

MODEL MATEMATIS KENAIKAN SUHU PADA BUTIRAN SELAMA PENGEPRESAN PADA PEMBUATAN TABLET EFFERVESSEN BUAH MARKISA

Mathematical Modeling of Temperature Increase in the Particles during Compression on Processing of the Passion Fruit Effervescent Tablet

Ansar, Sirajuddin

Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pangan dan Agroindustri Universitas Mataram
Jl. Majapahit No. 62 Mataram, Nusa Tenggara Barat.
Email: ancadewi@yahoo.com

ABSTRAK

Tujuan penelitian ini adalah membuat model matematis untuk memprediksi kenaikan suhu pada butiran yang dianggap berbentuk bola selama pengepresan pada pembuatan tablet effervescent buah markisa. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah granula markisa. Data kenaikan suhu pada bahan selama pengepresan diukur dengan termokopel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kenaikan suhu di permukaan butiran terdistribusi secara konduksi ke seluruh bagian butiran yang dapat didekati dengan persamaan difusivitas panas koordinat bola 3 dimensi. Suhu di permukaan butiran tempat terjadinya gesekan antar titik singgung butiran jauh lebih tinggi dibandingkan dengan suhu T_g bahan komponen penyusun tablet effervescent. Kenaikan rerata suhu butiran selama pengepresan adalah $33,03^{\circ}\text{C}$.

Kata kunci: model matematis, distribusi suhu, tablet effervescent, dan buah markisa

ABSTRACT

The objective of this research was proposing mathematical models to predict the temperature increasing in the spherical form particles during compression on processing of the passion fruit effervescent tablet. The materials used in this research were passion fruit granule. The data of temperature increase on the materials during compression was recorded by the thermocouple. Result of the research was showed the temperature increase will be distributed by conduction to all position in the particle that can predict with the diffusion equation for dimensions three spherical coordinate. The temperature at the particle surface where friction among the contact points of the particle occurred was higher than T_g of materials of the effervescent tablet component. The particles temperature average increase during compression is 33.03°C .

Keywords: mathematical models, temperature increase, effervescent tablet, and passion fruit

PENDAHULUAN

Salah satu industri pangan yang dewasa ini telah bergerak menjadi industri pangan global adalah bisnis buah-buahan. Diungkapkan oleh McMichael (2009) bahwa jika sebelumnya manusia hanya mengkonsumsi buah-buahan segar secara musiman, saat ini industri buah-buahan telah mampu mengubah pola tersebut dengan menghadirkan buah-buahan dalam bentuk olahan, sehingga tersedia buah-buahan sepanjang tahun.

Distribusi buah-buahan segar sangat bersifat padat modal dan padat energi. Membutuhkan armada pengangkut berupa truk, pesawat udara, dan kapal laut yang harus dilengkapi dengan lemari pendingin (*freezer*). Sistem distribusi seperti ini dihadapkan dengan tantangan transportasi antar benua yang berjarak puluhan ribu kilometer. Dengan persyaratan yang demikian berat, maka modifikasi buah-buahan segar menjadi produk pangan olahan menjadi sebuah solusi (Hodges, 2005).

Indonesia sudah lama dikenal sebagai negara yang kaya dengan keanekaragaman buah tropis dan sangat potensial

dikembangkan menjadi bahan dasar produk pangan olahan. Salah satu di antaranya adalah buah markisa (*Passiflora edulis*). Buah markisa bersifat musiman dan tidak tahan lama disimpan pada kondisi suhu kamar. Buah markisa yang telah matang hanya mampu bertahan 3 sampai 4 hari pada suhu kamar. Untuk mempertahankan umur simpan (*shelf-life*) buah markisa dibutuhkan penanganan pasca panen yang tepat agar pemanfaatannya dapat lebih maksimal (Ansar dkk, 2004).

Buah markisa disenangi oleh konsumen karena mengandung nutrisi yang cukup lengkap dan berguna bagi kesehatan. Beberapa hasil penelitian telah dilaporkan bahwa kandungan nutrisi buah markisa antara lain, *passiflorane* yang berkhasiat untuk menentramkan urat syaraf dan berbagai zat gizi lainnya seperti vitamin A dan C, kalori, serta berbagai mineral lainnya (Pruthi, 1963; Thamrin dkk., 1993; Ansar dkk., 2004).

Selama ini ragam pemanfaatan buah markisa belum banyak dilaporkan. Pemanfaatan buah markisa sebagai bahan dasar produk olahan merupakan upaya untuk meningkatkan nilai ekonomis buah, sekaligus sebagai upaya penganeke-ragaman produk pangan. Selain itu, juga dapat mengatasi kerusakan buah markisa pada saat musim panen yang melimpah ruah. Berkaitan dengan hal tersebut, solusi alternatif yang dapat dilakukan adalah mengolah buah markisa menjadi tablet effervescent (Ansar dkk., 2009).

Proses pembuatan tablet effervescent pada umumnya dilakukan dengan cara pengepresan (*compression*) bahan di dalam cetakan (Ansel, 1989). Bahan-bahan yang digunakan pada pembuatan tablet effervescent pada umumnya berbentuk butiran (*granular*), sehingga ketika dimampatkan akan terjadi gesekan (*friction*) antar butiran di permukaan titik singgung butiran. Gesekan ini dapat menimbulkan energi panas yang mampu menaikkan suhu bahan, sehingga terjadi pelelehan (*melting*) (Marais dkk., 2009).

Kenaikan suhu di dalam bahan selama pengepresan pada pembuatan tablet effervescent buah markisa tidak dapat diamati dan diukur secara langsung. Selain ukuran butirannya yang sangat kecil, kenaikan suhu yang timbul juga tidak terlalu besar. Padahal hal ini sangat berpengaruh terhadap kualitas dan keamanan produk pangan olahan, terutama yang berkaitan dengan suhu transisi gelas (*glass transition temperature, Tg*) bahan. Bahan pangan yang memiliki suhu Tg lebih rendah dari pada suhu yang ada pada sistem, maka bahan tersebut mudah mengalami kerusakan atau tidak stabil (Khalloufi dkk., 2008; Roos dkk., 1996; Adawiyah dkk., 2005).

Kenaikan suhu yang kecil tersebut hanya bisa diprediksi dan dihitung menggunakan pemodelan secara matematis. Model matematis yang telah disusun kemudian disimulasikan menggunakan program komputer bahasa basic. Pemodelan

secara matematis dapat menghasilkan data yang valid dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah (Sediawan dan Prasetyo, 1997).

Berdasarkan beberapa keterangan yang telah diungkapkan di atas, maka tujuan penelitian ini adalah membuat model matematis untuk memprediksi kenaikan suhu pada bahan selama pengepresan pada pembuatan tablet effervescent buah markisa. Aplikasi model ini adalah dapat digunakan untuk mengetahui komposisi penyusun tablet yang lebih awal mengalami pelelehan yaitu bahan yang memiliki suhu transisi gelas (*glass transition temperture*) paling rendah, sehingga dapat dijadikan sebagai bahan perekat pada pembuatan tablet effervescent.

METODE PENELITIAN

Pengembangan Model Matematis

Pengembangan model matematis pada penelitian ini disusun berdasarkan asumsi-asumsi sebagai berikut:

1. Tablet terdiri dari partikel-partikel padat berbentuk bola dan berukuran seragam.
2. Campuran bahan bersifat homogen.
3. Panas jenis, densitas, dan konduktivitas bahan tetap, tidak merupakan fungsi suhu.
4. Tidak terjadi perubahan bentuk dan volume butiran akibat adanya tekanan.
5. Tidak terjadi perpindahan massa.
6. Suhu awal butiran seragam dan sama dengan suhu lingkungan.
7. Energi panas hanya berasal dari gesekan antar titik singgung butiran.

Berdasarkan asumsi-asumsi tersebut di atas, neraca panas disusun pada elemen volum seperti ditunjukkan oleh Gambar 1 yang dapat ditulis dalam bentuk persamaan:

$$q_r A_r|_r + q_\theta A_\theta|_\theta + q_\phi A_\phi|_\phi - (q_r A_r|_{r+\Delta r} + q_\theta A_\theta|_{\theta+\Delta\theta} + q_\phi A_\phi|_{\phi+\Delta\phi}) = \Delta V \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \dots\dots\dots(1)$$

Laju aliran panas yang masuk pada elemen volum arah sumbu jari-jari (r) adalah:

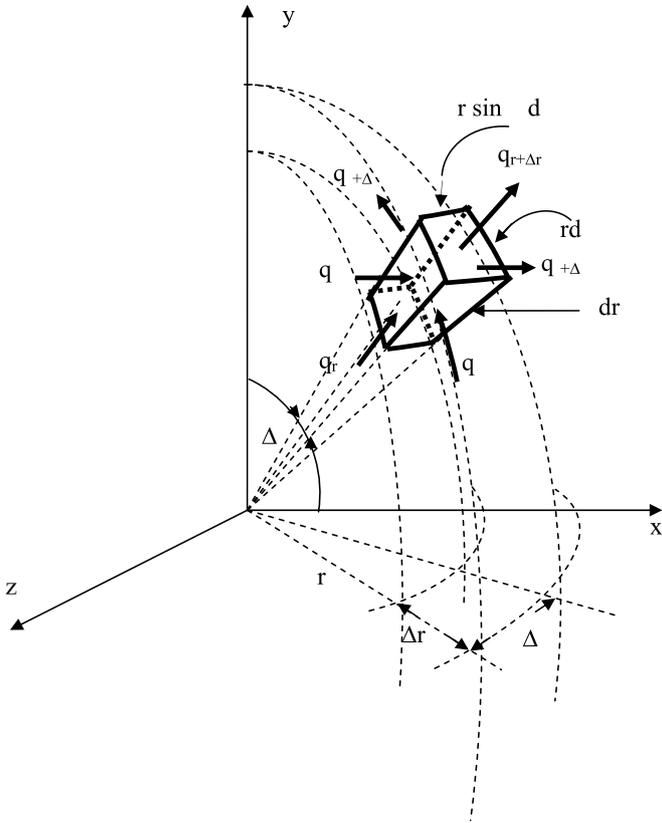
$$q_r = -k \cdot A_r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \dots\dots\dots(2)$$

Laju aliran panas yang masuk pada elemen volum arah vertikal (θ) adalah:

$$q_\theta = -k \cdot \frac{1}{r} \cdot A_\theta \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} \dots\dots\dots(3)$$

Laju aliran panas yang masuk pada elemen volum arah horizontal (ϕ) adalah:

$$q_\phi = -k \cdot \frac{1}{r \sin \theta} \cdot A_\phi \cdot \frac{\partial T}{\partial \phi} \dots\dots\dots(4)$$



Gambar 1. Neraca panas pada elemen volum bola

Hasil substitusi persamaan (2), (3), dan (4) ke dalam persamaan (1), diperoleh persamaan:

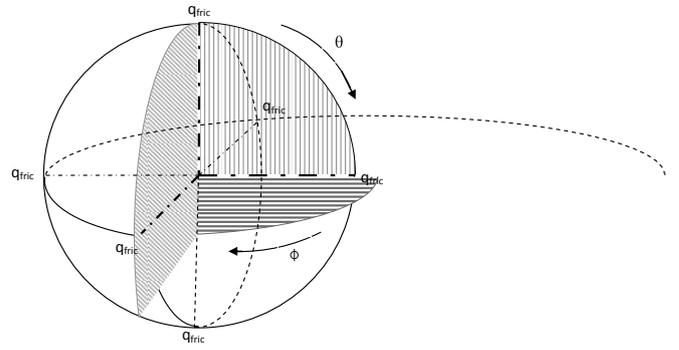
$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \dots(5)$$

Initial condition (IC) dan boundary condition (BC) persamaan (5) adalah:

Pada semua posisi, $T(r, \theta, \phi, t) = T_{awal} = 28,5 \text{ }^\circ\text{C}$ untuk $t = 0$

Pada $t > 0$ dan $r = 0$; $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$

Posisi permukaan yang mengalami gesekan adalah pada 6 titik seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2 dengan BC dari persamaan (5) adalah:



Gambar 2. Skematis distribusi suhu di permukaan yang mengalami gesekan ke pusat bola dan elemen volum 1/8 bagian volume bola.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Pada } r = R \text{ dan } \theta = 0 \text{ untuk } 0 \leq \phi \leq 2\pi \\ \text{Pada } r = R \text{ dan } \theta = \pi/2 \text{ untuk } \phi = 0 \\ \text{Pada } r = R \text{ dan } \theta = \pi/2 \text{ untuk } \phi = \pi/2 \\ \text{Pada } r = R \text{ dan } \theta = \pi/2 \text{ untuk } \phi = \pi \\ \text{Pada } r = R \text{ dan } \theta = \pi/2 \text{ untuk } \phi = 3\pi/2 \\ \text{Pada } r = R \text{ dan } \theta = \pi \text{ untuk } 0 \leq \phi \leq 2\pi \end{array} \right\} -k \frac{\partial T}{\partial r} = q_{Fric}$$

dengan q_{fric} adalah $mc_p \frac{\Delta T_b}{\Delta t}$

Di luar posisi di atas, pada $r = R$ untuk semua θ dan ϕ

$$\text{adalah } -k \frac{\partial T}{\partial r} = 0.$$

Dengan 6 titik yang mengalami gesekan dan mendapat energi yang sama besar (q_{fric}), satu butir partikel bola dapat dipandang terdiri dari 8 elemen yang simetris. Apabila penyelesaian persamaan (5) diberlakukan hanya pada elemen simetris yang volumenya 1/8 bagian volume bola seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2, maka tambahan BC adalah:

- Pada $0 \leq r \leq R$ dan $0 \leq \theta \leq \pi/2$
untuk $\theta = 0$, $q_\theta = -k \cdot \frac{1}{r \sin \theta} \cdot A_\theta \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} = 0$
- Pada $0 \leq r \leq R$ dan $0 \leq \theta \leq \pi/2$
untuk $\theta = \pi/2$, $q_\theta = -k \cdot \frac{1}{r \sin \theta} \cdot A_\theta \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} = 0$
- Pada $0 \leq r \leq R$ dan $\theta = \pi/2$
untuk $0 \leq \phi \leq \pi/2$, $q_\phi = -k \cdot \frac{1}{r} \cdot A_\phi \cdot \frac{\partial T}{\partial \phi} = 0$

Persamaan diferensial dan BC yang telah tersusun diselesaikan secara numerik metode beda hingga pendekatan eksplisit. Berdasarkan persamaan (5), maka untuk menghitung distribusi di permukaan butiran digunakan persamaan:

$$\begin{aligned}
 (T_{N,j,k,w+1}) = & \frac{1}{M} \left\{ \left[\frac{1}{2} + \frac{2(\Delta r)}{(i)(\Delta\theta)^2} - \frac{2(\Delta r)}{(i)\sin^2(j\Delta\theta)(\Delta\phi)^2} + M \right] T_{N,j,k,w} - \left(\frac{1}{2} \right) T_{N-1,j,k,w} \right. \\
 & + \left(\frac{\cos(j\Delta\theta)\Delta\theta(\Delta r)}{2(i)(\Delta\theta)^2 \sin(j\Delta\theta)} - \frac{(\Delta r)}{(i)(\Delta\theta)^2} \right) T_{N,j-1,k,w} - \left(\frac{\cos(j\Delta\theta)\Delta\theta(\Delta r)}{2(i)(\Delta\theta)^2 \sin(j\Delta\theta)} + \frac{(\Delta r)}{(i)(\Delta\theta)^2} \right) T_{N,j+1,k,w} \\
 & \left. + \left(\frac{(\Delta r)}{(i)\sin^2(j\Delta\theta)(\Delta\phi)^2} \right) T_{N,j,k-1,w} + \left(\frac{(\Delta r)}{(i)\sin^2(j\Delta\theta)(\Delta\phi)^2} \right) T_{N,j,k+1,w} \right\} \dots\dots\dots(6)
 \end{aligned}$$

Distribusi suhu pada posisi pusat butiran dihitung dengan persamaan:

$$T_{0,j,k,w+1} = \frac{1}{M} \left\{ T_{1,j,k,w} + (M - 1)T_{0,j,k,w} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

Distribusi suhu pada posisi sumbu butiran dihitung dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 T_{i,j,k,w+1} = & \frac{1}{M} \left\{ \left(1 - \frac{1}{i} \right) T_{i-1,j,k} - (2-M)T_{i,j,k} + \left(1 + \frac{1}{i} \right) T_{i+1,j,k} \right. \\
 & \left. - \left(\frac{\Delta r}{(i)(\Delta\theta)} \right) T_{i,j-1,k} + \left(\frac{\Delta r}{(i)(\Delta\theta)} \right) T_{i,j+1,k} \right\} \dots\dots\dots(8)
 \end{aligned}$$

Distribusi suhu pada permukaan butiran yang mengalami gesekan dihitung dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 T_{0,j,k,w+1} = & \frac{1}{M} \left\{ T_{1,j,k,w} + (M - 1)T_{0,j,k,w} \right\} \\
 & + \left(\frac{2}{(i)^2 \Delta\theta} \right) T_{NR,j+1,k} \left. \right\} + 2\Delta r q_{fric} \dots\dots\dots(9)
 \end{aligned}$$

Karena yang diamati pada observasi adalah suhu merata, sedangkan suhu hasil simulasi merupakan fungsi posisi (r, θ, dan φ), maka suhu merata hasil simulasi perlu dihitung dengan persamaan:

$$\bar{T}_{hit} = \frac{\rho C_p \int_0^{r/2} \int_0^{r/2} \int_0^R T \cdot r^2 \sin \theta \cdot dr \cdot d\theta \cdot d\phi}{\rho C_p \int_0^r dV} \dots\dots\dots(10)$$

Persamaan (10) diselesaikan dengan metode Trapezoidal Rule sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \int_0^R T_{i,j,k} \cdot r^2 \cdot dr = & \frac{\Delta r}{2} \left\{ (T_{0,j,k} \cdot R_0^2) + 2(T_{1,j,k} \cdot R_1^2) + 2(T_{2,j,k} \cdot R_2^2) + 2(T_{3,j,k} \cdot R_3^2) + 2(T_{4,j,k} \cdot R_4^2) + \right. \\
 & 2(T_{5,j,k} \cdot R_5^2) + 2(T_{6,j,k} \cdot R_6^2) + 2(T_{7,j,k} \cdot R_7^2) + 2(T_{8,j,k} \cdot R_8^2) + 2(T_{9,j,k} \cdot R_9^2) + (T_{10,j,k} \cdot R_{10}^2) \left. \right\} = A_{j,k} \\
 \int_0^{r/2} A_{j,k} \cdot \sin \theta \cdot d\theta = & \frac{\Delta\theta}{2} \left\{ (A_{0,k} \cdot \sin(0 \cdot \Delta\theta)) + 2(A_{1,k} \cdot \sin(1 \cdot \Delta\theta)) + 2(A_{2,k} \cdot \sin(2 \cdot \Delta\theta)) + 2(A_{3,k} \cdot \sin(3 \cdot \Delta\theta)) + \right. \\
 & 2(A_{4,k} \cdot \sin(4 \cdot \Delta\theta)) + 2(A_{5,k} \cdot \sin(5 \cdot \Delta\theta)) + 2(A_{6,k} \cdot \sin(6 \cdot \Delta\theta)) + \\
 & 2(A_{7,k} \cdot \sin(7 \cdot \Delta\theta)) + (A_{8,k} \cdot \sin(8 \cdot \Delta\theta)) \left. \right\} = B_k \\
 \int_0^{r/2} B_k \cdot d\phi = & \frac{\Delta\phi}{2} \left\{ (B_{0,k}) + 2(B_{1,k}) + 2(B_{2,k}) + 2(B_{3,k}) + 2(B_{4,k}) + 2(B_{5,k}) + 2(B_{6,k}) + 2(B_{7,k}) + (B_{8,k}) \right\} \dots\dots\dots(11)
 \end{aligned}$$

Bahan dan Alat Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan adalah granula markisa yang terbuat dari bubuk buah markisa, aspartam equal G.D. Searie & Co., polietilen glikol DE 6000, asam sitrat food grade, dan natrium bikarbonat food grade. Sedangkan alat yang digunakan antara lain *Defferential Thermal Analysis* (DTA), *rotary vacuum evaporator*, lemari pendingin Hitachi, *tray dryer* merek Edward, mortir, cawan, ayakan Tyler, timbangan elektronik merek Sartorius, termokopel tipe K, *Universal Testing Instrument* merek Zwick seri SA/0.5, dan *dehumidifier* merek Sanyo.

PROSEDUR PENELITIAN

Pembuatan Granula Markisa

Pembuatan granula markisa dilakukan dengan menambahkan laktosa pada sari buah markisa dengan rasio berat 20:80. Bahan ini dicampur di dalam *mixer* sampai terbentuk adonan, kemudian disaring menggunakan ayakan 12 mesh. Granula basah dikeringkan dalam pengering kabinet pada suhu 50°C dengan lama pengeringan 12 jam untuk memperoleh kadar air 14,2% (Ansel, 1989).

Pencetakan Tablet

Pencetakan tablet dilakukan dengan metode kompresi cetak langsung (Mohrle, 1989). Pencetakan tablet dilakukan secara manual yaitu satu persatu formula dimasukkan ke dalam cetakan tablet. Bahan-bahan yang sudah dicampur dimasukkan ke dalam cetakan kemudian dimampatkan menggunakan LLYOD dengan variasi gaya tekan 1000, 2000, 3000, 4000, dan 5000 N.

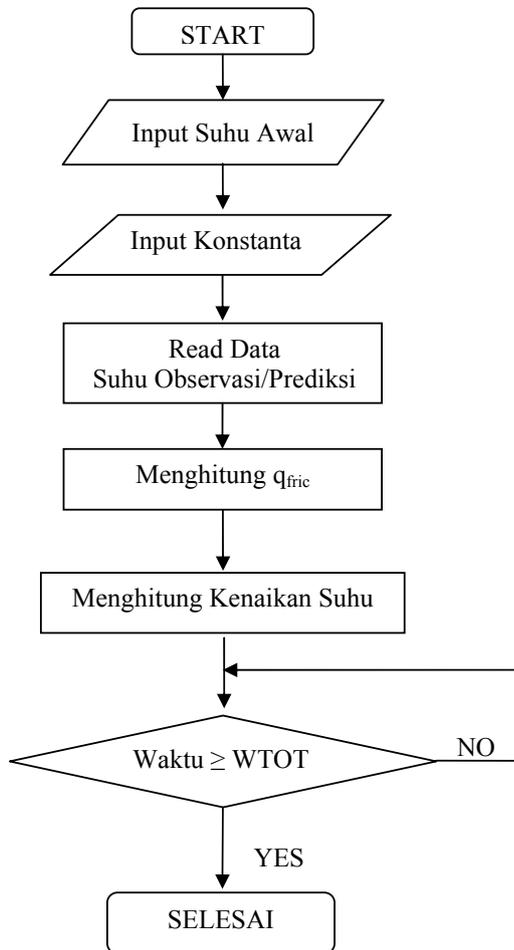
Pengukuran Kenaikan Suhu Bahan

Data kenaikan suhu pada bahan selama pengepresan diukur menggunakan termokopel. Termokopel dipasang di dalam cetakan yang ujungnya berada di antara tumpukan butiran. Jarak antara permukaan *punch* bawah dengan ujung termokopel adalah 5 mm, sehingga suhu yang terdeteksi adalah suhu merata bahan. Pengamatan suhu berakhir apabila gaya tekanan maksimum tercapai. Pengukuran distribusi suhu bahan pada masing-masing variasi perlakuan dilakukan 5 kali ulangan. Diagram alir perhitungan kenaikan suhu pada bahan disajikan pada Gambar 3.

Analisis Data

Hasil simulasi distribusi suhu dari model matematis pendekatan numerik akan dibandingkan dengan data pengamatan yang diperoleh dari eksperimen di laboratorium. Uji

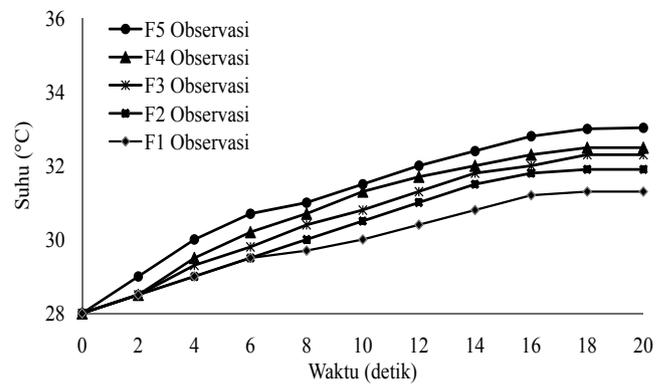
validasi model matematis digunakan metode regresi dengan membandingkan antara data prediksi dengan data observasi. Model matematis dikatakan valid apabila nilai koefisien determinasi (R^2) antara data prediksi dengan data observasi mendekati angka satu (Sediawan dan Prasetyo, 1997; Constantinides, 1987).



Gambar 3. Diagram alir perhitungan distribusi suhu

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data hasil pengamatan kenaikan suhu dari waktu ke waktu pada berbagai variasi perlakuan pengepresan selama pembuatan tablet effervescent buah markisa disajikan dalam bentuk grafik. Kenaikan suhu rerata observasi adalah data pengamatan yang diperoleh secara langsung di laboratorium. Data prediksi merupakan hasil simulasi model matematis menggunakan bahasa program basic. Data rerata suhu observasi yang diperoleh di lapangan ditunjukkan pada Gambar 4. Data kenaikan suhu digambarkan sebagai hubungan antara waktu dengan suhu pada berbagai perlakuan gaya pengepresan.



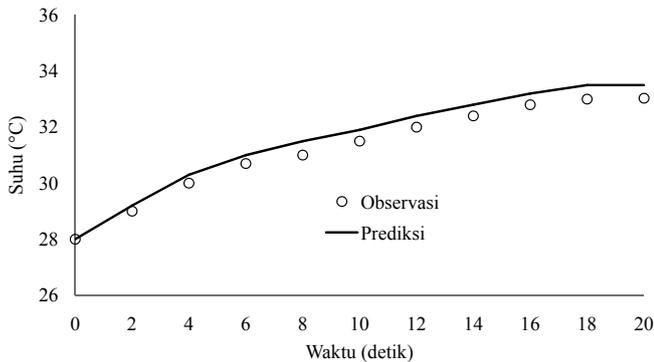
Gambar 4. Kenaikan suhu rerata hasil observasi pada variasi energi mekanik pengepresan

Berdasarkan data pada Gambar 4 dapat dijelaskan bahwa suhu awal bahan seragam dan terjadi kenaikan seiring dengan bertambahnya waktu pengepresan. Pada 15 detik pertama terjadi kenaikan suhu yang cukup tajam dan menjelang akhir pengepresan, kenaikan suhu tidak menunjukkan adanya perubahan. Pada akhir pengepresan ($t = 20$), kenaikan suhu telah mencapai nilai yang maksimum. Hal ini dipengaruhi oleh akumulasi energi panas yang timbul dari waktu ke waktu selama pengepresan. Terjadinya kenaikan suhu pada bahan disebabkan oleh adanya energi panas yang timbul akibat dari gesekan antar titik singgung butiran. Hal yang sama diungkapkan oleh Vadas dkk. (2002) bahwa partikel padat berbentuk bola ketika bergesekan, maka timbul energi panas yang dapat memicu terjadinya pelelehan pada pada bahan.

Penggunaan energi mekanik pengepresan yang berbeda juga menimbulkan kenaikan suhu yang berbeda-beda. Pada energi mekanik pengepresan 70,61 J terjadi kenaikan suhu paling tinggi jika dibandingkan dengan 4 perlakuan yang lainnya (60,01; 47,99; 36,29; dan 26,66 J). Hal ini berarti bahwa semakin besar energi mekanik pengepresan yang digunakan, kenaikan suhu pada butiran juga semakin tinggi. Hasil penelitian German (1994) juga melaporkan bahwa penggunaan energi mekanik pengepresan yang tinggi, berarti tekanan yang diterima oleh butiran juga semakin besar. Tekanan yang besar dapat menyebabkan energi panas yang tinggi, sehingga kenaikan suhu pada butiran juga semakin besar.

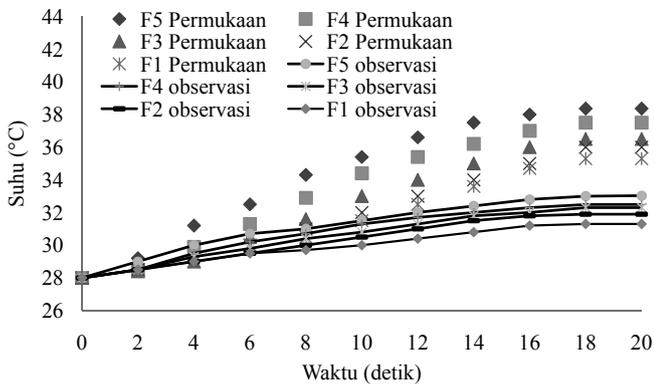
Terdapat perbedaan kenaikan rerata suhu hasil prediksi dengan hasil observasi (Gambar 5). Rerata suhu prediksi selalu lebih tinggi dari rerata suhu observasi, tetapi memiliki kecenderungan (*trend*) yang sama. Perbedaan ini disebabkan oleh nilai konduktivitas termal yang digunakan untuk data simulasi lebih besar dari nilai konduktivitas termal bahan penyusun tablet. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Hastuti dkk. (1997) yang melaporkan bahwa semakin tinggi

nilai konduktivitas termal bahan, maka perambatan suhu yang terjadi juga semakin cepat.



Gambar 5. Rerata suhu observasi dan prediksi selama pengepresan

Bahan-bahan yang digunakan pada pembuatan tablet effervescent buah markisa dalam penelitian ini diasumsikan berbentuk bola yang seragam. Ketika dimampatkan secara ideal terdapat 6 titik persinggungan antar butiran. Keenam titik persinggungan tersebut dapat menimbulkan energi panas, sehingga terjadi kenaikan suhu pada butiran. Akibat kenaikan suhu tersebut, maka terjadi pelelehan (*melting*) di permukaan bahan yang diikuti dengan penggumpalan (*caking*). Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Roos dkk. (1996) yang melaporkan bahwa terjadinya pelelehan apabila suhu pada sistem lebih besar dari pada suhu T_g bahan.



Gambar 6. Suhu rerata di permukaan butiran hasil prediksi dan suhu rerata observasi pada berbagai variasi energi mekanik pengepresan

Kenaikan suhu di permukaan butiran (Gambar 6) dapat dijelaskan bahwa pada 6 posisi tempat terjadinya gesekan antar titik singgung permukaan butiran memiliki profil yang sama karena bentuknya yang simetris. Keenam posisi tersebut adalah $(R, 0, 0)$; $(R, \pi, 0)$; $(R, \pi/2, 0)$; $(R, \pi/2, \pi/2)$; $(R, \pi/2, \pi)$; dan $(R, \pi/2, 3\pi/2)$. Suhu di permukaan butiran lebih tinggi yaitu $49,63^\circ\text{C}$ dari pada suhu T_g komponen penyusun tablet

effervescent buah markisa yaitu 31°C . Pada kondisi ini, asam sitrat yang memiliki suhu T_g 31°C diduga telah mengalami pelelehan lebih awal, sehingga dapat berfungsi sebagai bahan perekat. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Khalloufi dkk. (2008) bahwa bahan yang memiliki suhu T_g lebih rendah dari suhu lingkungan, maka bahan tersebut meleleh lebih awal, kemudian menggumpal (*caking*).

Berdasarkan Gambar 6 terlihat bahwa data kenaikan suhu rerata di permukaan butiran hasil prediksi selalu lebih tinggi jika dibandingkan dengan data kenaikan suhu rerata hasil observasi. Perbedaan terbesar terlihat pada perlakuan F5 dengan kenaikan suhu rerata di permukaan hasil prediksi sebesar $38,36^\circ\text{C}$, sedangkan kenaikan suhu rerata hasil observasi hanya $33,03^\circ\text{C}$. Pada perlakuan F1, kenaikan suhu rerata di permukaan hasil prediksi sebesar $35,31^\circ\text{C}$, sedangkan kenaikan suhu rerata hasil observasi sebesar $32,49^\circ\text{C}$. Kejadian ini disebabkan oleh energi gesekan (q_{fric}) yang timbul selama pengepresan. Semakin besar nilai q_{fric} yang digunakan untuk simulasi, data kenaikan suhu rerata hasil prediksi juga semakin besar.

Fenomena lain yang dapat diungkapkan adalah distribusi suhu terjadi dengan arah tiga dimensi. Semakin ke dalam butiran (arah jari-jari butiran) kenaikan suhu semakin kecil yaitu mendekati suhu lingkungan. Sedangkan ke arah vertikal (sudut θ) dan arah horizontal (sudut ϕ) juga memiliki pola yang sama seperti pada arah jari-jari butiran. Hal ini sesuai dengan hasil simulasi program, yaitu untuk posisi yang lebih dekat dengan sisi-sisi yang diberi nilai awal $T_0 = 28,50^\circ\text{C}$, maka suhu mendekati nilai batas tersebut, sedangkan posisi di permukaan yang mengalami gesekan memiliki kenaikan suhu yang lebih tinggi. Hasil penelitian ini sesuai dengan pernyataan Fassihi dan Kanfer (1986) bahwa penggunaan energi mekanik pengepresan yang tinggi, berarti energi panas yang diterima oleh butiran sebagai akibat dari gesekan antar butiran juga semakin tinggi, sehingga kenaikan suhu yang timbul juga semakin besar.

KESIMPULAN

Kenaikan suhu pada permukaan butiran terdistribusi secara konduksi ke seluruh bagian butiran yang dapat didekati dengan persamaan difusivitas panas koordinat bola 3 dimensi. Selama pengepresan suhu di permukaan butiran lebih tinggi dibandingkan dengan suhu T_g bahan komponen penyusun tablet. Semakin ke dalam bagian butiran, suhu semakin kecil. Distribusi suhu pada 6 posisi tempat terjadinya gesekan memiliki profil yang sama karena bentuknya simetris. Kenaikan rerata suhu butiran selama pengepresan adalah $33,03^\circ\text{C}$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah berkontribusi dalam penelitian ini khususnya kepada Direktur Litabmas Dikti atas dukungan dana yang telah diberikan melalui Skim Penelitian Hibah Bersaing Tahun Anggaran 2010, sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Adawiyah, D.R., Soekarto, S.T., Hariadi, P., dan Suyitno (2005). Pengaruh sorpsi air dan suhu transisi gelas terhadap laju pencoklatan nonenzimatis pada pangan model. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan* **16**: 222-229.
- Ansar, Suhargo dan Budi Rahardjo (2004). Kajian perilaku pengeringan sari buah markisa dengan pengering semprot searah. *Agritech, Majalah Ilmu dan Teknologi Pertanian* **24**: 155-159.
- Ansar, Budi Rahardjo, Zuheid Noor dan Rochmadi (2009). Optimasi teknik pembuatan tablet effervescent sari buah dengan respon surface method. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan* **20**: 25-31.
- Ansel, H.C. (1989). *Introduction to Pharmaceutical Dosage Forms*. Lea and Febiger, Georgia.
- Constantinides, A. (1987). *Applied Numerical Methods with Personal Computers*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Fassihi, A.R. dan Kanfer, I. (1986). Effect of compressibility and powder flow properties on tablet weight variation. *Drug Development Industrial Pharmacy* **22**: 1947-1968.
- German, M.R. (1994). *Powder Metallurgy Science*. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Hastuti, S., Sediawan, W.B. dan Sulistyono (1997). Perpindahan panas pada packed bed: konduktivitas panas efektif dan koefisien perpindahan panas permukaan dinding. *Media Teknik* **19**: 69-76.
- Hodges, J. (2005). *Cheap Food and Feeding the World Sustainably*. Livestock Production Science, New York.
- Khalloufi, S., El-Maslouhi, Y., dan Ratti, C. (2008). Mathematical model for prediction of glass transition temperature of fruit powders. *Journal of Food Science* **65**: 842-847.
- Marais, A.F., Song, M. dan Villiers, MM. (2009). Effect of compression force, humidity, and disintegrant concentration on disintegration and dissolution of tablets. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research* **62**: 125-135.
- McMichael, P. (2009). *Global Food Politics*. Monthly Review **50**: 97-111.
- Mohrle, R. (1989). *Effervescent Tablets: Pharmaceutical Dosage Forms Tablet*. Marcel Decker Incorporate, New York.
- Pruthi, J.S. (1963). Physiology, chemistry, and technology of passion fruit. *Advan Food Res* **12**: 203-211.
- Roos, Y.H., Karel, M. dan Kokini, J.L. (1996). Water and molecule weight effects on glass transition in amorphous carbohydrate solution. *Journal of Food Science* **56**: 1676-1681.
- Sediawan, W.B. dan Prasetyo, A. (1997). *Pemodelan Matematis dan Penyelesaian Numerik dalam Teknik Kimia*. Andi Offset, Yogyakarta.
- Thamrin, M., Wirawan, D. dan Hutagalung, L. (1993). Karakteristik fisik dan kimia buah markisa kultivar gowa, sinjai, dan tator. *Jurnal Hortikultura* **3**: 32-36.
- Vadas, E.B., Down, GRB. dan Miller, R.A. (2002). Effect of compressional force on tablet containing cellulosic disintegrators, dimensionless disintegration values. *Journal Pharmaceutical Science* **73**: 781-783.