SIMULASI KARAKTERISTIK PENGERINGAN BEKU DAGING SAPI GILING

(Simulation Study on Freeze-drying Characteristics of Mashed Beef)

Armansyah H. Tambunan[1], M.Solahudin[1], Estri Rahajeng[2]

ABSTRACT

Drying characteristic of a particular product is important in analyzing the appropriateness of the drying method for the product. This is especially important for freeze drying, which is known as the most expensive drying method, aside from its good drying quality. The objectives of this experiment are to develop a computer simulation program using a retreating drying-front model for predicting freeze drying characteristics of mashed meat, especially for the influence of sublimation temperature and thermal conductivity.

In this work, a quasi steady state analysis was used to describe the heat and mass transfer and movement of the sublimation front during the secondary drying period.. A mathematical model was used in a simulation to determine changes in water fraction, thickness of dried layer and temperature distribution in the dried zone. Verification of the model indicated the appropriateness of the model to predict freeze drying characteristics.

Keywords: freeze drying, mashed meat, computer simulation, retreating front model

PENDAHULUAN

Pengeringan beku dikenal dengan keunggulan mutu hasil pengeringannya. Akan tetapi biaya modal dan biaya operasi yang tinggi menyebabkan metoda pengeringan ini hanya digunakan untuk produk-produk bernilai ekonomi tinggi. Disamping itu, kesalahan pemilihan metoda pengeringan dan kondisi operasinya dapat memberi mengakibatkan kerugian bahkan kerusakan bahan yang dikeringkan.

Untuk menghindari kerugian besar, akibat kesalahan dalam penerapan dan pengoperasian, perlu dilakukan penelaahan rinci terhadap karakteristik pengeringan beku suatu produk tertentu. Penelaahan secara eksperimental (percobaan) memerlukan biaya tinggi dan waktu yang cukup lama, disamping tidak praktis untuk dilakukan oleh para perekayasa di industri. Untuk itu, perlu dikembangkan model yang dapat digunakan untuk mensimulasi dan menggambarkan secara tepat karakteristik pengeringan beku.

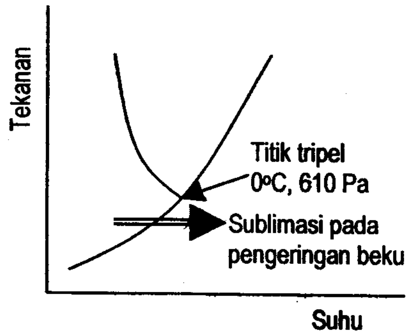
[1] Staf Pengajar Jurusan Teknik Pertanian, FATETA, IPB
[2] Alumnus Jurusan Teknik Pertanian, Fatete, IPB

Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan dan mengembangkan model permukaan bergerak (*retreating front*) pada proses simulasi karakteristik pengeringan beku daging sapi giling.

PENDEKATAN TEORI

A. Mekanisma Pengeringan Beku

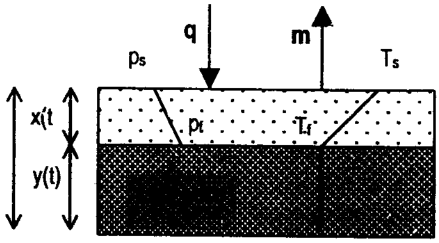
Pengeringan beku merupakan suatu metode pengeringan yang umumnya terdiri atas tiga tahapan, yaitu pembekuan, pengeringan primer dan pengeringan sekunder. Air dalam produk dibekukan, dan selanjutnya dilepaskan dengan cara sublimasi pada ruang bertekanan rendah (vakum). Proses sublimasi terjadi pada suhu dan tekanan **dibawah** titik triple, yaitu suhu 0°C dan tekanan 610 Pa (Gambar 1). Kebutuhan panas sublimasi adalah sebesar 2.78 kilo joule per gram es.



Gambar 1. Diagram P-T air

B. Model Permukaan Bergerak (*Retreating Front Model*)

Mekanisma pindah panas dan massa di dalam bahan selama proses sublimasi ditunjukkan pada Gambar 2. Model yang ditunjukkan pada gambar tersebut dapat disebut sebagai Model Permukaan Bergerak (*retreating front model*). Dalam hal ini, permukaan sublimasi dianggap bergerak lapis demi lapis dari permukaan terluar hingga pusat bahan. Permukaan sublimasi ini akan membatasi secara tegas lapisan kering (di bagian luar) dari lapisan beku (di bagian dalam) bahan. Model pada Gambar 2 adalah untuk bahan berbentuk lempeng tak hingga dengan perpindahan panas dan massa satu arah.



Gambar 2. *Retreating Front Model* pada proses pengeringan beku

Asumsi yang digunakan pada model ini adalah:

- Permukaan sublimasi menurun seragam dari permukaan atas menuju pusat bahan.
- Pengeringan berlangsung dalam kondisi tunak semu (*quasi steady state*). Perubahan suhu dan tekanan dalam bahan dan pergerakan permukaan sublimasi dapat diabaikan.
- Distribusi suhu dan tekanan sepanjang lapisan kering dianggap linier, sedangkan suhu lapisan beku dianggap seragam dan sama dengan suhu permukaan sublimasi.

Persamaan kendali yang dapat menggambarkan mekanisma pindah panas dan massa pada model diatas adalah seperti berikut:

$$q = \frac{\lambda}{x(t)}(T_s - T_f) - m\int_{T_f}^{T_s} c_p dT \qquad (1)$$

Panas jenis bahan (c_p) dianggap tetap dan sebanding dengan kadar air bahan. Bagian pertama dari persamaan (1) menunjukkan besarnya panas yang dikonduksikan melalui lapisan kering, dan bagian kedua menunjukkan besarnya panas yang diserap oleh lapisan kering bahan.

Laju sublimasi (m) dikendalikan oleh perbedaan antara tekanan uap di permukaan bahan kering dengan tekanan uap pada permukaan bahan beku (permukaan sublimasi), seperti pada persamaan (2). Besarnya panas yang diperlukan untuk sublimasi (q_s) adalah perkalian antara laju sublimasi dengan panas laten sublimasi.

$$m = \frac{KM_w}{RT_f x(t)}\left(p_f - p_s\right) \qquad (2)$$

Laju sublimasi dapat dihubungkan dengan pengeringan, sebagai berikut:

$$m = -\rho_w L \frac{dX}{dt} \qquad (3)$$

Tekanan keseimbangan uap air dengan es dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\log p_f = \frac{-2445.6}{T_f} + 8.231\log T_f - 0.01677T_f + 1.205\times10^{-5}T_f^2 - 6.757 \qquad (4)$$

C. Pemecahan Model

Pemecahan persamaan pada model tersebut dilakukan dengan mengintegrasi persamaan (1), sehingga diperoleh:

$$\lambda\left(T_s - T_f\right) = (1 - X)\rho_w L^2\left(-\frac{dX}{dt}\right)\left(\Delta H + \int_{T_f}^{T_s} c_p dT\right) \qquad (5)$$

dimana X adalah fraksi air tersisa, yang dapat didekati dengan persamaan berikut:

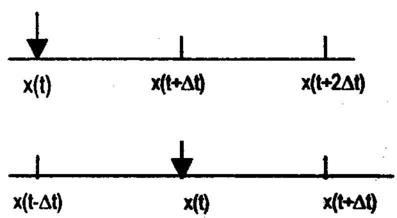
$$X = \frac{m_f}{m_0 - m_d} \qquad (6)$$

Berdasarkan fraksi air tersisa tersebut, dapat ditentukan laju pergerakan lapisan kering sebagai berikut:

$$x(t) = (1 - X)L \qquad (7)$$

Pemecahan persamaan (5) menghasilkan persamaan kuadrat, yang akar-akar nyatanya merupakan fraksi air tersisa.

Laju pengeringan dapat dinyatakan dalam bentuk laju pergerakan lapisan kering per satuan waktu. Penentuan laju pengeringan dilakukan dengan cara interpolasi data secara numerik (Gambar 3), sehingga diperoleh persamaan untuk laju pergerakan lapisan kering seperti pada persamaan (8a) dan (8b) masing-masing untuk kondisi awal/akhir dan selainnya.



Gambar 3. Interpolasi penentuan laju pergerakan lapisan kering pad kondisi awal/akhir dan selainnya

$$m \cong \frac{dx(t)}{dt}$$
$$= \frac{[3x(t) + x(t-2\Delta t) \pm 4x(t-\Delta t)]}{2\Delta t} \quad (8a)$$

dan

$$m \cong \frac{dx(t)}{dt} = \frac{[x(t+\Delta t) - x(t-\Delta t)]}{2\Delta t} \quad (8b)$$

Pendugaan sebaran suhu bahan *T(s)* dilakukan dengan menentukan posisi relatif lapisan kering (l_b) dan lapisan beku (l_f) terhadap tebal awal bahan, pada kisaran tertentu (s) berdasarkan persamaan berikut (Lombrana dan Izkara, 1996):

$$l_b = (L - s)/L$$
$$l_f = [1 - x(t)]/L \quad (9)$$

yang menghasilkan faktor suhu,

$$T_a^* = (1 - l_b)/(1 - l_f) \quad (10)$$

sehingga,

$$T(s) = [T_a^*(T_f - T_s) + T_s] - 273 \quad (11)$$

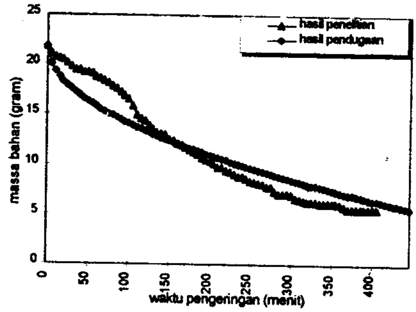
HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Validasi Model

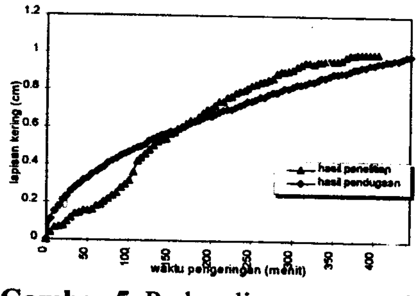
Validasi model dilakukan dengan membandingkan data hasil pengukuran (Widodo, 1996) dengan hasil simulasi pada kondisi yang sama. Data masukan yang digunakan pada simulasi adalah sebagai berikut:

- Ketebalan awal bahan (L) = 10 mm
- Diameter bahan (D) = 53 mm
- Selang waktu (dt) = 5 menit
- Nilai konduktivitas panas bahan kering (λ)= 0.0686 W/m°K
- Nilai permeabilitas bahan kering (K) =0.00755 J/kg
- Massa awal bahan (M_o) = 0.02173 kg
- Massa akhir bahan (M_s) = 0.00543 kg
- Tekanan kerja (P_s) = 1.33 Pa
- Suhu kendali permukaan (T_s) = 40°C
- Suhu lapisan beku (T_f) = -19°C

Data masukan yang divariasikan dalam simulasi adalah, suhu permukaan sublimasi (T_s), dan nilai konduktivitas panas lapisan kering bahan (λ). Gambar 4 dan Gambar 5 masing-masing menunjukkan perbandingan massa bahan dan pergerakan lapisan kering antara hasil pengukuran (Widodo, 1996) dengan hasil pendugaan melalui proses simulasi.



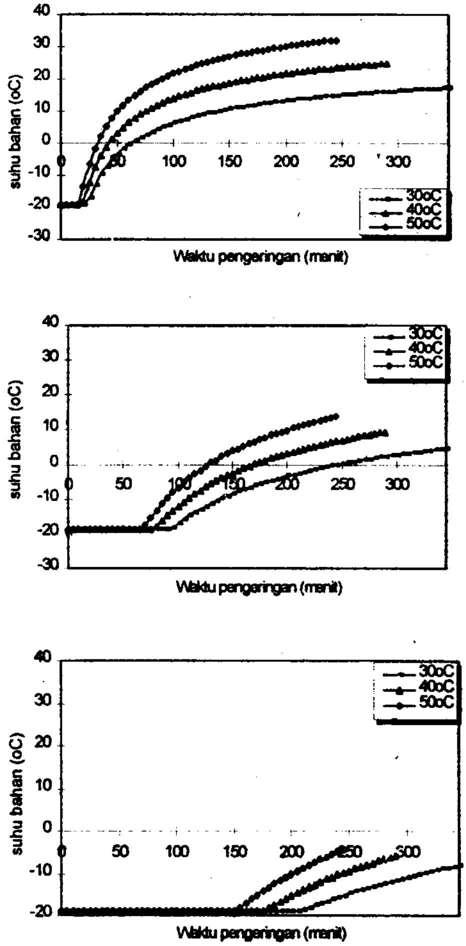
Gambar 4. Perbandingan massa bahan antara hasil pengukuran dengan hasil pendugaan



Gambar 5. Perbandingan pergerakan lapisan kering bahan antara hasil pengukuran dengan hasil pendugaan

Penurunan massa hasil simulasi menunjukkan kecenderungan yang sama dengan *korelasi pearson* sebesar 96,8%, yang menunjukkan keeratan hubungan antara hasil pengukuran dengan pendugaan. Koefisien determinasi yang diperoleh adalah sebesar 97,2% yang menunjukkan kemampuan model dalam meramal dan menduga keadaan sesungguhnya (hasil pengukuran).

Pembandingan yang sama terhadap suhu permukaan, suhu bagian tengah dan suhu bagian bawah bahan masing-masing menunjukkan *korelasi pearson* sebesar 85,2%, 96,8% dan 95,4%, serta koefisien determinasi sebesar 75,8%, 97,2% dan 91,0%. Berdasarkan pendekatan statistik tersebut, dapat disimpulkan bahwa model tersebut menghasilkan keeratan hubungan pada kisaran 85,2% hingga 96,8%, dan dapat digunakan untuk menduga keadaan sesungguhnya dengan ketepatan pada kisaran 75,8% hingga 97,2%.



Gambar 6. Simulasi pergerakan suhu bahan (berturut-turut dari atas ke bawah: suhu bagian atas, tengah dan bawah) dengan suhu permukaan terkendali pada 30°C, 40°C dan 50°C.

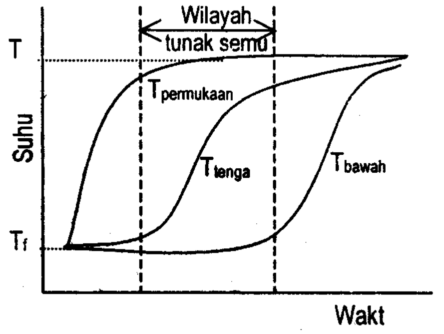
B. KARAKTERISTIK PENGERINGAN BEKU DAGING SAPI GILING

Karakteristik pengeringan beku dapat dinyatakan dalam bentuk profil suhu dan laju pengeringan selama proses.

1. Profil Suhu Bahan

Pada Gambar 6 ditunjukkan hasil simulasi suhu bahan pada tiga lokasi (permukaan, tengah dan bawah) selama proses pengeringan beku dengan suhu permukaan terkendali pada 30, 40 dan 50° C. Gambar tersebut memperlihatkan bahwa jika suhu permukaan dikendalikan pada 30°C kenaikan suhu bahan cenderung lebih lambat daripada jika dikendalikan pada 40°C dan 50°C. Sebagai akibatnya, waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan proses pengeringan lebih panjang. Pada saat suhu tengah bahan mencapai 0°C, suhu permukaan bahan telah mencapai kondisi mantap semu, yang dapat dianggap sebagai salah satu parameter keberhasilan pengeringan.

Proses sublimasi pada pengeringan beku sesungguhnya berlangsung pada kondisi tak-mantap (*unsteady state*). Akan tetapi pada selang tertentu, kondisi tersebut dapat dianggap sebagai aliran mantap semu (*quasi-steady state*), yaitu sejak tercapainya suhu permukaan terkendali hingga periode pengeringan primer berakhir. Tipologi profil suhu bahan



Gambar 7. Tipologi profil suhu pada proses pengeringan beku

selama pengeringan beku ditunjukkan pada Gambar 7, yang sekaligus menggambarkan terjadinya pergeseran front sublimasi dari permukaan ke pusat bahan.

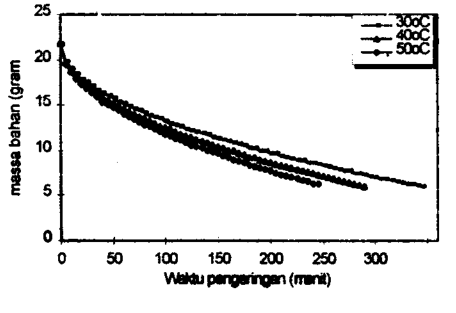
Hasil simulasi dengan peubah nilai konduktivitas (antara 0,0686 hingga 0,1000 W/m.K) menunjukkan adanya hubungan yang erat antara konduktivitas panas bahan dengan waktu pengeringan. Waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan proses pengeringan bahan bernilai konduktivitas lebih tinggi adalah lebih pendek daripada sebaliknya. Atau dengan kata lain, nilai konduktivitas panas pada lapisan kering bahan berbanding terbalik terhadap waktu pengeringan.

Nilai konduktivitas panas menunjukkan laju perambatan panas melalui lapisan kering berpori pada bahan dari bagian luar ke front sublimasi. Panas tersebut selanjutnya digunakan untuk proses sublimasi, sehingga juga mempengaruhi laju sublimasi. Dari hasil penelitian sebelumnya, diketahui bahwa nilai konduktivitas panas lapisan kering berpori bahan selama pengeringan beku juga dipengaruhi oleh tekanan kerja pada ruang pengeringan. Dengan demikian, pengendalian laju pengeringan dapat juga dilakukan dengan mengendalikan tekanan dalam ruang pengering.

2. Laju pengeringan

Pada penelitian ini, laju pengeringan dinyatakan dalam tiga terminology, yaitu laju penurunan massa, laju penurunan kadar air dan laju pergerakan lapisan kering.

Gambar 8 menunjukkan laju penurunan massa bahan berdasarkan ketiga perlakuan suhu permukaan. Penurunan massa bahan pada suhu permukaan sublimasi 50°C cenderung lebih cepat karena beda suhu antara permukaan lapisan kering dan permukaan sublimasi semakin besar, sehingga laju perpindahan panas yang



Gambar 8. Grafik penurunan massa bahan pada suhu sublimasi 30°C, 40°C dan 50°C

diperlukan untuk sublimasi lebih besar.

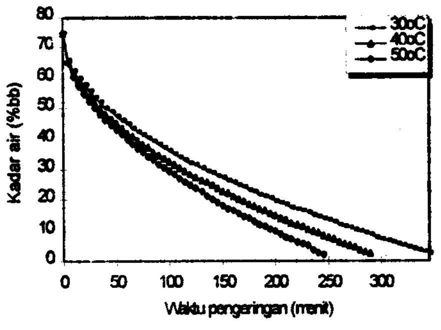
Uap air yang dihasilkan oleh proses sublimasi selanjutnya dikeluarkan dari bahan dengan cara permeasi melalui lapisan berpori. Disamping dipengaruhi oleh laju sublimasi, penurunan kadar air juga dipengaruhi oleh laju permeasi tersebut yang ditunjukkan dengan nilai permeabilitas uap air dalam bahan kering.

Pada pengeringan beku, peristiwa sublimasi dapat diikuti oleh peristiwa ablimasi secara simultan. Ablimasi adalah peristiwa perubahan uap air menjadi es karena udara lingkungan lebih jenuh daripada permukaan sublimasi. Peristiwa ablimasi terjadi karena uap air hasil sublimasi tidak segera dikeluarkan dari lapisan kering untuk dikondensasikan pada permukaan perangkap dingin. Peristiwa ini dapat menyebabkan terjadinya proses rekristalisasi yang diketahui akan mempengaruhi mutu hasil pengeringan.

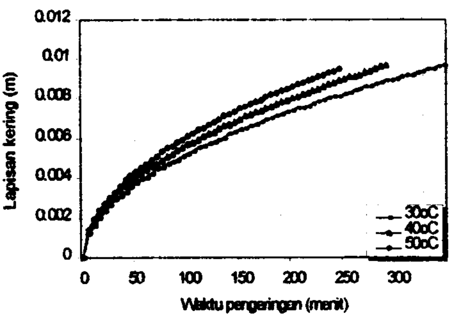
Sejalan dengan penurunan massa, bahan mengalami penurunan kadar air seperti ditunjukkan pada Gambar 9. Gambar tersebut memperlihatkan bahwa waktu yang diperlukan untuk menurunkan kadar air bahan hingga kisaran 2 persen sampai 5 persen, yang merupakan kisaran kadar air akhir bahan yang diharapkan dari proses pengeringan beku, berbanding terbalik dengan suhu permukaan terkendali yang dipergunakan. Suhu permukaan kendali tampak berpengaruh terhadap kelandaian lengkungan kadar air pada tahap akhir pengeringan.

Pergerakan lapisan kering berbanding lurus dengan fraksi air tersisa bahan atau berbanding terbalik dengan kadar air bahan (Gambar 10). Pergerakan lapisan kering pada suhu permukaan kendali 50°C, berlangsung lebih cepat dibandingkan dengan suhu kendali lainnya, sehingga waktu yang diperlukan untuk mengeringkan seluruh bahan lebih cepat.

Gambar 10 menunjukkan bahwa untuk mencapai ketebalan lapisan kering setengah dari ketebalan seluruh bahan diperlukan waktu pengeringan yang lebih singkat dibandingkan waktu yang



Gambar 9. Grafik penurunan kadar air bahan pada suhu sublimasi 30°C, 40°C dan 50°C



Gambar 10. Pergerakan lapisan kering bahan pada suhu sublimasi 30°C, 40°C dan 50°C

diperlukan untuk mencapai ketebalan lapisan kering berikutnya hingga seluruh bahan menjadi kering.

Sebagaimana diperkirakan sebelumnya, pengaruh nilai konduktivitas panas menunjukkan kecenderungan yang sama dengan perlakukan suhu permukaan. Peningkatan laju pengeringan dengan meningkatnya konduktivitas panas. Pada tahap awal pengeringan hingga proses pengeringan berlangsung setengahnya, gradien penurunan massa bahan cenderung tajam dan selanjutnya berlangsung landai hingga akhir pengeringan.

Hasil simulasi pengaruh nilai konduktivitas panas lapisan kering bahan terhadap laju pengeringan tidak menunjukkan perbedaan yang cukup nyata. Hal ini perlu mendapat kajian lebih lanjut, karena secara teoritis nilai konduktivitas yang tinggi dapat memberikan laju pengeringan yang tinggi pula

KESIMPULAN DAN SARAN

1. Berdasarkan pendekatan statistik, model yang dikembangkan pada penelitian ini dapat dianggap valid dengan koefisien korelasi antara 85,2 persen hingga 96,8 persen dan koefisien determinasi antara 75,8 persen hingga 97,2 persen.
2. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan suhu kendali permukaan dapat meningkatkan laju pengeringan. Sedangkan, konduktivitas panas, mesikipun menunjukkan kecenderungan yang sama belum menampakkan pengaruh yang nyata pada kisaran nilai 0,0686 – 0,1000 W/m°K.

DAFTAR PUSTAKA

Cotson, S dan D. B. Smith. 1963. Freeze Drying of Foodstuffs. Columbine Press, Ltd., Manchester.

King, C. J. 1971. Freeze Drying Of Food. CRC, The Chemical Rubber Co., Cleveland-Ohio

Lombrana dan J. Izkara. 1996. Eksperimental Estimation Of Effective Transpor Coefficients In Freeze Drying For Simulation And Optimization Purposes. J. Drying Technol, 14(3&4), 743-763

Widodo, M., Tambunan, A.H., 1996. Penentuan Nilai Konduktivitas Panas Dan Permeabilitas Uap Air Pada Lapisan Kering Daging Sapi Giling Selama Proses Pengeringan Beku Bul. Teknik Pertanian Vol. 10 (20), 52-60.

Sagara, Y. 1984. Freeze Drying Characteristics and Transport Properties in Concentrated Coffea Solution System. Proceedings of 4th International Drying Symposium, 2, 443-450