

Simulasi Perpindahan Panas pada Fase Pengeringan Primer *Freeze Drying* Menggunakan *Finite Element Method*

Marati Husna^{1,a)}, dan Acep Purqon^{2,b)}

¹Kelompok Keilmuan Fisika Bumi dan Sistem Kompleks,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

^{a)} maratihusna@gmail.com (corresponding author)

^{b)} acep@fi.itb.ac.id

Abstrak

Hasil produk pertanian Indonesia sangat berlimpah, namun salah satu kendala besarnya adalah proses pengawetan. Salah satu jenis pengawetan adalah dengan teknologi pengeringan beku. Teknologi pengeringan beku ini sangat berperan penting tidak hanya pada jenis produk olahan namun juga pada pengembangan dan produksi berbagai jenis produk inovatif lainnya seperti vaksin, enzim, dan ekspedisi luar angkasa. Secara industri, teknik pengeringan beku memerlukan peralatan yang modern sehingga biaya operasionalnya mahal. Metode pengeringan beku merupakan proses sublimasi yang meliputi pembekuan, pengeringan primer, dan pengeringan sekunder. Agar efisien, proses yang sangat penting untuk dikontrol adalah pengeringan primer. Optimasi proses pengeringan primer ada pada penentuan suhu permukaan produk, tekanan ruang dan waktu pengeringan primer. Analisa tersebut dilakukan dengan model simulasi proses sublimasi menggunakan persamaan perpindahan panas dan massa yang diselesaikan dengan metode elemen hingga. Dari model matematik yang dikembangkan, dapat diprediksi profil temperature, tekanan, dan proses sublimasi serta kebutuhan energi dari proses pengeringan beku. Sehingga, didapatkan waktu pengeringan primer yang optimal yang berperan penting untuk menaikkan efisiensi pada proses pengeringan beku secara komersil.

Kata-kata kunci: simulasi, pengeringan beku, sublimasi, persamaan perpindahan panas dan massa, metode elemen hingga

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara agraris yang kaya dengan produk hasil pertaniannya yang melimpah. Hasil pertanian tersebut berupa produk segar yang dapat menjadi produk pangan maupaun papan. Pengolah produk segar menjadi barang konsumtif memerlukan teknik preservasi tertentu yaitu pengeringan. Pengeringan merupakan proses pasca panen yang kerap telah digunakan oleh banyak ahli holtikultura Indonesia. Namun kualitas produk hasil pengeringan masih jauh di bawah rata-rata bila dibandingkan dengan produk kering seperti dari Jepang, Thailand, dan China [1] sehingga sulit bersaing di pasar global. Karenanya dibutuhkan teknik pengeringan yang berkualitas agar dapat dihasilkan produk pengeringan dengan kualitas premium [2]

Freeze drying atau pengeringan beku merupakan terobosan terbaru dalam proses pengeringan yang memanfaatkan sublimasi.[3] Hasil pengeringan dari *freeze drying* tidak mengalami perubahan bentuk, warna, dan rasa serta mudah direhidrasi[4]. Sayangnya *freeze drying* merupakan proses pengeringan yang menelan biaya tinggi disebabkan oleh fase pengeringan primernya yang berlangsung lama. Namun, nilai komersial dari produk yang tinggi merupakan isu yang lebih penting. Karenanya diupayakan cara agar waktu pengeringan primer *freeze drying* dapat berlangsung secara efisien untuk meminimalisasi biaya proses.[5,6,7]

Kontrol dari suhu dan kadar air produk merupakan hal kritis pada kualitas produk yang diawetkan. Normalnya, sulit untuk memonitor suhu dan kadar air produk secara langsung selama proses freeze drying. Di sisi lain, suhu dan tekanan ruang *freeze drying* digunakan untuk mengontrol perpindahan panas dan massa sehingga dapat diperoleh profil suhu dan kadar air terhadap waktu yang optimum. Secara praktiknya, suhu dan tekanan ruang *freeze drying* yang sesuai ditentukan oleh pendekatan secara eksperimen yang berkelanjutan. Secara teori, pemodelan yang bersifat memprediksi memiliki potensi untuk menjadi dasar dari studi eksperimental agar lebih efisien. [8,9,10] Model yang dikembangkan dapat diselesaikan dengan metode elemen hingga atau *finite element method* (FEM) mengenai persamaan differensial parsial yang digunakan serta analisa produk *freeze drying* sendiri yang lebih mudah bila dibagi tiap elemen [11,12].

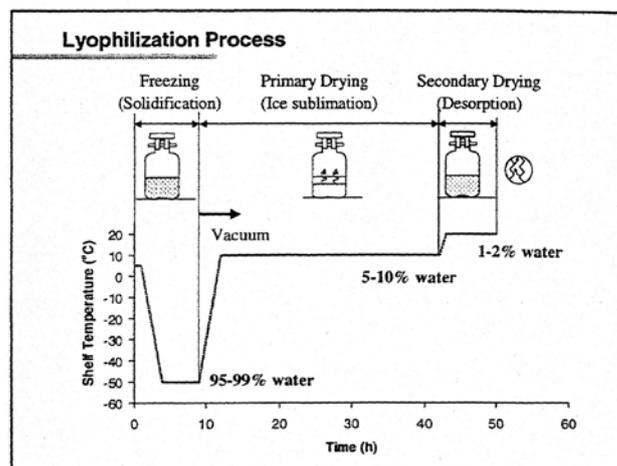
Karenanya, tujuan makalah ini adalah membuat model pengeringan primer serta menyelesaikannya untuk mendapatkan distribusi suhu dan kadar air produk hasil pengeringan. Profil suhu dan kadar air tersebut dapat menjadi acuan untuk meminimalisir waktu pengeringan primer sehingga *freeze drying* dapat berlangsung secara efisien.

FREEZE DRYING

Pengeringan beku atau yang dikenal dengan istilah lyophilisasi merupakan proses pengeringan yang memanfaatkan teknis sublimasi atau perubahan fasa dari beku menjadi. Perubahan fasa yang demikian dapat terjadi pada tekanan rendah dan suhu rendah (Gambar). Metode yang demikian mengakibatkan kandungan uap air dari produk dapat dikontrol selama proses, bahkan produk dapat dikembalikan seperti keadaan sebelum dikeringkan [13]. Karenanya, produk hasil pengeringan beku merupakan produk kering kualitas premium. Di mana produk tersebut tidak kehilangan rasa, warna, maupun bentuknya. Selain itu, produk hasil pengeringan beku memiliki nilai rehidrasi yang tinggi yang menyebabkan banyak industri hasil pertanian memanfaatkan pengeringan beku untuk preservasi produk makanan instan.

Tahapan Freeze Drying

Freeze drying terdiri dari tiga tahap, yaitu tahap pembekuan, pengeringan primer dan pengeringan sekunder. Gambar 1 menunjukkan keadaan produk selama tiga tahapan *freeze drying*. Saat tahap pembekuan, produk segar masih memiliki kadar air hingga 90-95%. Saat tahap pengeringan primer, kadar air tersebut turun hingga 5-10%. Selanjutnya saat pengeringan sekunder, produk kering telah berhasil diproduksi dengan kadar air mencapai 1-2% saja.



Gambar 1. Tahapan *Freeze Drying* (Khalloufi, 2004)

Secara detail, penjelasan tahap-tahap tersebut adalah sebagai berikut. Proses pembekuan pada *freeze drying* terjadi secara vakum, di mana proses penurunan tekanan akan diikuti dengan adanya evaporasi uap air dari permukaan produk. Panas laten evaporasi akan membutuhkan energi yang besar sehingga akan menyebabkan turunnya temperatur pada produk. Pembekuan yang terjadi diharapkan tidak menyebabkan kerusakan sel dan struktur produk akibat pembentukan kristal es. Mekanisme pembekuan dalam *freeze drying* dapat dikontrol dengan menghentikan tekanan dan temperatur yang telah ditentukan (kondisi tekanan masih di atas tekanan triple point dari air). Secara keseluruhan, proses pembekuan pada pengeringan beku membekukan bagian yang cair dari produk serta memastikan struktur produk telah siap untuk dikeringkan. Proses selanjutnya adalah pengeringan primer. Di sinilah proses sublimasi terjadi. Sublimasi menyebabkan bagian cair pada produk yang membeku berubah secara langsung menjadi gas. Selama pengeringan primer,

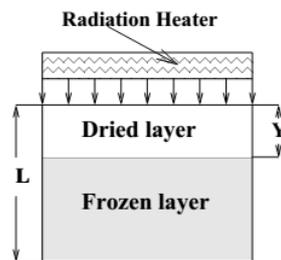
tekanan diturunkan sampai kurang dari 1 Torr dan temperatur ruang *freeze drying* dinaikkan agar terjadi sublimasi.[5] Pengeringan primer membutuhkan waktu yang lama dalam prosesnya sehingga biaya proses pengeringan primer ini sendiri menjadi sangat mahal. Proses selanjutnya adalah pengeringan sekunder. Lanjutan dari pengeringan primer ini ditujukan untuk menguransi sisa kadar air hingga mendekati nilai kadar air yang diinginkan. Namun kenyataannya, banyak dari air yang diserap telah dihilangkan dalam proses pengeringan primer.

Pengeringan Primer

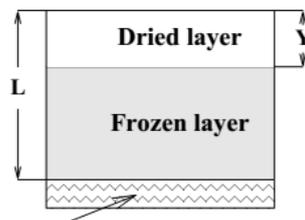
Pengeringan primer adalah proses menghilangkan air dari larutan beku yang terkandung dalam produk yang akan dikeringkan melalui proses sublimasi. Proses ini lebih mudah dikontrol daripada proses pembekuan itu sendiri. Selama waktu pengeringan primer, 90 % air sudah membeku dan panas yang dialirkan ke es disesuaikan dengan panas yang diserap saat proses sublimasi pada suhu yang sudah ditentukan. Terdapat dua keadaan yang terjadi saat pengeringan primer yaitu perpindahan panas dari shelf ke bagian depan es dari sampel yang beku serta perpindahan massa uap air ke kondenser. Perpindahan panas berhubungan dengan kenaikan suhu sedangkan perpindahan massa berhubungan dengan penurunan tekanan ruang (*chamber freeze drier*). Dua keadaan tersebut harus seimbang untuk memastikan produk beku tetap dalam kondisi rigid selama proses sublimasi berlangsung.

MODEL PERSAMAAN

Dalam makalah ini, ditinjau model persamaan yang telah dikembangkan dari penelitian sebelumnya [3]. Saat pengeringan primer berlangsung, produk terdiri dari lapisan kering dan lapisan beku (Gambar 2). Dalam gambar tersebut, terdapat 2 sumber panas *freeze drier* yaitu pelat atas dan pelat bawah. Sehingga, ada dua persamaan perpindahan panas dan massa yang mewakili dua kasus tersebut. Pada Gambar, perpindahan panas terjadi secara radiasi dan dideskripsikan dengan persamaan (1). Sedangkan pada Gambar, perpindahan panas terjadi secara konduksi dan dideskripsikan dengan persamaan (2).



Gambar 2. Pemanasan dengan radiasi [10]



Gambar 3. Pemanasan dengan konduksi [10]

$$\frac{T_r - T_{sub}}{\frac{1}{h_r} + \frac{Y}{k_{cr}}} = \lambda \frac{P_{sub} - P_c}{\frac{1}{k_m} + \frac{Y}{\beta_{cr}}} = \rho\tau \frac{dY}{dt} \tag{1}$$

$$\frac{T_r - T_{sub}}{\frac{1}{h_r} + \frac{Y}{k_{cr}}} = \rho\tau \frac{dY}{dt} \tag{2}$$

dengan h_r adalah koefisien perpindahan panas secara radiasi, h_c adalah koefisien perpindahan panas secara konduksi, k_{cr} adalah konduktivitas thermal lapisan kering, k_{ice} adalah konduktivitas thermal lapisan beku, ρ adalah koefisien massa jenis; ϵ adalah kadar air, λ adalah laten dari sublimasi es, β_{cr} adalah permeabilitas lapisan kering, k_m adalah koefisien eksternal perpindahan massa dan d adalah dimensi spasial dari sampel yang digunakan.

Perpindahan panas dan massa secara keseluruhan dapat dideskripsikan dengan persamaan differensial parsial tipe parabolik sebagai berikut.

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \Gamma T + f(x,t,T), x \in \Omega, t > 0 \tag{3}$$

dimana

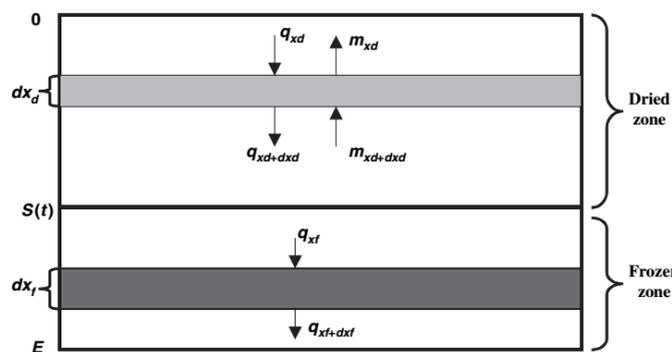
$$\Gamma T = \sum_{i=1}^d \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k(x,t) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \tag{4}$$

Persamaan (4) menjelaskan bahwa perpindahan panas dipengaruhi oleh perubahan suhu yang tidak lepas pula dari pengaruh konduktivitas thermal. Nilai fungsi $f(x,t,T)$ merupakan proses non linear dari perpindahan massa dari molekul-molekul air dari sampel menuju condenser akibat penurunan tekanan di tiap titik, waktu, dan pada skala suhu tertentu. Sehingga didapat persamaan perpindahan panas dan massa 1 dimensi seperti pada persamaan (3).

Model pendekatan lain dilakukan oleh Khalloufi [1]. Dimana proses perpindahan panas pada sampel yang dikeringkan dijabarkan dengan persamaan matematis yang langsung mendeskripsikan kondisi pengeringan primer dengan 2 sumber panas (Gambar 4). Perpindahan panas dan massa pada lapisan kering ditunjukkan oleh persamaan (5). Pada lapisan beku, belum terjadi perpindah massa sehingga proses yang terjadi hanya perpindahan panas seperti yang dideskripsikan pada persamaan (6).

$$\frac{\partial T_d}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varphi_1 \frac{\partial T_d}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varphi_2 \frac{\partial P_v}{\partial x} \right) \tag{5}$$

$$\frac{\partial T_f}{dt} = \frac{\partial T_f}{\partial x} \left(\omega \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) \tag{6}$$



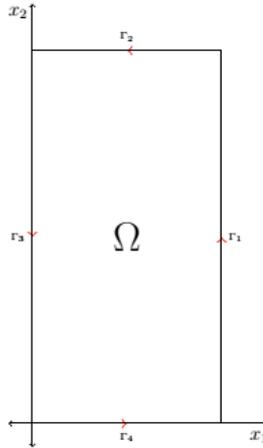
Gambar 4. Produk saat kondisi pengeringan primer [14]

FINITE ELEMENT METHOD

Finite Element Method atau metode elemen hingga adalah metode numerik untuk menyelesaikan sebuah persamaan differensial atau integral. FEM didasari pada ide dalam membangun obyek kompleks atas satuan sederhana atau membagi obyek atas satuan-satuan kecil yang mudah ditangani (Liu, 2003). Analisis metode FEM sangat skematis sehingga dapat dibagi-bagi menjadi kumpulan langkah logis yang dapat diterapkan pada suatu computer digital dan dapat digunakan pada berbagai permasalahan hanya dengan mengganti data input untuk program computer. Penerapan dari metode FEM ini biasanya pada permasalahan struktur, perpindahan panas, dan aliran fluida.

Tahapan FEM adalah sebagai berikut. Yang pertama adalah membuat model persamaan dari permasalahan yang digunakan. Dalam makalah ini, permasalahannya adalah proses pengeringan primer dengan model persamaan perpindahan panas dan massa. Selanjutnya adalah menentukan syarat batas. Kemudian diskritisasi elemen, noda, matriks kekakuan local, matriks kekakuan global hingga menerapkan syarat batas. Yang

terakhir adalah menyelesaikan persamaan pada setiap noda sehingga didapatkan suhu-suhu produk pada setiap noda. Dalam penelitian ini, progress yang telah dilakukan adalah memodelkan pengeringan primer dengan persamaan perpindahan panas. Langkah selanjutnya adalah penerapan syarat batas dan diskritisasi untuk menyelesaikan persamaan tersebut.



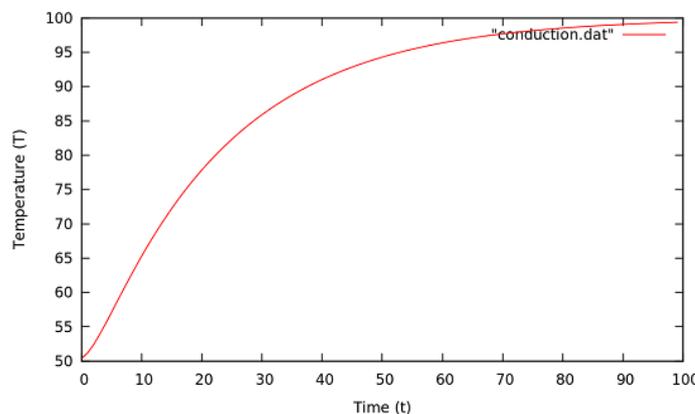
Gambar 5. Model FEM

Program yang nanti akan dibuat adalah perpindahan panas pada benda dua dimensi persegi yang dipanaskan secara konduksi. Simulasi dilakukan dengan *software* FreeFem++ cs. Dalam penelitian ini, model digambarkan seperti pada Gambar 5. Sesuai kondisi dalam pengeringan beku, sumber panas mengenai sisi Γ_1 . Sedangkan sisi Γ lainnya diasumsikan tidak mengalami perpindahan panas sama sekali.

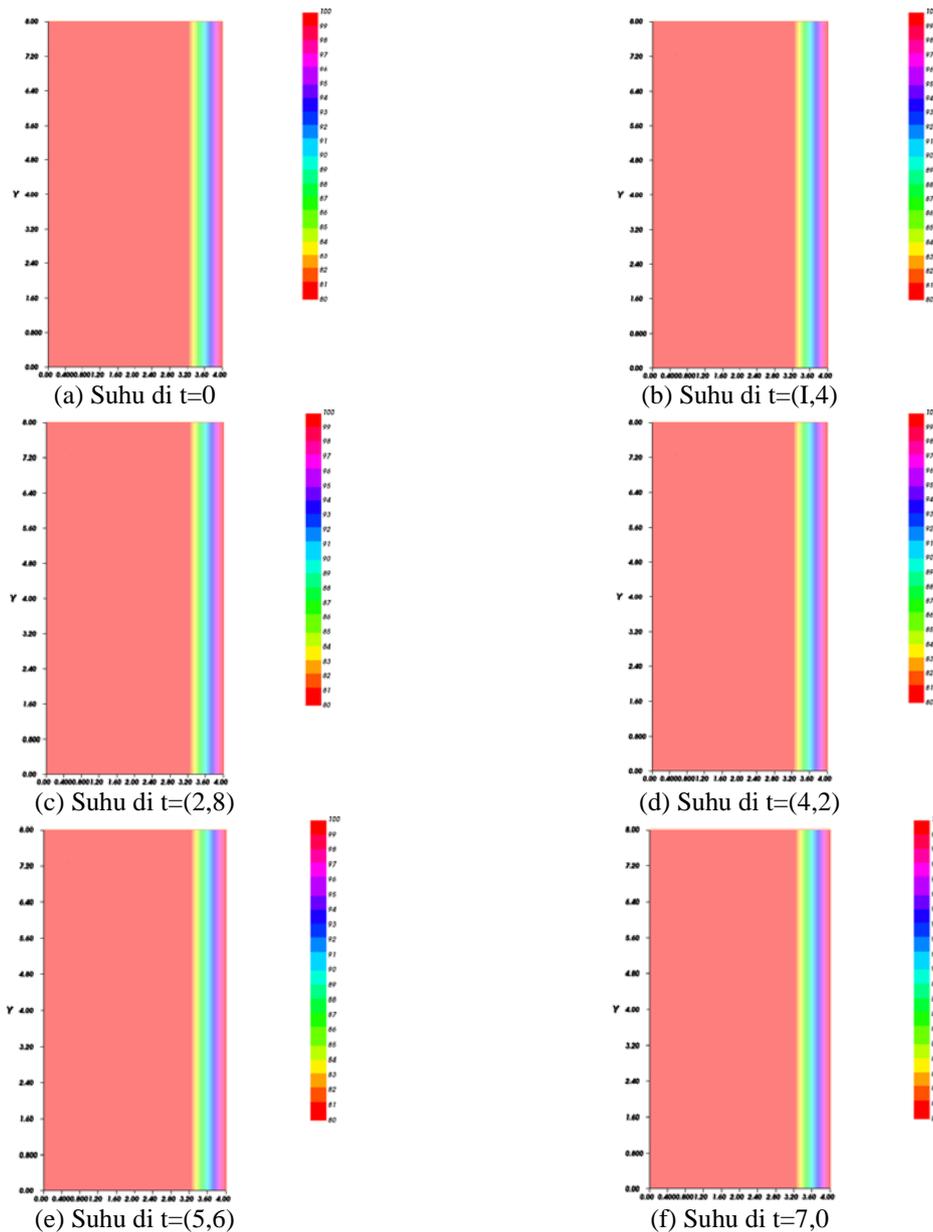
$$\begin{cases} u_t = \Delta u + f(x,t) & \text{di } \Omega \\ u = g(x,t) & \text{di } \Gamma_1 \\ \frac{\partial u}{\partial n} = q(x,t) & \text{di } \Gamma_2 \\ u(x,0) = u_0(x) & \text{di } \Omega \end{cases} \quad (7)$$

$$\int_{\Omega} \frac{u^{k-1}}{\tau} v dx = \int_{\Omega} (\nabla u^k, \nabla v) dx + \int_{\Omega} \frac{u^k}{\tau} v dx \quad (8)$$

Dari Gambar 5, syarat batas nya adalah seperti pada persamaan (7). Setelah disemidiskritisasi terhadap waktu, persamaan 3 menjadi persamaan 8. Persamaan inilah yang akan diselesaikan menggunakan *Finite Element Method*. Sehingga didapatlah data distribusi suhu-suhu selama waktu pengeringan. Data berupa grafik dan gambaran distribusi suhu seperti pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Grafik Data Suhu Selama Pengeringan di titik (3,0,5)



Gambar 6. Distribusi Suhu Selama Waktu Pengeringan

KESIMPULAN

Prose perpindahan panas dan massa pada fase pengeringan primer proses *freeze drying* dapat dimodelkan dengan persamaan differensial parsial 1D. Persamaan differensial parsial tersebut dalam kondisi pengeringan beku lebih mudah diselesaikan menggunakan metode elemen hingga atau *finite element method* (FEM). Parameter utama dari pengeringan primer adalah pengaruh tekanan dan suhu ruang freeze drier serta koefisien perpindahan panas dan massa. Nantinya dapat diasumsikan bahwa bentuk sampel homogen, kapasitas panas, konduktivitas thermal konduksi panas, konduktivitas *thermal* radiasi, massa jenis, dan kalor sublimasi konstan di semua tempat. Sehingga dapat diperoleh profil distribusi suhu erhadap waktu yang memudahkan untuk *monitoring* proses sublimasi dengan lebih efisien. Ke depannya diharapkan pemodelan ini dapat menjadi dasar dari optimasi proses *freeze drying* secara keseluruhan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam penulisan makalah ini. Makalah ini didanai oleh Prodi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Teknologi Bandung 2015.

REFERENSI

1. MELLOR, J.D. 1978. *Fundamentals of Freeze Drying*. Academic Press Inc, London, England.
2. W.J. Mascarenhas, H.U. Akayavby, and M.J. Pikal, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* **148**, 105 – 124 (1997)
3. K. Georgiev, N. Kosturski, I. Lirkov, and S. Margenov. *Proceedings of the International Multiconference on Computer Science and Information Technology*, 493 – 502 (2007)
4. Xiaodong Chen, Vikram Sadineni, MitaMaity, Yong Quan, Matthew Enterline, and Rao. V. Mantri, *AAPS PharmSciTech*
5. MILLMAN, M.J., LIAPIS, I.A. and MARCHELLO, J.M. 1985. An analysis of lyophilization process using a sorption–sublimation model and various operational policies. *Aiche J.* **31**(10), 1594–1604.
6. MUJUMDAR, A.S. 1995. *Handbook of Industrial Drying*, 2nd Ed., Marcel Dekker, Inc., New York, NY. NASTAJ, J. 1991. A mathematical modelling of heat transfer in freeze drying. In *Drying 91* (A.S. Mujumdar and I. Filkova, eds.) pp. 405–413. Elsevier, London.
7. O. Axelsson (1996), *Iterative Solution Methods*, Cambridge University Press.
8. S. Brenner, L. Scott (1994), *The mathematical theory of finite element methods*, *Texts in applied mathematics*, 15, Springer-Verlag.
9. P. Frey, P.-L. George (2000), *Mesh Generation*, Hermes Science.
10. F. Jafar, M. Farid (2003), Analysis of heat and mass transfer in freeze-drying, *Drying Technology* **21**, No. 2, pp. 249–263.
11. I. Gustafsson (1996), An incomplete factorization preconditioning method based on modification of element matrices, *BIT* **36**, No. 1, pp. 86–100.
12. E. Hairer, S. P. Norsett, G. Wanner (2000, 2002), *Solving ordinary differential equations I, II*, Springer Series in Comp. Math.
13. D. Kincaid, W. Cheney (2002), *Numerical Analysis: Mathematics of Scientific Computing*, Thomson Learning.s
14. S. Khalloufi, J. L Robert, dan C. Ratti. *Journal of Food Process Engineering* **28**, 107-132 (2005)