pembekuan vakum membutuhkan 250 kJ
4. Pembekuan beku dengan pembekuan vakum dan pemanasan dari bawah memerlukan waktu pengeringan yang lebih sedikit yang pada akhirnya dapat mengurangi jumlah pemakaian energi.

Saran

1. Peralatan yang telah berfungsi ini lebih baik lagi jika dilengkapi dengan sistem kendali yang lebih baik.
2. Peralatan ini akan sangat baik sekali untuk dimanfaatkan untuk masyarakat industri lidah buaya.

3. Sistem pemanasan dengan air panas ini dapat dikembangkan lebih lanjut sehingga sumber panasnya dapat divariasikan

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan pada Direktorat pendidikan tinggi atas pembiayaan penelitian ini melalui proyek Penelitian Hibah Bersaing 010/P4T/DPPM/PHB XII/III/2004, Tanggal 1 Maret 2004. Hal yang sama juga disampaikan kepada Bagian Energi dan Elektrifikasi Pertanian, Departemen Teknik Pertanian, FATETA IPB atas segala fasilitas yang digunakan selama penelitian berlangsung.

DAFTAR SIMBOL

C_{sw}	: Konsentrasi air terikat pada lapisan kering [kg/m^3]
C_{p1}	: panas jenis bahan pangan di atas titik beku [$\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$]
$C_{p,fr}$: panas jenis air beku [kJ/kgK]
C_{pte}	: kapasitas panas efektif lapisan kering, $C_d + C_w$ [kJ/kgK]
H_{sb}	: panas laten sublimasi [kJ/kgK]
K_{te}	: konduktivitas lapisan kering [kW/mK]
m	: massa bahan pangan yang dibekukan [kg]
m_{dr}	: massa bahan kering [kg]
m_{sb}	: massa air yang disublimasi [kg]
N_t	: flux massa total = $N_w + N_i$. [$\text{kg}/\text{m}^2\text{dt}$]
N_w	: Flux uap yang keluar bahan [$\text{kg}/\text{m}^2\text{dt}$]
Q_{it}	: panas pembekuan [kJ]
Q_{sb}	: panas sublimasi [kJ]
T_0	: suhu awal bahan pangan [$^{\circ}\text{C}$]
T_{tb}	: titik beku bahan pangan [$^{\circ}\text{C}$]
T_{cs}	: suhu sumber dingin selama tahap pembekuan [K]
T_{spds}	: suhu akhir bahan pangan yang dibekukan [K]
ΔH	: panas penguapan air terikat [kJ/kg]
ΔH_{fs}	: Perubahan entalpi pada tahap pembekuan [kJ]
ΔH_{mw}	: Panas laten air [kJ/kg]
ρ_{te}	: kerapatan rata rata lapisan kering [kg/m^3]

Subskrip

I	: Lapisan kering.
II	: Lapisan beku

DAFTAR PUSTAKA

- Araki, T., Y. Sagara, K. Abdullah, and A.H. Tambunan, 2001, Transpor properties of cellular food materials undergoing freeze-drying, *Drying Technology*, Vol. 19(2), pp. 297-312
- Cheng, J., Z.R. Yang, H.Q. Chen, 2002, Analytical solutions for the moving interface problem in freeze drying with or without back heating, *Drying Technology – An International Journal*, Vol. 20(3), pp. 553-568
- Carapelle, A., Henriest, M., Rabecki F., 2001, A Study of Vacuum Freeze Drying of Frozen Wet Paper, *Drying Technology – An International Journal*, Vol. 19(6), pp. 1113-1124
- Farial, J., Farid, M., 2003, Analysis of Heat and Mass Transfer in Freeze Drying, *Drying Technology – An International Journal*, Vol. 21 (2), pp. 249-261
- Hua, Z.Z., B.G. Li, Z.J.Liu, D.W.Sun, 2003, Freeze drying of Lysozymes with Cryoprotectants and Its Effect on Retention Rate of Encapsulated Ftorafur and vitamin A, *Drying Technology – An International Journal*, Vol. 21(8), pp. 1491-1505
- Liapis, A.I., R. Bruttini, 1995, Freeze drying, in A.S. Mujumdar (Ed.) *Handbook of Industrial Drying*, Vol.1, Marcel Dekker, USA.
- Sadikoglu, H., 2005, Optimal Control of the Secondary Drying Stage of Freeze Drying of Solutions in Vials Using Variational Calculus, *Drying Technology – An International Journal*, Vol. 23, pp 33–57