PEMODELAN NUMERIK PENGERINGAN CRUMB RUBBER

(Numerical Modeling of Crumb Rubber Drying)

Adjar Pratoto

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Andalas.

ABSTRACT

The present study is concerned with numerical modeling of drying process of crumb rubber. The modeling is carried out by applying mass and heat balances to a 'thin layer'. The analysis of deep-bed drying is accomplished by thin-layers superposition. The mathematical formulation results in a set of partial differential equations. This set of equations is then solved simultaneously using the finite difference and implicit Euler methods. The results of solid temperature simulation show a good agreement with experimental data found in the literature. A discrepancy reveals in drying kinetics simulation, especially in the first stage of drying.

PENDAHULUAN

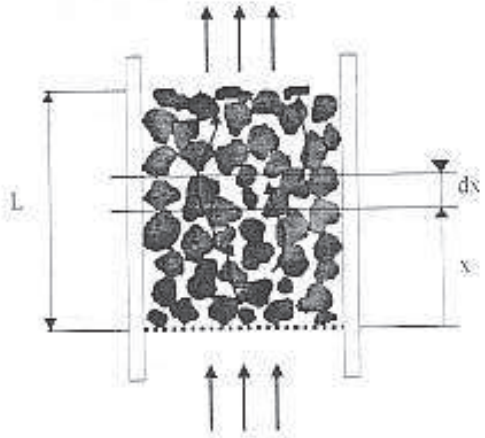
Pengeringan merupakan proses yang sangat rumit untuk dikaji secara teoretik karena melibatkan proses perpindahan panas dan massa secara simultan. Kerumitan tersebut bertambah lagi dengan kenyataan bahwa proses pengeringan sangat dipengaruhi oleh karakter alami produk yang dikeringkan tersebut. Sejauh ini, kajian proses pengeringan lebih banyak dilakukan berdasarkan data empirik. Namun demikian, usaha-usaha untuk memahami secara teoretik proses pengeringan juga dilakukan dalam rangka pemahaman yang lebih baik akan proses, perbaikan mutu produk hasil pengeringan, dan efisiensi penggunaan energi. Berbagai model matematika telah dikembangkan untuk diterapkan dalam simulasi proses pengeringan. Salah satu pemodelan tersebut adalah pendekatan lapisan tipis yang diterapkan

untuk proses pengeringan jenis 'fixed-bed' bagi material granuler (Arnaud & Fohr, 1988; Costa & Figeuiredo, 1993; Brooker, *et al.*, 1974). Pendekatan ini tidak sepenuhnya analitik karena masih memerlukan data empirik pada pernyataan untuk kinetika pengeringan. Pada makalah ini, simulasi numerik proses pengeringan yang didasarkan pada lapisan tipis akan diterapkan untuk crumb rubber. Pemodelan proses pengeringan untuk crumb rubber telah dilakukan, antara lain, oleh Sethu (1981) dan Caromel (1984). Namun model yang disusun merupakan model global dan tidak dapat diterapkan bilamana kondisi pengeringannya berbeda dengan kondisi eksperimental dari mana penurunan model tersebut dilakukan. Naon (1994) telah menyusun model matematik yang didasarkan pada lapisan tipis. Suatu percobaan dilakukan untuk menghimpun data karakteristik pengeringan untuk lapisan tipis. Namun pada pemodelan matematik, perubahan dimensi karet selama pengeringan tidak diperhitungkan. Pada makalah ini, perubahan dimensi tersebut diperhitungkan.

PEMODELAN MATEMATIK

Gambar 1 memperlihatkan skematika perangkat pengering jenis fixed-bed. Butiran-butiran crumb rubber ditempatkan di dalam suatu kotak pengering. Bagian bawah pengering terbuat dari kawat kasa atau plat dengan lubang-lubang kecil untuk melewatkan udara pengering. Kawat kasa atau plat dengan lubang-lubang kecil tersebut berfungsi untuk menumpu butiran crumb rubber. Udara pengering setelah dipanaskan sampai pada suhu tertentu dialirkan dengan suatu blower melewati lubang-lubang tersebut dan selanjutnya melewati celah-celah antar-butiran karet. Adanya sentuhan antara udara pemanas dengan butiran karet menyebabkan terjadinya perpindahan panas dan, akibatnya, suhu butiran karet dan suhu air yang terkandung di dalamnya meningkat. Bila suhu terus meningkat, air yang terkandung akan menguap dan karet akan semakin kering. Udara yang telah mengalami kontak dengan butiran karet dialirkan terus ke atas untuk dibuang atau diresirkulasikan. Dalam praktek, dinding pengering umumnya diisolasi untuk mengurangi kerugian panas.

Pada pemodelan matematik, untuk menyederhanakan persoalan, dikemukakan beberapa anggapan berikut : proses perpindahan panas dan massa berlangsung dalam satu dimensi, sistem adiabatik, dispersi dan konduksi diabaikan, porositas bed (intergranuler) dan porositas intragranuler seragam, dan tidak ada *channeling* pada dinding.



Gambar 1 Skematika pengeringan jenis fixed-bed

Disertai anggapan-anggapan tersebut, neraca massa dan energi dituliskan untuk masing-masing fasa pada elemen diferensial dx. Adapun, neraca untuk fasa cair digabungkan pada neraca untuk fasa padat.

Neraca massa untuk fasa padat,

$$\rho_s' \frac{\partial w}{\partial t} = -R \qquad (1)$$

Neraca massa untuk fasa gas,

$$\rho_s' \left(\frac{\partial Y}{\partial t} + V_s \cdot \nabla Y \right) = -\rho_s' \frac{\partial w}{\partial t} \qquad (2)$$

Neraca energi untuk fasa padat.

$$\rho_s' \left(c_s + w\, c_l \right) \frac{\partial T_s}{\partial t} =$$

$$a_{sa}\, h_{sa} \left(T_a - T_s \right) - \rho_s' \left[c_l \left(T_s - 273.16 \right) - H_{ev} \right] \frac{\partial w}{\partial t} \qquad (3)$$

Neraca energi untuk fasa gas,

$$\rho_s^a \left(c_a - Y c_v \right) \left(\frac{\partial T_a}{\partial t} + V_a \cdot \nabla T_a \right) =$$

$$a_{sa} h_{sa} \left(T_s - T_a \right) + \rho_s^a \left[c_v \left(T_a - 273.16 \right) + H_{cv}^o \right] \frac{\partial w}{\partial t} \qquad (4)$$

Pada penulisan neraca energi untuk fasa padat, telah ditambahkan anggapan bahwa

$$\left| \frac{\partial}{\partial t} \right| >> \left| V_s \cdot \nabla \right|$$

Selama pengeringan, geometri karet mengalami perubahan dimensi oleh adanya penyusutan. Karenanya, koordinat-tetap 'x' harus dikoreksi untuk memperhitungkan perubahan dimensi tersebut. Dengan menganggap bahwa aturan aditifitas berlaku dan bahwa massa karet kering kerontang (dry-bone) tidak berubah selama pengeringan, maka hubungan antara elemen-diferensial tetap dan yang berubah dapat dituliskan seperti di bawah ini.

$$dx = \frac{\rho_{s,o}^a}{\rho_s^a} d\xi \qquad (5)$$

Indeks "o" pada persamaan di atas menyatakan kondisi pada awal pengeringan. Bila x menyatakan koordinat geometrik, maka ξ adalah koordinat yang mengikuti gerakan partikel massa.

Pers.(1)-(4) merupakan persamaan taklinier. Untuk memecahkan persamaan tersebut, digunakan metoda beda-hingga mundur (*backward difference*), di mana turunan pertama suatu variabel χ (kelembaban udara atau suhu udara) didekati dengan persamaan berikut:

$$\left[\frac{\partial \chi}{\partial \xi} \right]_i \approx \frac{\chi_i - \chi_{i-1}}{\Delta \xi} \qquad (6)$$

Pada persamaan di atas, "i" adalah indeks titik nodal yang menyatakan posisi. Dengan demikian, Pers.(1)-(4) dapat dinyatakan ke

dalam 4(N-1) sistem persamaan diferensial-biasa dengan N adalah jumlah titik nodal. Sistem persamaan diferensial-biasa tersebut dapat dituliskan secara ringkas sebagai berikut:

$$\frac{\partial \chi_j}{\partial t} = \sum_k A_{jk}\, \chi_k + B_j \qquad (7)$$

Pada persamaan di atas, A_{jk} merupakan fungsi dari χ_k dan B_j suatu konstanta. Pemecahan Pers.(7) dilakukan dengan menerapkan metoda Euler implisit (Finlayson, 1980):

$$\chi_j^{m-1} - \chi_j^m = \Delta t \left(\sum_k A_{jk}^{m-1} \chi_k^{m-1} + B_j^{m-1} \right) \qquad (8)$$

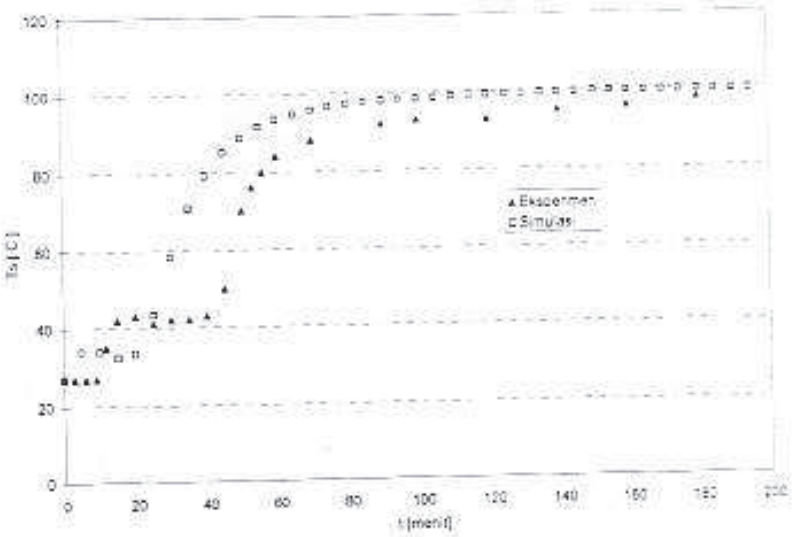
dengan "m" adalah indeks diskretisasi terhadap waktu.

HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN

Persamaan matematik yang telah dikembangkan pada bagian terdahulu kemudian disusun ke dalam bahasa pemrograman komputer. Input yang digunakan untuk eksekusi program adalah sebagai berikut:

- Suhu udara pengering : 100°C
- Kecepatan superfisial udara pengering : 1.5 m/s
- Kelembahan relatif udara sekeliling : 56%
- Suhu udara sekeliling : 27°C
- Ketinggian tumpukan butiran karet : 0.30 m
- Kandungan cairan mula-mula (basis kering) : 50%
- Kandungan cairan akhir (basis kering) : 0.5%

Data sifat fisik karet alam dan karakteristik pengeringan pada lapisan tipis diambil dari Naon (1994) dan Wood (1976). Hasil simulasi tersebut kemudian dibandingkan dengan data eksperimental (Naon, 1994). Pada Gb.2, diperlihatkan evolusi kandungan cairan selama pengeringan. Hasil simulasi memperlihatkan perbedaan dengan data eksperimental yang diberikan oleh Naon, terutama pada tahap-tahap awal pengeringan. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh regresi karakteristik pengeringan pada lapisan tipis dan/atau ketidaktelitian pada data koefisien perpindahan panas atau massa. Sebagaimana yang disitir oleh Lee, *et al.* (1992), pemodelan seringkali memerlukan pengaturan koefisien tersebut agar hasilnya sesuai dengan data percobaan.



Gambar 4 Perubahan suhu karet pada jarak 25 cm dari dasar tumpukan terhadap waktu

Pada Gb.3 dan Gb.4, ditunjukkan evolusi suhu karet pada ketinggian, masing-masing 5 cm dan 25 cm dari dasar tumpukan. Hasil simulasi tidak terlalu jauh dengan hasil eksperimen. Perbedaan yang teramati adalah bahwa kurva simulasi tergeser ke sebelah kiri atau, dengan lain perkataan, dalam simulasi suhu produk lebih cepat naik. Hal ini disebabkan oleh anggapan proses satu dimensi dalam pemodelan matematik. Implikasi dari anggapan ini adalah bahwa suhu butiran dan kandungan cairan pada elemen dx seragam. Dalam kenyataannya, terdapat distribusi atau ketidakseragaman suhu dan kandungan cairan dan hal ini akan menambah tahanan terhadap proses transfer, baik materi maupun energi. Anggapan proses satu dimensi juga menyiratkan bahwa tidak ada gradien dalam arah koordinat yang lain. Dengan perkataan lain, dimensi pengering cukup besar dalam arah koordinat yang bersangkutan. Pada percobaan, dimensi pengering umumnya terbatas dalam berbagai arah koordinat.

KESIMPULAN DAN SARAN

Suatu pemodelan matematik proses pengeringan jenis 'fixed-bed' untuk crumb rubber telah diturunkan. Model matematik tersebut digunakan

untuk simulasi proses pengeringan. Hasil simulasi dibandingkan dengan hasil eksperimen yang ada dalam literatur. Secara umum, hasil simulasi mendekati hasil eksperimen. Perbedaan yang besar terlihat pada evolusi kandungan cairan, khususnya pada tahap-tahap awal pengeringan. Untuk memperbaiki model matematik, disarankan untuk memperhitungkan dimensi pengering yang terbatas. Untuk itu, diperlukan juga untuk melibatkan chanelling yang terjadi pada dinding pengering dalam perhitungan. Di samping itu, diperlukan juga data yang lebih teliti pada koefisien-koefisien perpindahan.

Nomenklatur

Huruf Latin

A	koefisien
a	luas per satuan volume, m^2/m^3
B	konstanta
c	panas spesifik, kJ/(kg.K)
H_{ev}	kalor laten penguapan, kJ/kg
h	koefisien perpindahan panas konvektif, $W/(m^2.K)$
L	ketinggian tumpukan butiran karet, m
R	laju perubahan fasa per satuan volume, $kg/(m^3.s)$
T	suhu, °C
t	waktu, s
V	kecepatan, m/s
w	kandungan cairan, kg/kg
x	koordinat-tetap, m
Y	Kelembaban udara, kg uap air/kg udara

Huruf Yunani

χ	variabel
ρ	massa jenis, kg/m^3
ξ	koordinat bergerak, m

Superskrip

a	curah, *bulk*
m	indeks diskretisasi terhadap waktu
o	tingkat keadaan acuan

Subskrip

a	udara
i	indeks diskretisasi terhadap jarak
ij, j, jk, k	indeks pengulangan
l	fasa cair
s	fasa padat
v	fasa uap

RUJUKAN

Arnaud, G. & J.-P. Fohr (1988), Slow drying simulation in thick layers of granular products, *Int. J. Heat Mass Transfer* **31** (12), pp.2517-2526

Brooker, D.B., F.W. Bakker-Arkema, & C.W. Hall (1974), *Drying Cereal Grain*, AVI Publishing Co., Inc., Westport, Conn., pp.196-199

Caromel, G. (1984), Contribution à l'étude des lois du séchage du caoutchouc sous forme de granulés, IRCA, Côte d'Ivoire.

Costa, V.A.F & A.R.A. Figueiredo (1993), Numerical technique for solving partial differential equations system for the simulation of a fixed-bed dryer, *Computers in Chemical Engineering* **17** (11), pp.1129-1140

Finlayson, B.A. (1980), *Non-linear Analysis in Chemical Engineering*, McGraw-Hill, New York

Lee, W.C., O.A. Plumb & L. Gong (1992), An experimental study of heat and mass transfer during drying of packed beds, *Trans. ASME, J. Heat Transfer* **114**, August, pp. 727-734

Naon, B., (1994), Séchage du caoutchouc naturel sous forme de granulés: cinétiques, modélisations, applications, Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, Montpellier, France

Özisik, M.N. (1985), *Heat Transfer : A Basic Approach*, McGraw-Hill, Singapore, p. 104

Sethu, S. (1981), Drying of natural rubber in particulate form, D.Sc. Dissertation, University of Gent, Belgium

Wood, L.A. (1976), Physical constants of different rubbers, *Rubber Chemistry and Technology* **49** (2), pp.189-199