

PENERAPAN SISTEM PEMBEKUAN VAKUM DAN PEMANASAN DARI BAWAH PADA MESIN PENGERING BEKU

Implementation of Vacuum Freezing and Back Heating on Freeze Dryer

Belyamin¹, Armansyah H Tambunan², Hadi K. Purwadaria³, M. Idrus Alhamid⁴

ABSTRACT

Freeze drying is the best among the drying methods, especially for high value products. This is due to some reason: minimize the degradative reaction such as non enzymatic browning, protein denaturizing and enzymatic reaction, little loss of flavor and aroma and high re-absorptivity of solvent. However due to slow drying rate, the drying time is longer and energy consumption is higher, that make freeze drying process expensive. To overcome the problems, drying was proposed to operate by application of vacuum freezing and back heating beside the use of radiation from the upper surface of product. The objective of this research was to prove that freeze drying with vacuum freezing and back heating (PBPVpb) consume less energy than freeze drying with contact plate freezing (PBLs). The research was started by designing and manufacturing a PBPVpb before operating and analyzing it. This research found out that the energy consumption of PBPVpb was 90.6% of PBLs although the drying time of PBPVpb was 29% longer than that of PBLs. The drying rate of PBPVpb was 5 g/h whereas PBLs was 5.6 g/h.

Keywords: freeze drying, vacuum freezing, back heating

Diterima: 26 Juni 2007; Disetujui: 19 Agustus 2007

PENDAHULUAN

Proses pengeringan beku merupakan suatu proses pengeringan terbaik yang terdiri dari tiga tahap :

- 1) Pembekuan produk yang akan dikeringkan.
- 2) Pengeringan pada tekanan di bawah tekanan *triple* dengan cara sublimasi pelarut beku dan desorpsi pelarut tidak beku.

- 3) Penyimpanan dalam keadaan kering pada kondisi terkendali (bebas oksigen, bebas uap air, pada kondisi kedap udara, pada wadah tidak tembus cahaya dan diisi dengan gas inert kering).

Pembekuan produk dapat dilakukan dengan bahan *cryogenic*, lempeng sentuh (*contact plat*), pembekuan semprot atau cara lain. Pembekuan dengan metoda ini dilakukan pada tekanan atmosfer.

¹ 1. Sekolah Pasca Sarjana PS Ilmu Keteknikan Pertanian, Institut Pertanian Bogor.

² 2. Politeknik Negeri Jakarta, Kampus Baru UI Depok 16425. Email: belyamin@yahoo.com.

³ 3. Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Email: ahtambunan@ipb.ac.id

⁴ 4. Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor.

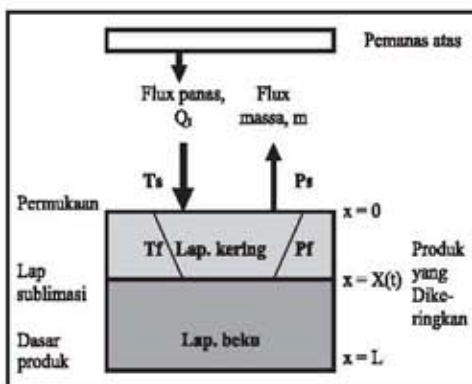
⁵ 5. Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

Setelah proses pembekuan, bahan beku dimasukkan ke ruang pengering untuk diturunkan tekanannya sampai mencapai tekanan vakum dan kemudian disublimasi pada tekanan tersebut. Dengan cara ini, pembekuan dilakukan pada tekanan yang berbeda dengan sublimasi. Agar tekanan pembekuan sama dengan tekanan sublimasi, pembekuan vakum langsung diterapkan pada ruang pengering. Keunggulan pembekuan vakum ini meliputi beberapa hal diantaranya produk langsung dibekukan dengan pemompaan vakum sehingga tidak lagi menggunakan media pembeku. Selain itu, pembekuan vakum dapat meningkatkan mutu produk karena ukuran kristal es yang halus dapat mengurangi kemungkinan kerusakan sel produk. Pengeringan beku juga dapat memperkecil kemungkinan penularan penyakit dan mengurangi kemungkinan kerusakan mekanis.

Peralatan pengering beku perlu dibuat untuk melakukan pengujian pengeringan beku dengan pembekuan vakum dan pemanasan dari bawah. Indikator keberhasilan pembuatan pengering ini ditentukan dengan tingkat pencapaian suhu pembekuan yang dibutuhkan, -18°C pada tekanan 0.5 torr atau 66.7 Pa. Suhu dan tekanan ini dibutuhkan untuk pengeringan beku produk pertanian pada umumnya (Liapis et al, 1995).

Selain menerapkan pembekuan vakum, pengering ini juga akan menerapkan pemanasan dari bawah. Hal ini dilakukan untuk mengatasi permasalahan yang dimiliki pengering beku pada umumnya berupa biaya pengeringan yang tinggi yang disebabkan oleh rendahnya laju pengeringan. Laju pengeringan yang rendah ini disebabkan panas yang dibutuhkan untuk sublimasi harus merambat melalui lapisan kering yang mempunyai nilai konduktivitas rendah seperti terlihat pada **Gambar 1**.

Beberapa penelitian telah dilakukan diantaranya penelitian pembekuan vakum (Zainuddin, 2003; Siregar, 2004) dan penelitian konsumsi energi pengeringan beku bahan biologik (Sutanto, 2004). Pada penelitian terdahulu didapatkan laju pembekuan vakum udang windu berkisar antara 3.91 cm/jam, 4.49 cm/jam dan 7.23 cm/jam (Zainuddin, 2003). Pembekuan ini tergolong pembekuan cepat sehingga kristal es yang terbentuk kecil. Kristal es yang kecil ini dapat mengurangi kerusakan sel produk. Selain itu pada penerapan metoda pembekuan vakum untuk durian, didapatkan bahwa pembekuan vakum menghasilkan kandungan protein yang lebih tinggi dibanding pembekuan lempeng sentuh (Siregar, 2004). Penelitian lain menyatakan bahwa keunggulan sistim vakum terletak pada proses pengolahannya. Dengan sistim pembekuan vakum, proses pembekuan mengurangi kemungkinan penularan penyakit, selain menyebabkan pembekuan lebih cepat (Tambunan, 2000). Selain itu telah dilakukan analisa pemanasan dari bawah untuk meningkatkan efisiensi perambatan panas ke lapisan sublimasi (Cheng et al, 2002). Pada penelitian ini, pengujian dengan pemanasan dari bawah belum dilakukan. Penelitian yang telah dilakukan dalam kaitan ini baru analisa matematisnya.



Gambar 1. Aliran panas dan massa pengeringan beku

Tujuan Penelitian

Penelitian ini ditujukan untuk Membuktikan kebenaran hipotesa bahwa pengeringan beku dengan pembekuan vakum dan pemanasan dari bawah (PBPVpb) mengkonsumsi energi lebih sedikit daripada pengeringan beku dengan pembekuan lempeng sentuh (PBLs). Pada PBLs, proses pengeringan beku terdiri dari tiga tahap (pembekuan, penurunan tekanan ke tekanan vakum, dan sublimasi). Dengan pengeringan beku PBPVpb, pembekuan dan penurunan tekanan ke tekanan vakum dijadikan satu proses simultan sehingga dengan PBPVpb, pengeringan beku kini menjadi dua tahap saja. Dengan berkurangnya proses pengeringan beku ini diharapkan pemakaian energinya juga berkurang.



Gambar 2. Ruang pengering dengan pemanas atas dan pemanas bawah



Gambar 3. Sistem pemanas

BAHAN DAN METODA

Waktu dan Tempat

Perancangan dan pembuatan peralatan pengering beku dilakukan dari Januari 2006 sampai Juni 2006 di Laboratorium Pindah Panas dan Massa, Departemen Teknik Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Pengujian proses pengeringan beku dilakukan Juni 2006 sampai Agustus 2006 di tempat yang sama.

Bahan dan Alat

Bahan yang akan dikeringkan adalah lidah buaya *Barbadensis* yang dipanen di kebun lidah buaya Atang Sanjaya, Bogor dan Lidah buaya pada kebun Lidah buaya PT Kavera Depok.

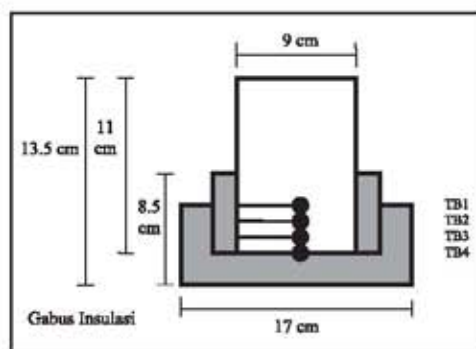
Alat yang digunakan selama penelitian berlangsung meliputi :

- 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), Gambar 2,
 - 2) Perangkap uap (*cold trap*),
 - 3) Dua buah tangki air panas masing-masing berkapasitas 30 liter dan berfilamen 2000W. Suhu air panas dikendalikan dengan thermostat dengan kisaran antara 30 °C



Gambar 4. Sistem refrigerasi

- sampai dengan 110 °C, Gambar 3,
- 4) Pompa air Shinil SL126SP,
 - 5) Sistem refrigerasi menggunakan R134A dengan kompresor hermetik L'Unite Hermetique CAJ4511Y, 1 fasa, 5.3°, 220 V, Gambar 4, 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 berupa :
 - 1) Timbangan elektronik AND EK1200A.
 - 2) 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 (Gambar 5).
 - 3) Blender Maspion MT 1210,
 - 4) *Hibrid recorder* Yokogawa 3181,
 - 5) Pengukur tekanan vakum Okano VA2076-6, gelas ukur, dan penyaring.
 - 6) Termokopel type cc



Gambar 5. Wadah sampel untuk pengujian pengeringan beku pembekuan vakum lidah buaya

Keterangan :

- TB1 Termokopel pada permukaan atas produk (1,5 cm dari dasar produk).
 TB2 Termokopel pada jarak 1 cm dari dasar.
 TB3 Termokopel pada jarak 0,5 cm dari dasar.
 TB4 Termokopel pada dasar produk.

Metoda Penelitian

A. Perancangan Pengering

Sistim pengering beku yang akan diteliti dan dianalisa, lebih dulu harus dirancang dan dibuat. Tidak semua bagian dari sistim pengering yang akan diteliti dibuat pada penelitian ini. Ruang pengering dan sistim refrigerasi misalnya, telah dibuat oleh peneliti terdahulu, Zainuddin (2003). Meskipun demikian, ruang pengering yang dibuat oleh peneliti terdahulu tidak dapat langsung digunakan tetapi harus dilengkapi pemanas atas dan bawah (Gambar 2). Demikian juga dengan kelengkapan sistim pemanas yang lainnya. Kelengkapan sistim pemanas ini harus dirancang dan di buat lebih dulu.

B. Pengujian Kinerja Pengering

Setelah sistim pengering beku selesai dibuat, maka dilakukan uji kinerja untuk memeriksa apakah kriteria yang diinginkan pada sistim pengering sudah dipenuhi. Pada sistim pengering ini kriteria keberhasilannya ditentukan dengan kemampuan untuk mencapai suhu produk beku minimal -18 °C untuk memenuhi syarat minimal suhu pembekuan produk pangan agar tidak terjadi *collaps*, (Liapis *et al.* 1995).

C. Penerapan Pengeringan Beku

Ketika sudah didapatkan bahwa pengering beku ini memenuhi kemampuan uji kinerja, kemudian dapat dilakukan penerapan pengeringan beku dengan pembekuan vakum dan pemanasan dari bawah. Bahan yang akan dikering-bekukan adalah lidah buaya. Proses pengeringan lidah buaya ini dilakukan dengan tahapan tahapan seperti berikut:

1. Penimbangan massa pelepah lidah buaya segar.
2. Pengupasan Lidah buaya segar.
3. Pembersihan lendir/getah yang

- ada pada daging lidah buaya.
4. Penimbangan seluruh daging lidah buaya segar yang didapat dari satu pelepah segar.
 5. Pemotongan daging lidah buaya menjadi dadu kurang lebih 1 cm^3 .
 6. Pemplansiran lidah buaya ukuran dadu dengan menguapkannya dengan air suhu $70 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 10 menit.
 7. Lidah buaya yang sudah diblansir kemudian diblender.
 8. Lidah buaya yang sudah diblender dicampur maltodextrin dan air untuk mendapatkan campuran lidah buaya 65%, maltodextrin 5% dan 30% air.
 9. Lidah buaya sebanyak 130 gr yang sudah diformulasikan, di masukkan ke wadah sampel.
 10. Pemasangan kabel thermokopel untuk pengukuran suhu pada lapisan-lapisan produk
 11. Penimbangan wadah sampel berisi lidah buaya tersebut.
 12. Dilakukan pembekuan vakum.
 13. Setelah semua bahan membeku kemudian dilakukan pengeringan dengan sublimasi.
 14. Penimbangan kembali seluruh wadah berisi serbuk lidah buaya setelah selesai proses pengeringan beku.

Parameter Penelitian

Parameter yang diamati meliputi: waktu pembekuan, waktu pengeringan, perubahan massa, suhu dan tekanan, kadar air awal dan akhir. Parameter parameter ini kemudian dapat digunakan untuk menentukan pengaruh parameter parameter tersebut terhadap karakteristik pengeringan beku dan pembekuan vakum. Parameter-parameter ini juga dapat digunakan untuk menentukan tingkat konsumsi energi pengeringan beku. Dengan diketahuinya perubahan massa dan perubahan suhu dapat dihitung panas pembekuan produk dan

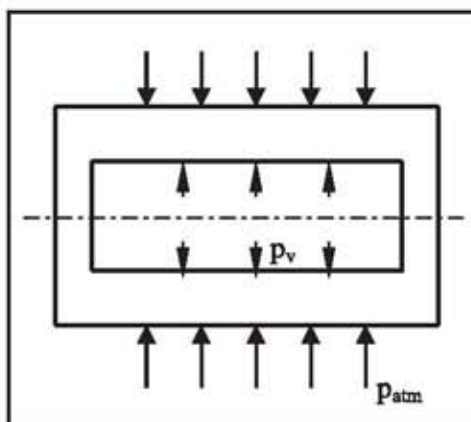
panas yang dibutuhkan untuk sublimasi produk beku.

PERANCANGAN PENGERING BEKU

Perancangan Ruang Pengering

Ruang pengering yang digunakan adalah ruang pengering yang telah dibuat oleh peneliti terdahulu, Zainuddin(2003). Ruang pengering yang sebelumnya hanya terdiri dari ruang pengering, pintu dan rak wadah sampel, ditambahkan lempeng pemanas atas dan pemanas bawah. Sebelum pengering ini digunakan, terlebih dulu dilakukan pemeriksaan ulang kekuatan bahannya. Hal ini dilakukan dengan menghitung tebal pengering. Jika tebal pengering yang dibuat lebih besar dari tebal hasil perhitungan pembebanan, maka dapat disimpulkan pengering ini aman untuk digunakan.

Tekanan pada dinding ruang pengering terjadi karena perbedaan antara tekanan di dalam, p_v dan di luar ruang pengering, p_{atm} . Karena tekanan di dalam ruang pengering sangat kecil (vakum) sedangkan tekanan di luar ruang adalah tekanan atmosfer maka terjadi pembebanan tekan ke dalam, seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Beban penekanan pada dinding ruang pengering

Pada perancangan ini digunakan ruang pengering yang terbuat dari baja karbon. Tegangan luluh (*yield*) bahan, σ_y baja adalah 340 Mpa dan faktor keamanan, n , yang digunakan 1.67 (Gere et al, 1987). Dengan data kekuatan bahan ini, dapat dicari tegangan bahan ijin, σ_i .

$$\sigma_i = \frac{\sigma_y}{n} = 203.6 \text{ MPa} \quad (1)$$

Jika tekanan vakum, p_v , 10 Pa dan tekanan atmosfer, p_{atm} , 101.3 Kpa, maka tekanan dinding pembeku,

$$\Delta p = p_{atm} - p_v = 101.29 \text{ KPa} \quad (2)$$

Ketika diameter ruang pengering yang digunakan 0.35 m dan panjang 0.5 m, maka dapat dicari tebal dindingnya dengan mempertimbangkan beberapa macam pembebanan.

1. Beban radial.

$$\sigma_i = \frac{F_t}{A} = \frac{\Delta p \pi d l}{2 t_{dp} l} \quad (3)$$

maka

$$t_{dp} = \frac{\Delta p \pi d}{2 \sigma_i} = 0.2735 \text{ mm} \quad (4)$$

2. Beban axial

$$\sigma_i = \frac{F_t}{A} = \frac{\Delta p \frac{\pi}{4} d^2}{\pi t_{dp} d} \quad (5)$$

$$t_{dp} = \frac{0.25 \Delta p d}{\sigma_i} = 0.044 \text{ mm} \quad (6)$$

Dari hasil perhitungan dengan pembebanan radial didapat tebal dinding yang diperlukan 0.27 mm sedangkan dengan pembebanan axial, tebal yang diperlukan 0.044 mm. Karena tebal yang dibuat (5 mm) lebih besar dari tebal hasil perhitungan pembebanan, maka dinding pengering kuat untuk dibebani.

Pintu Ruang Pengering

Seperti pada perancangan ruang pengering, pintu yang digunakan juga dihitung ulang untuk meyakinkan bahwa syarat kekuatan pintu pengering juga dipenuhi. Jika tebal pintu yang dibuat lebih besar dari tebal hasil perhitungan pembebanan, maka syarat kekuatan pintu pengering dipenuhi atau dengan kata lain pintu pengering kuat untuk menahan beban yang diberikan.

Pintu pengering dibuat dari bahan *acrylics*. Nilai σ_{ult} *acrylics* diketahui adalah $5.5 \cdot 10^3 \text{ Lb/in}^2$ atau $37895 \cdot 10^3 \text{ Pa}$. Jika tegangan yang digunakan adalah σ_{ult} , maka faktor keamanan yang harus digunakan adalah 2.8 (Garmo et al, 1984). Dengan data data ini maka dapat dicari σ_i .

$$\sigma_i = \frac{\sigma_{ult}}{n} = 13533.9 \cdot 10^3 \text{ Pa} \quad (7)$$

Ketebalan pintu ditentukan dengan menggunakan persamaan 6 dengan mengganti variabel t_{dp} menjadi t_{pp} .

$$t_{pp} = \frac{0.25 \Delta p d}{\sigma_{yi}} = 6.549 \cdot 10^{-4} \text{ mm} \quad (8)$$

karena hasil perhitungan kekuatan bahan menunjukkan tebal pintu *acrylics* yang dibutuhkan adalah 0.65 mm sedangkan tebal *acrylics* yang dibuat 5 mm, maka dapat disimpulkan pintu pengering memenuhi syarat kekuatan bahan.

Pompa Vakum

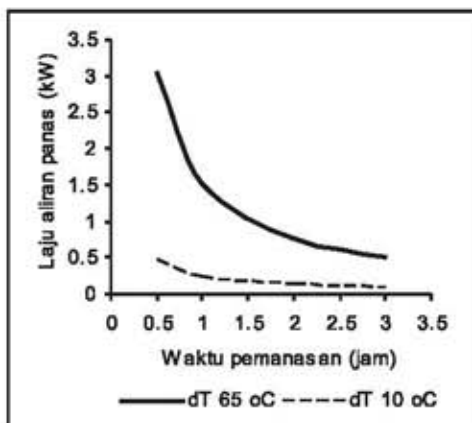
Pompa vakum yang digunakan adalah pompa rotari model RP6002, 3 fasa, daya listrik adalah 0.75 kW. Pompa ini mampu mengalirkan udara dengan laju aliran 600 l/menit dengan menghasilkan tekanan minimal (*ultimate*) 0.067 Pa. Untuk mengalirkan udara bertekanan rendah digunakan selang berpegas dan berdiameter $\frac{3}{4}$ inch.

Dimensi Pipa Air Pemanas

Pemanasan dilakukan dengan mengalirkan air di dalam pipa yang dikaitkan pada lempeng pemanas atas atau bawah. Dimensi pipa yang digunakan ditentukan dengan mempertimbangkan penurunan tekanan di dalam pipa dan aliran panas ke plat pemanas tersebut. Pipa yang kecil penurunan tekanannya dan susunan pipa yang dapat melepaskan panas yang besar ke plat pemanas dipilih untuk digunakan. Ukuran pipa pemanas yang dipilih adalah $\frac{3}{4}$ inch karena penurunan tekanan yang rendah terjadi pada diameter ini. Selain itu, pada diameter ini penurunan tekanan pipa 1 pass dengan *multi-pass* tidak jauh berbeda. Karena pertimbangan penurunan tekanan dalam pipa yang hampir sama dan pertimbangan kemudahan membuatnya maka dipilih susunan pipa *multi-pass*. Pipa ini disusun dengan menyambungkan pipa-pipa menggunakan belokan U.

Filamen Pemanas

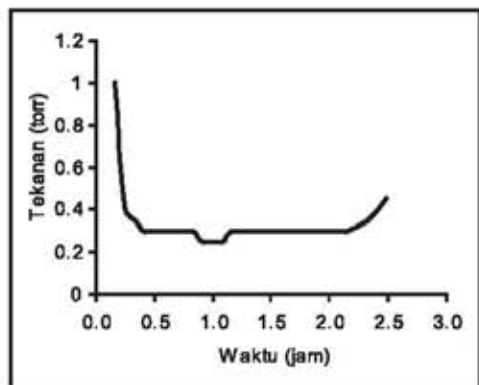
Grafik laju aliran panas dari filamen untuk menaikkan suhu air pemanas 65 °C dan 10 °C ditunjukkan dengan Gambar 7.



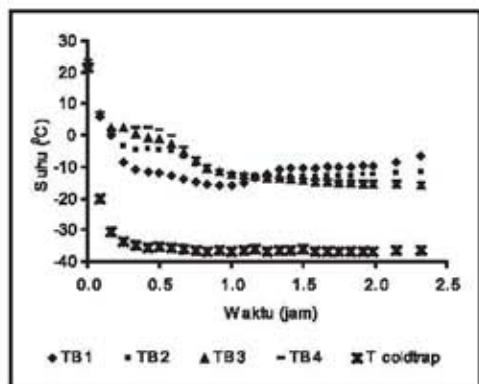
Gambar 7. Laju aliran panas terhadap lama pemanasan pada kenaikan suhu 65 °C dan 10 °C

Tangki air panas yang akan digunakan berukuran 20 l. Dari Gambar 7 terlihat bahwa dengan volume tersebut, agar tercapai kenaikan 65 °C dalam waktu kurang lebih 1 jam, dibutuhkan pemanas dengan daya 2 kW. Di sisi lain, untuk pemanasan kembali dengan kenaikan 10 °C, pemanas dengan daya 0.5 kW cukup untuk pemanasan dalam waktu 0.5 jam. Atau dengan kata lain jika digunakan pemanas 2 kW, pemanasan akan membutuhkan waktu yang lebih singkat lagi. Dengan pertimbangan ini, maka dipilih filamen dengan daya pemanasan 2 kW.

Peralatan pengering beku yang telah dibuat ditunjukkan dengan Gambar 2 sampai 4.



Gambar 8. Perubahan tekanan selama pembekuan



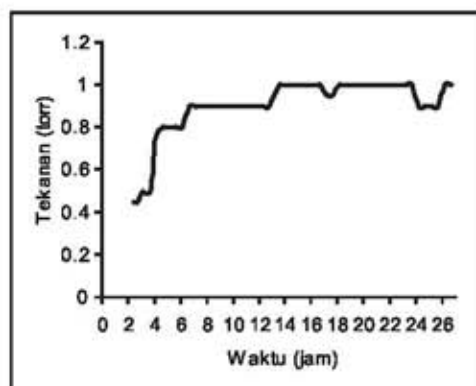
Gambar 9. Profil perubahan suhu selama pembekuan

HASIL DAN PEMBAHASAN

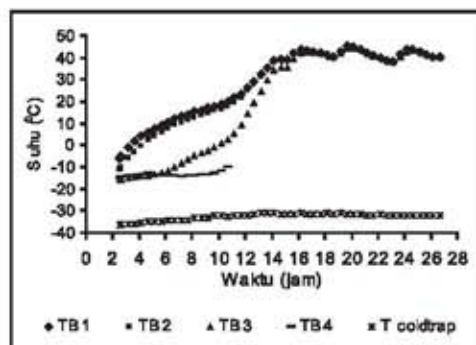
Pengujian Kinerja Pengereng Beku

Pengeringan beku lidah buaya dilakukan untuk pengujian kinerja pengereng beku yang telah dibuat. Dengan percobaan pengeringan beku ini didapat grafik penurunan tekanan terhadap waktu, (Gambar 8 dan 10), dan data perubahan suhu terhadap waktu, (Gambar 9 dan 11).

Dari pengujian ini terlihat penurunan tekanan terjadi secara drastis selama 15 menit pertama. Ruang pengereng mencapai tekanan 0.3 torr dalam waktu 25 menit. Tekanan ini bahkan lebih rendah dari tekanan yang dirancang (0.5 torr). Tekanan ini juga dapat bertahan selama



Gambar 10. Perubahan tekanan selama pengeringan



Gambar 11. Profil perubahan suhu selama pengeringan

proses pembekuan berlangsung. Ini menunjukkan alat pengereng beku yang dibuat, dapat berfungsi (dilihat dari sisi pencapaian tekanan) seperti yang direncanakan. Di sisi lain, ketika proses pengeringan dilakukan, tekanan bergerak naik ke titik stabil pada tekanan 1 torr. Ini dapat terjadi karena uap yang dilepaskan produk ikut menaikkan tekanan disebabkan tidak seluruh uap yang dilepas produk, tertangkap oleh perangkap uap (*cold trap*). Jika diperlukan agar tekanan stabil ini lebih kecil dari 1 torr, maka daya tangkap uap oleh *cold trap* ini perlu ditingkatkan dengan menghitung ulang daya pengkondensasian uap tersebut.

Pada tahap akhir pengeringan, suhu produk beresilasi pada kisaran 40 dan 50 °C. Hal ini terjadi karena suhu air pemanas pada tangki yang dikendalikan dan pengendalian ini dilakukan dengan termostat berketelitian ± 5 °C. Suhu permukaan bahan akan lebih stabil jika yang dikendalikan adalah permukaan bahan tersebut. Hal ini belum dilakukan karena sasaran utama adalah pencapaian atau pembuatan pengereng beku yang dapat beroperasi dengan pembekuan vakum dan pemanasan dari bawah. Pengembangan kinerja pengereng yang sudah dapat beroperasi ini dapat dilakukan kemudian.

Pengeringan beku umumnya perlu dilakukan di bawah titik tripel air (Liapis et al, 1995). Besar tekanan pada titik tripel adalah 4.58 torr. Dengan melihat bahwa pengereng beku ini bekerja pada kisaran 0.4 torr selama pembekuan dan 1 torr selama pengeringan maka dapat disimpulkan bahwa pengereng beku ini dapat berfungsi sesuai kebutuhan.

Penerapan Pengereng Beku

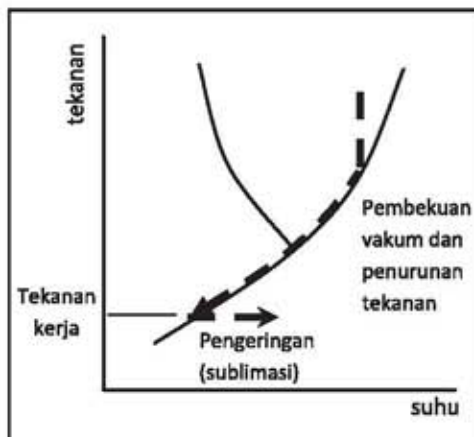
Perbandingan pengeringan beku pembekuan vakum, PBPV, dengan pengeringan beku konvensional (pengeringan beku pembekuan lempeng sentuh, PBLs, misalnya) ditunjukkan

dengan Gambar 12 dan 13. Total konsumsi energi proses pengeringan beku PBPV dihipotesakan lebih kecil dibandingkan pengeringan beku PBLs. Pemakaian energi pada PBPV lebih sedikit daripada PBLs karena pada PBPV, pembekuan berlangsung bersamaan dengan proses penurunan tekanannya sedangkan pada PBLs, pembekuan berlangsung secara terpisah dengan proses penurunan tekanannya sehingga pada PBLs ini dibutuhkan energi pembekuan dan energi penurunan tekanan secara terpisah.

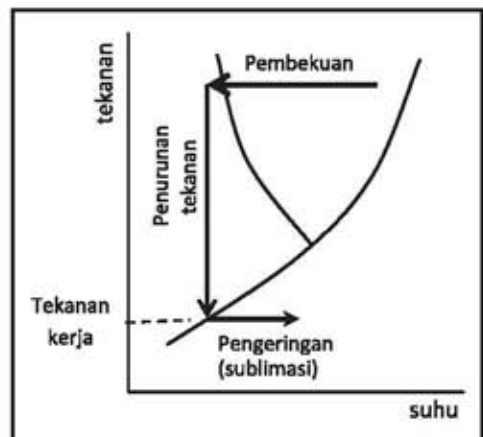
Energi Pembekuan Vakum

Hasil perhitungan pemakaian energi PBLs dan PBPV ditunjukkan dengan tabel 1. Tabel ini menunjukkan energi pembekuan hanya digunakan pada PBLs. Hal ini dapat terjadi sebab pada PBPV, pembekuannya terjadi karena penurunan suhu yang terus menerus disebabkan panas produk ini terpakai untuk panas laten penguapan. Hal ini terjadi ketika tekanan ruang pengering terus menerus diturunkan ke tekanan vakum (tekanan kerjanya). Dengan demikian pada PBPV energi

pembekuannya sudah termasuk didalam energi pemvakuman itu sendiri. Tabel 1 ini menunjukkan jumlah energi pemvakuman PBPV lebih kecil, (52%), dari jumlah energi pembekuan dan pemvakuman PBLs, sedangkan konsumsi energi pengeringan antara keduanya kurang lebih sama. Dari data ini dapat diketahui bahwa PBPV menggunakan total energi yang lebih sedikit, (90.9%), dibandingkan PBLs sehingga hipotesa yang dibuat dibenarkan dengan data ini. Penurunan pemakaian energi ini terutama disebabkan berkurangnya energi untuk pemvakuman meskipun pemakaian energi ini adalah yang terkecil jika dibandingkan dengan energi *cold trap* dan panas pengeringan. Selain menyatakan hal diatas, data pada Tabel 1 ini juga menyatakan bahwa energi penurunan tekanan (pemvakuman) dapat sekaligus dimanfaatkan untuk pembekuan produk. Selain itu tabel ini juga menunjukkan bahwa tekanan kerja mempengaruhi pemakaian energi dan lama waktu pengeringan. Dengan tekanan kerja yang lebih besar dibutuhkan waktu pengeringan yang lebih lama.



Gambar 12. Diagram tekanan-suhu pada pengeringan beku dengan pembekuan vakum, PBPV



Gambar 13. Diagram tekanan-suhu pada pengeringan beku dengan pembekuan mekanis atau pembekuan cryogenik, PBLs

Tabel 1. Perbandingan hasil perhitungan pemakaian energi panas dan kerja PBLs dengan PBPV

Jenis Pengerinan beku	Panas pembekuan (kJ/kg)	Energi vakum (kJ/kg)	Energi cold trap (kJ/kg)	Panas Pengerinan (kJ/kg)	Jumlah (kJ/kg)	Lama Proses (Jam)
Lempeng sentuh, PBLs dengan pemanas atas	25.285	1308.352	2835	2835.254	7003.891	20.00
Pembekuan vakum, PBPV dengan pemanas atas Tek kerja 1 torr		695.582	2835	2835.715	6366.297	26.67
Pembekuan vakum, PBPV dengan pemanas atas Tek kerja 1.7 torr		767.501	2835	2836.034	6438.535	29.63

Tabel 2. Perbandingan hasil perhitungan pemakaian energi panas dan kerja PBLs dengan PBPV pemanas atas dan bawah (PBPVpb)

Jenis Pengerinan beku	Panas pembekuan (kJ/kg)	Energi vakum (kJ/kg)	Energi cold trap (kJ/kg)	Panas Pengerinan (kJ/kg)	Jumlah (kJ/kg)	Lama Proses (Jam)
Lempeng sentuh, PBLs dengan pemanas atas	25.285	1308.352	2835	2835.254	7003.891	20.00
Pembekuan vakum, PBPVpb dengan pemanas atas dan pemanas bawah Tekanan kerja 1.7 torr		673.360	2835	2835.373	6343.733	25.75

Waktu pengeringan yang lebih lama akhirnya menyebabkan energi pemvakuman yang dibutuhkan menjadi lebih besar. Perubahan tekanan kerja dari 1 torr menjadi 1.7 torr menyebabkan kenaikan lama waktu pengeringan sebesar 11% dan kenaikan energi pemvakuman sebesar 10%.

Energi Pemanasan Bawah

Pada tabel 1 dan 2 terlihat pemakaian panas pengeringan per kg produk hampir sama. Panas pengeringan ini dihitung dari pengurangan massa produk yang dikeringkan dan suhunya. Pada penelitian ini tidak dapat dibedakan berapa massa yang sebenarnya berkurang pada proses pengeringan (sublimasi) saja, baik ketika digunakan PBLs maupun PBPV, karena

kesulitan pada pengukuran pengurangan massa dari waktu ke waktu. Oleh karena itu energi pemanasan hanya dapat dihitung dari total pengurangan massa dari awal proses sampai akhir proses pengeringan beku dan besarnya hampir sama.

Pemakaian energi *cold trap* adalah pemakaian energi *cold trap/kg* uap air yang dikeluarkan. Energinya dihitung per kg uap air sebab terjadi perbedaan dalam jumlah produk yang dikering-bekukan, pada PBLs yang dikeringkan sebanyak 100 gr sedangkan pada PBPV yang dikeringkan sebanyak 130 gr. Kelebihan sebanyak 30 gr ini diberikan sebagai toleransi karena pada PBPV akan terjadi penguapan yang lebih banyak sebelum terjadi pembekuan produk sehingga

Tabel 3. Hasil pengukuran pemakaian energi listrik Pembekuan vakum dengan pemanas atas, PBPV, dan Pembekuan vakum dengan pemanas atas dan bawah, PBPVpb.

Jenis pengeringan beku	Energi vakum (kWh)	Energi cold trap (kWh)	Panas pengeringan (kWh)	Jumlah Energi, JE (kWh)	Lama Pengeringan, LP (jam)	JE/LP (kWh/j)
Pembekuan vakum dengan pemanas atas (PBPV)	8.2	11.71	13.65	33.56	29.65	1.13
Pembekuan vakum dengan pemanas atas dan pemanas bawah (PBPVpb)	7.3	10.3	10.45	28.05	25.5	1.1

Tabel 4. Perbandingan pemakaian energi dan waktu pengeringan seluruh jenis pengeringan beku (hasil perhitungan) dengan pemakaian energi dan waktu pengeringan PBLs.

Jenis pengeringan beku	Panas pembekuan dan energi vakum	Energi cold trap	Panas Pengeringan	Total energi	Waktu Pengeringan
PBLs	100%	100%	100%	100%	100%
PBPV tekanan 1 torr	52.16%	100.00%	100.02%	90.90%	133.35%
PBPV tekanan 1.7 torr	57.55%	100.00%	100.03%	91.93%	148.15%
PBPVpb	50.49%	100.00%	100.00%	90.57%	128.75%

terjadi pengurangan volume produk yang signifikan. Hal ini tidak terjadi pada PBLs sebab pemvakuman pada PBLs dilakukan hanya setelah produk tersebut membeku. Hasil perhitungan menunjukkan besar energi cold trap PBPV sama dengan PBLs, demikian juga dengan panas pengeringan. Dengan demikian faktor yang mempengaruhi jumlah total energi yang digunakan adalah energi pemvakuman.

Pengeringan beku PBPV dapat menghemat pemakaian energi pengeringan disatu sisi tetapi menyebabkan kenaikan lama waktu pengeringan (Tabel 1). Kekurangan ini dilatasi dengan digunakannya pemanas bawah selain juga digunakan pemanas atas (Tabel 2). Penggunaan pemanas bawah ini dapat mengurangi pemakaian

energi dengan cara pengefisienan pemakaian energi. Energi yang tersedia pada ruang pengering (karena radiasi dari pemanas atas) dimanfaatkan kembali untuk pemanasan bawah. Pemanasan produk terjadi ketika isolasi bagian bawah wadah sampel dilepas. Dengan pemakaian PBPV pemanas atas dan pemanas bawah, PBPVpb, kekurangan PBPV dalam hal penambahan lama waktu pengeringan dapat diperbaiki. **pemanas atas dan bawah (PBPVpb)**

Tabel 1 dan Tabel 2 didapat dari perhitungan energi pembekuan, energi cold trap, energi pengeringan, dan dari perhitungan kerja pompa vakum. Dari kedua tabel ini didapatkan bahwa pengeringan PBPV menggunakan energi yang lebih sedikit dari PBLs. Selain itu juga didapatkan bahwa PBPVpb ternyata

Tabel 5. Laju pembekuan dan laju pengeringan seluruh jenis pengeringan beku yang diteliti

Jenis pengeringan beku	laju pembekuan (cm/jam)	laju pengeringan (gr/jam)
PBLS	5.6	5.6
PBPV tekanan 1 torr	2.84	3.4
PBPV tekanan 1.7 torr	4.64	4.2
PBPVpb tekanan 1.7 torr	3.16	5

menggunakan energi yang lebih sedikit lagi. Untuk lebih meyakinkan lagi, selain dilakukan perhitungan pemakaian energi pengeringan beku, pada penelitian ini juga dilakukan pengukuran langsung pemakaian energi listriknya. Hasil pengukuran ini ditunjukkan dengan Tabel 3.

Hasil pengukuran listrik pembekuan juga menunjukkan bahwa PBPBpb menggunakan energi yang lebih sedikit dibandingkan PBLs sehingga dapat disimpulkan bahwa penggunaan PBPV memang menggunakan energi yang lebih sedikit, kemudian PBPVpb menggunakan energi yang lebih sedikit lagi. Perbandingan pemakaian energi dan lama waktu pengeringan keseluruhan jenis pembekuan terhadap PBLs ditunjukkan dengan tabel 4.

Tabel 4 ini merangkum semua pembahasan mengenai pemakaian energi dan waktu pengeringan semua jenis pengeringan beku. Terlihat dari tabel ini bahwa PBLs lebih hemat pemakaian energinya dibandingkan PBLs walaupun mempunyai kelemahan pada waktu pengeringan yang lebih lama 33.35% dari PBLs. Selain itu juga dapat dilihat bahwa PBPVpb paling hemat pemakaian energinya dibanding jenis pengeringan beku lainnya meskipun dari segi waktu pengeringannya PBPVpb ini lebih lama 28.75% daripada PBLs. Lama waktu pengeringan PBPVpb ini lebih baik dibandingkan PBPV, sehingga PBPVpb

dapat dijadikan alternatif proses pengeringan beku sebagai ganti PBLs karena pemakaian energinya lebih hemat.

Selain menentukan pemakaian energi pengeringan beku ini, penelitian ini juga menentukan laju pembekuan dan pengeringannya. Laju pembekuan dan pengeringan ini ditunjukkan dengan tabel 5.

Dari hasil percobaan ini didapatkan laju pengeringan PBPVpb mempunyai harga yang hampir sama dengan PBLs sehingga dilihat dari laju pengeringannya pun PBPVpb dapat bersaing dengan pengeringan beku PBLs. Hal ini lebih menguatkan lagi bahwa PBPVpb dapat menggantikan metoda pengeringan beku PBLs karena selain pemakaian energinya yang lebih rendah, laju pengeringannya juga cukup baik dibandingkan dengan PBLs. Disisi lain, laju pembekuan PBPVpb tidak sebaik laju pembekuan PBPV. Ini dapat terjadi karena dengan metoda PBPVpb isolasi bagian bawah wadah sampel dibuka sehingga efek pendinginan dapat kembali mengalir keluar dari bagian bawah wadah sampel yang akhirnya menyebabkan lebih lambatnya laju pembekuan ini. Meskipun demikian laju pembekuan PBPVpb sebesar 3.16 cm/jam masih termasuk dalam kategori pembekuan cepat. Kadar air akhir lidah buaya berkisar antara 3 – 5% dan kadar air awalnya 95%.

KESIMPULAN

1. Pengereng beku yang dibuat dapat beroperasi pada kisaran tekanan kerja 0.5 dan 1 torr. Kemampuan pembekuan lidah buaya sampai suhu -15°C .
2. Pengerengan beku pembekuan vakum, PBPV, menggunakan energi yang lebih sedikit (90.9%) dari pada pengerengan beku pembekuan lempeng sentuh, PBLs. PBPV dengan tambahan pemanasan bawah, PBPVpb, bahkan menggunakan energi lebih sedikit lagi (90.6%) dari PBLs.
3. PBPV mempunyai kelemahan dalam hal waktu pengerengan yang lama (133%) dari waktu pengerengan PBLs tetapi kelemahan ini diperbaiki dengan digunakannya tambahan pemanas bawah, PBPVpb. Waktu pengerengan PBPVpb adalah 129% dari waktu pengerengan PBLs.
4. PBPVpb dapat dijadikan alternatif metoda pengerengan beku karena energi pengerengan dan waktu pengerengannya dapat bersaing dengan PBLs sebagai salah satu metoda pengerengan beku konvensional.
5. Pengereng beku ini dapat mengeringkan lidah buaya dari kadar air awal 95% menjadi kadar air akhir 3-5% dengan waktu pengerengan antara 20 – 29 Jam.

NOTASI

A	Luas permukaan [m^2]
d	Diameter [m]
dt	derajat kenaikan suhu [$^{\circ}\text{C}$]
F	Gaya [N]
l	Panjang [m]
n	Faktor keamanan
t	Tebal [m]
Δp	Beda tekanan [Pa]
σ	Tegangan bahan [N/m^2]

subskrip

atm	Atmosfir
dp	Dinding pembeku
i	Ijin
pp	Pintu pengereng
ult	Ultimate
v	Vakum
y	Yield (mulur)

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.

DAFTAR PUSTAKA

- Cheng J., Z. R. Yang, H.Q. Chen, Analytical solutions for the moving interface problem in freeze drying with or without back heating. *Drying Technol. J.*, Vol.20, 2002.
- De De Garmo P, 1984. *Materials and Process in Manufacturing*, 6th edition, Collier Mac Millan Publisher. pages. 206-206
- Gere JM, Timoshenko SP, 1987. *Mechanics of Materials*, 2nd edition, Van Nostrand Reinhold (UK) Co Ltd, . pages. 29-31
- Heldman, D.R. dan R.P. Singh. 1981. *Food Process Engineering*. AVI Publishing Company Inc. United State of America.
- Liapis A.I., R. Bruttini, Freeze drying, Di dalam: Mujumdar AS, Editor. *Handbook of industrial drying*, Vol.1, 1995.
- Siregar, K., 2004. Kajian pengerengan beku dengan pembekuan vakum dan pemanasan terbalik untuk daging buah durian, Tesis, Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor.

- Sutanto YN.,2004. Konsumsi energi radiasi pada proses pengeringan beku berbagai bahan biologik, skripsi, Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor.
- Tambunan AH, 2000, Faktor-faktor yang mempengaruhi laju pembekuan vakum bahan pangan cair, Buletin Keteknikan Pert., Vol 14, pages. 201-209.
- Zainuddin, I.,2003. Rancang bangun peralatan dan analisis karakteristik pengeringan vakum udang windu, Tesis, Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor.