

PEMODELAN MATEMATIK TRANSFER PANAS DAN MASSA PADA PROSES PENGGORENGAN BAHAN MAKANAN BERPATI

[Mathematical Modelling of Heat and Mass Transfer in Frying Process
of Starchy Food]

Supriyanto¹⁾, Budi Rahardjo²⁾, Y. Marsono³⁾, dan Supranto⁴⁾

¹⁾ Mahasiswa Program S3 PS Teknik Pertanian UGM, Dosen pada Fakultas Pertanian, UNISMA Bekasi

²⁾ Guru Besar pada Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, UGM

³⁾ Guru Besar pada Jurusan Teknologi Pangan dan Hasil Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, UGM

⁴⁾ Lektor Kepala pada Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, UGM

Diterima 25 April 2006 / Disetujui 25 Juni 2006

ABSTRACT

Mathematical model of simultaneous heat and mass (moisture and oil) transfer process that occurred during the frying process was conducted using the basic principal of heat and mass transfer processes. Heat transfer within material was predicted by Fourier's law of the conduction heat transfer mechanism, while mass transfer within the material was formulated with Fick's law of diffusion mechanism. The objective of this study was to develop mathematical model of the heat, moisture and oil transfer that occur simultaneously in the starchy food during the frying process. Solution of the model with numerical analysis was achieved using implicit finite difference method of Crank-Nicolson. The simulation output of the model was presented as temperature, moisture and oil profiles during frying process..

Slabs of dried dough corn powder were fried in the fresh coconut oil at 180°C during 36 minutes. Temperature of the material was recorded with datalogger during frying process, and some sample were taken from deep fryer at certain time for measurement of moisture and oil content. The model was verified with experimental data of temperature, moisture and oil profiles. This research revealed that the simulation output and the experimental data were in good agreement.

Key words : *Frying process, mathematical model, heat and mass transfer*

PENDAHULUAN

Penggorengan merupakan fenomena transpor yang terjadi secara simultan, yaitu transfer panas, transfer massa air dan transfer (serapan) massa minyak. Panas ditransfer dari minyak ke bahan, massa air diuapkan dari bahan, dan minyak diserap oleh bahan (Whitaker, 1977a; Sahin et al., 1999). Faktor-faktor yang mempengaruhi proses transfer panas dan massa tersebut adalah sifat-sifat *thermal* dan *physicochemical* bahan dan minyak, bentuk geometri bahan, suhu minyak, dan perlakuan bahan sebelum digoreng (Krokida et. al., 2001). Proses transfer panas pada bahan yang sedang digoreng terjadi dalam dua cara. Transfer panas dari minyak goreng ke bahan terjadi secara konveksi dan transfer panas dalam bahan terjadi secara konduksi (Costa et al., 1999). Akibat adanya proses transfer panas, bahan makanan yang digoreng akan mengalami kenaikan suhu (Sahin et al., 1999), bersamaan dengan itu terjadilah pemasakan bahan makanan yang antara lain ditandai dengan penurunan kadar air, gelatinisasi pati dan denaturasi protein.

Kecepatan transfer panas dari minyak ke bahan dipengaruhi oleh suhu minyak, koefisien transfer panas konveksi minyak, koefisien transfer panas konduksi bahan dan bentuk dimensi serta ukuran bahan.

Kecepatan transfer massa air dari bahan ke lingkungan (minyak) dipengaruhi oleh kadar air awal bahan, difusifitas bahan dan bentuk dimensi serta ukuran bahan. Kecepatan transfer (serapan) minyak oleh bahan dipengaruhi oleh suhu minyak, viskositas minyak, porositas bahan, perbedaan tekanan kapiler. Pada penggorengan bahan makanan berpati ketiga proses transfer yang terjadi diikuti dengan pengembangan granula pati yang ditunjukkan dengan pengembangan volumenya.

Berdasarkan kajian yang telah dilakukan oleh peneliti terhadap referensi yang ada, belum ada penelitian yang mengkaji tentang ketiga proses transfer tersebut yang berlangsung simultan. Padahal berlangsungnya ketiga proses transfer tersebut akan menentukan kualitas akhir produk goreng, yang antara lain dicirikan oleh : warna produk, kadar air akhir, kadar minyak (banyaknya minyak yang terserap), kerenyahan produk dan bentuk produk setelah mengembang. Perilaku proses transfer yang tidak terkendali akan menghasilkan produk goreng yang kurang terjamin kualitas akhirnya. Kualitas produk yang jelek tampak kurang menarik, rasa yang kurang enak/gurih dan kemungkinan berbahaya bagi kesehatan apabila kandungan minyak terlalu tinggi dan dikonsumsi secara terus menerus.

Pengendalian perilaku proses transfer yang terjadi pada bahan makanan yang sedang digoreng pada peralatan dan mesin penggorengan yang digunakan pada industri pengolahan bahan makanan memerlukan serangkaian data yang menggambarkan perilaku variabel-variabel yang berhubungan baik dengan proses maupun bahan yang digoreng. Untuk memperoleh serangkaian data tersebut mengalami banyak kesulitan dalam pengamatannya karena ada beberapa variabel yang tidak dapat diukur secara langsung. Kesulitan-kesulitan tersebut disebabkan oleh beberapa hal, antara lain : proses berlangsung relatif cepat dan simultan, volume bahan yang digoreng cukup besar namun dalam satuan yang kecil-kecil, tenaga pengukur yang terbatas serta adanya saling keterkaitan antar variabel yang berpengaruh terhadap proses. Untuk mengatasi kesulitan-kesulitan tersebut di atas dapat dilakukan dengan pendekatan melalui prediksi menggunakan model matematik yang dikembangkan berdasarkan fenomena proses transfer yang terjadi pada proses penggorengan. Oleh karena itu perlu dikembangkan model matematik yang menggambarkan proses transfer simultan meliputi transfer panas, massa air dan massa minyak pada bahan makanan selama penggorengan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model matematik proses transfer panas, massa air dan massa minyak pada bahan makanan berpati selama penggorengan yang diselesaikan secara simultan dengan menggunakan pendekatan numeris. Ruang lingkup penelitian ini meliputi : model matematik dikembangkan berdasarkan hukum-hukum dasar proses transfer panas dan massa, penyelesaian model dilakukan secara numeris dengan bantuan komputer, bahasa program yang digunakan adalah bahasa BASIC versi TURBO BASIC, penggorengan menggunakan metode penggorengan celup minyak (*deep frying*) tanpa ada perlakuan variasi suhu minyak dan bahan makanan berpati yang dipilih sebagai sampel adalah tepung jagung yang dibuat adonan.

METODOLOGI

Landasan Teori

Laju panas yang mengalir melewati bahan setebal z dan seluas A dengan cara konduksi dapat diprediksi dengan *hukum Fourier* tentang konduksi panas sebagai berikut :

$$Q = - k A \frac{\partial T}{\partial z} \dots\dots\dots(1)$$

dimana k adalah konstante proporsionalitas yang melambangkan konduktivitas panas bahan dalam satuan W/m K (W/m °C) (Bird et al., 1960; Gekas, 1992). Laju massa cairan yang mengalir melewati bahan setebal z dan seluas A dengan cara difusi dapat diprediksi dengan *hukum Fick* tentang difusi sebagai berikut :

$$N = - D A \frac{\partial X}{\partial z} \dots\dots\dots(2)$$

dimana D adalah konstante difusifitas cairan dalam bahan (m²/dt) (Bird et al., 1960; Gekas, 1992).

Pengembangan model matematik

Sistem menggoreng celup minyak (*deep fat frying*) dilakukan dengan cara mencelupkan bahan makanan ke dalam minyak goreng panas yang bertemperatur di atas titik didih air, temperatur minyak biasanya berkisar antara 150°C – 200°C. Peralatan penggorengan terdiri dari: tempat minyak (*wajan*), elemen pemanas, alat kontrol suhu (*thermokopel*) dan alat kontrol waktu. Secara skematis sistem menggoreng *deep fat frying* dilukiskan pada Gambar 1.

Model matematika transfer panas, transfer massa air dan transfer massa minyak pada bahan makanan selama proses penggorengan disusun berdasarkan pada elemen volume setebal Δz, seperti pada Gambar 2.

Model transfer panas

Model transfer panas pada bahan diturunkan berdasarkan asumsi-asumsi sebagai berikut :

1. Bahan yang digoreng berbentuk slab, tebal bahan jauh lebih kecil dibandingkan dengan panjang dan lebar bahan, sehingga transfer panas hanya berlangsung satu arah mengikuti sumbu z
2. Transfer panas dalam bahan terjadi secara konduksi dari permukaan ke dalam bahan, transfer panas konveksi dari media ke permukaan bahan dianggap konstan.
3. Energi panas yang terkandung dalam minyak goreng jauh lebih besar dibandingkan dengan energi panas yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu bahan yang digoreng
4. Temperatur minyak goreng dianggap seragam
5. Pengerutan dan pemekaran bahan diabaikan sehingga perubahan tebal/dimensi bahan dapat diabaikan.

Neraca panas pada elemen volume setebal Δz

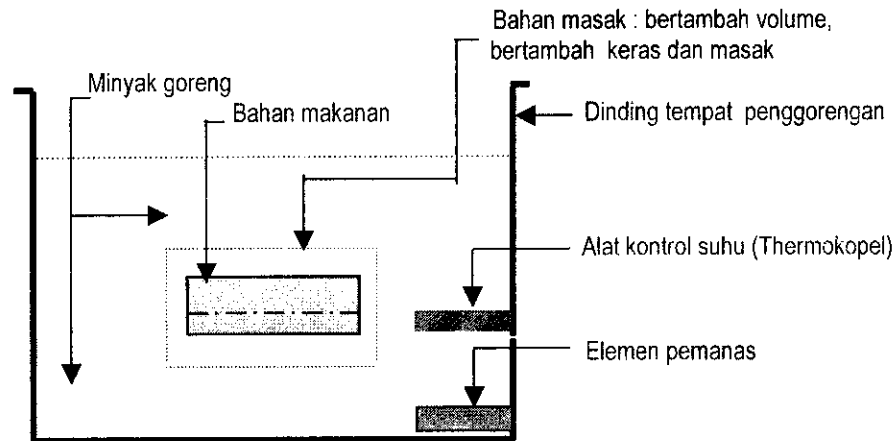
Persamaan matematik transfer panas yang dapat diturunkan dari elemen volume setebal Δz, dari z ke z + Δz dapat diturunkan sebagai berikut :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\rho C_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{k} \Delta H_g r_g + \frac{1}{k} \Delta H_c r_c \dots\dots\dots(3)$$

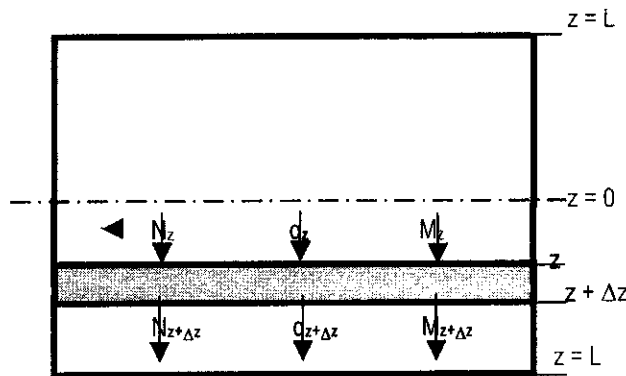
Persamaan (3) tersebut berlaku untuk volume bahan makanan yang digoreng setebal 0 < z < L, keadaan batas untuk peristiwa ini adalah :

Kondisi awal (*initial condition / IC*) :

$$T(z,0) = T_{awal \text{ bahan}} \text{ untuk semua posisi } z \dots\dots\dots(4)$$



Gambar 1. Sistem menggoreng deep fat frying



Gambar 2. Model potongan elemen volume bahan makanan

Kondisi batas (boundary conditions / BC) :

$$1. \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

$$2. -k \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=L} = h (T_s - T_{oil}) \dots\dots\dots (6)$$

$$3a. T(z,t) < T_{G1}, \Delta H_{r1} = 0 \text{ J/gr} \dots\dots\dots (7)$$

$$3b. T_{G1} \leq T(z,t) < T_{cr}, \Delta H_{r1} = (aT^2 + bT + c) \text{ J/gr} \dots\dots\dots (8)$$

$$4. T_{cr} \leq T(z,t) \leq T_m, \Delta H_{r2} = (aT^2 + bT + c) \text{ J/gr} \dots\dots\dots (9)$$

Persamaan di atas diselesaikan secara numerik dengan metode Crank - Nicolson dan perhitungannya menggunakan program komputer bahasa BASIC.

Model transfer massa air

Transfer massa air selama proses penggorengan terjadi secara difusi, Model transfer

massa air pada bahan diturunkan berdasarkan asumsi-asumsi sebagai berikut :

1. Bahan yang digoreng berbentuk slab, tebal bahan jauh lebih kecil dibandingkan dengan panjang dan lebar bahan, sehingga transfer massa air hanya berlangsung satu arah mengikuti sumbu z
2. Transfer massa air dalam bahan terjadi secara difusi dari dalam ke permukaan bahan, kehilangan massa air dalam bahan karena perubahan fase dari air menjadi uap diabaikan.

Neraca massa air pada elemen volume setebal Δz

Persamaan matematik transfer massa air pada elemen volume setebal Δz, yang ditunjukkan dengan perubahan kadar air (X_w) sebagai fungsi posisi (z) dan waktu (t), dari z ke z + Δz dapat diturunkan sebagai berikut :

$$D \frac{\partial^2 X_w}{\partial z^2} = \frac{\partial X_w}{\partial t} + r_G + r_c \dots\dots\dots (10)$$

Persamaan (10) tersebut berlaku untuk volume bahan makanan yang digoreng setebal 0 < z < L, keadaan batas untuk peristiwa ini adalah :

$$X_w(z,0) = X_w \text{ awal untuk semua posisi } z \dots\dots\dots(11)$$

Kondisi batas (*boundary conditions / BC*) :

$$1. \left. \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial X_w}{\partial z} \right] \right|_{z=0} = 0 \dots\dots\dots(12)$$

$$2. -D \left. \frac{\partial X_w}{\partial z} \right|_{z=L} = K_y (Y_{ws} - Y_w) \dots\dots\dots(13)$$

Persamaan di atas diselesaikan secara numerik dengan metode *Crank – Nicolson* dan perhitungannya menggunakan program komputer bahasa BASIC.

Model transfer massa minyak

Proses masuknya minyak goreng dari permukaan ke dalam bahan diduga terjadi secara difusi. Model transfer massa minyak tersebut dapat diturunkan berdasarkan asumsi-asumsi sebagai berikut :

1. Bahan yang digoreng berbentuk slab, tebal bahan jauh lebih kecil dibandingkan dengan panjang dan lebar bahan, sehingga transfer massa minyak hanya berlangsung satu arah mengikuti sumbu z
2. Transfer massa minyak dalam bahan terjadi secara difusi dari permukaan ke dalam bahan.
3. Kadar minyak awal bahan dianggap seragam untuk semua perlakuan

Neraca massa minyak pada elemen volume setebal Δz. Persamaan matematik transfer massa minyak pada elemen volume setebal Δz, yang ditunjukkan dengan perubahan kadar minyak (X_o) sebagai fungsi posisi (z) dan waktu (t), dari z ke z + Δz dapat diturunkan sebagai berikut :

$$D \frac{\partial^2 X_o}{\partial z^2} = \frac{\partial X_o}{\partial t} \dots\dots\dots(14)$$

Persamaan (14) tersebut berlaku untuk volume bahan makanan yang digoreng setebal 0 < z < L, keadaan batas untuk peristiwa ini adalah :

Kondisi awal (*initial condition / IC*) :

$$X_o(z,0) = X_o \text{ awal untuk semua posisi } z \dots\dots\dots(15)$$

Kondisi batas (*boundary conditions / BC*) :

$$1. \left. \frac{\partial X_o}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \dots\dots\dots(16)$$

$$2. X_o \left|_{z=L} = 1 \dots\dots\dots(17)$$

Persamaan di atas diselesaikan secara numerik dengan metode *Crank – Nicolson* dan perhitungannya menggunakan program komputer bahasa BASIC.

Bahan dan alat

Bahan yang digunakan adalah jagung (varietas *non waxy corn* dan *waxy corn*) yang dibeli di Balai Benih Jagung dan Palawija-Wonosari-Gunungkidul, air, minyak goreng kelapa sawit sebagai media untuk menggoreng,

Alat yang digunakan terdiri dari : alat penggoreng (*Deep Fryer*) merk *frifri*, oven listrik, *thermocuple*, termometer air raksa, *stopwatch*, seperangkat alat ukur suhu *dataloger* lengkap, timbangan analitik, cawan porselin, eksikator, pinset, aluminium foil, seperangkat alat untuk analisa kadar minyak meliputi labu soxhlet, tabung soxhlet dan kertas saring dan seperangkat alat untuk uji kadar air.

Penyiapan sampel

- (1) Jagung pipil digiling menjadi tepung,
- (2) Tepung jagung ditimbang secukupnya sesuai dengan jumlah sampel yang dibutuhkan,
- (3) Tepung jagung dibuat adonan dengan cara mencampur tepung dengan air mendidih, tepung jagung diaduk-aduk dengan air mendidih sampai terbentuk adonan yang plastis. Air mendidih yang diperlukan setiap 1 kg tepung adalah 850 ml sampai 900 ml,
- (4) Adonan tepung yang telah dihasilkan kemudian dicetak, dalam penelitian ini adonan dicetak berbentuk slab dengan ukuran (20 x 20 x 1) cm.
- (5) Adonan yang telah tercetak kemudian dikukus selama 1 jam,
- (6) Adonan masak diturunkan kadar airnya sampai kadar air 40 – 45% w.b., dengan hembusan *blower* tanpa adanya pemanasan untuk menghindari terjadinya proses pengeringan yang terlalu cepat agar sampel tidak pecah-pecah. Lama waktu pengeringan diatur sesuai dengan perlakuan yang telah direncanakan.

Pelaksanaan penelitian

- (1). Penyiapan peralatan penggorengan beserta perlengkapannya, tuangkan minyak goreng ke dalam tempat penggorengan (wajan),
- (2). Penyiapan peralatan ukur suhu (*dataloger*) beserta perlengkapan pendukungnya,
- (3). Menyiapkan sampel bahan makanan telah dianggap kering dan siap untuk digoreng,
- (4). Bersamaan dengan penyiapan sampel bahan yang akan digoreng juga disiapkan sampel untuk pengukuran kadar air awal bahan sebelum digoreng. Bahan tersebut kemudian diukur kadar airnya dengan cara gravimetri,
- (5). Pasangkan alat sensor suhu pada bagian pusat atau tepi bahan sampel yang telah disiapkan. Hubungkan alat sensor suhu bahan tersebut dengan *dataloger* yang telah tersambung dengan *Personal Computer*,
- (6). Untuk keperluan pengukuran kadar air dan kadar minyak bahan per periode waktu tertentu selama proses penggorengan, dibutuhkan beberapa adonan bahan dengan dimensi dan bentuk fisik yang relatif sama antara satu dengan lainnya,
- (7). Setelah bahan disiapkan lengkap dengan peralatan ukurnya, maka peralatan goreng siap untuk

dinyalakan, (8). Sesaat setelah peraiatan goreng dinyalakan, sampel bahan yang telah disiapkan baik yang terpasang alat ukur suhu maupun yang tidak terpasang, secara bersama-sama dituangkan dalam minyak goreng yang telah dipanaskan dengan suhu tertentu, (9). Perubahan suhu bahan selama proses penggorengan dapat langsung diamati pada monitor personal computer, data suhu bahan yang terbaca akan disimpan sementara dalam dataloger. Data suhu tersebut harus segera diimpor dan disimpan dalam disket, (10). Sedangkan untuk pengukuran kadar air dan kadar minyak bahan selama penggorengan dilakukan dengan cara mengambil sampel bahan yang sedang digoreng secara periodik sesuai waktu yang telah ditentukan. Masing-masing sampel bahan yang telah selesai digoreng kemudian diukur kadar air dan kadar minyaknya. Kadar air diukur menggunakan metode gravimetric dan kadar minyak bahan diukur dengan metode soxhlet. (11). Terhadap bahan yang telah selesai digoreng disamping diukur kadar air dan kadar minyaknya, juga dilakukan uji organoleptik untuk mengetahui kriteria kualitatif kemasakan bahan yang optimum. (12). Data observasi yang meliputi suhu, kadar air dan kadar minyak selanjutnya akan digunakan untuk menguji kesahihan model yang telah dikembangkan.

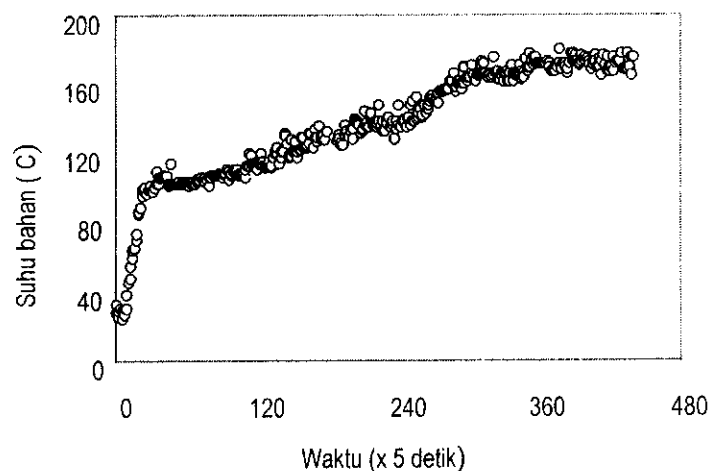
Analisa data

Model matematik dikembangkan berbasiskan pada hukum-hukum kekekalan energi, kekekalan massa, *Fourier* tentang konduksi dan *Fick* tentang difusi. Data riwayat suhu, kadar air dan kadar minyak hasil simulasi model matematik diverifikasi dengan data hasil pengukuran. Uji validitas untuk mengetahui keandalan model dilakukan dengan cara membandingkan hasil observasi simulasi. Analisa untuk uji validitas dilakukan secara grafis dan penentuan nilai r^2 (koefisien determinasi).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses penggorengan merupakan proses transfer panas dan transfer massa yang berlangsung secara simultan (Sahin et al., 1999). Transfer panas berupa perpindahan panas dari sumber panas (elemen pemanas) ke bahan melalui media minyak goreng dan transfer massa berupa perpindahan massa air dari dalam ke permukaan bahan yang kemudian diakhiri dengan penguapan air serta transfer massa minyak dari permukaan ke dalam bahan.

Adanya transfer panas dari minyak ke dalam bahan menyebabkan suhu bahan naik (Gambar 3), mula-mula suhu bahan sama dengan suhu lingkungan sekelilingnya (28.5°C) dan akhirnya suhu bahan akan menyamai suhu minyak goreng (180°C). Gambar 3 menunjukkan riwayat suhu hasil pengukuran bahan makanan berpati selama penggorengan, pada awal waktu penggorengan suhu bahan terendah (28.5°C), dalam waktu yang sangat singkat (di bawah 5 menit) suhu bahan mengalami kenaikan yang sangat cepat untuk menyamai suhu penguapan air (100°C), kemudian suhu bahan konstan beberapa saat (selama lebih kurang 2 sampai 3 menit) pada kisaran suhu 100°C, kemudian suhu bahan perlahan-lahan naik menyamai suhu minyak goreng (180°C), sampai pada akhir penggorengan suhu bahan relatif tetap pada 180°C. (Farkas et al., 1996a, Farkas et al., 1996b; Sahin et al., 1999) Proses kenaikan suhu bahan yang digoreng dipengaruhi oleh kecepatan transfer panas dari minyak ke dalam bahan, transfer panas dari minyak goreng ke bahan terjadi secara konveksi dan transfer panas dalam bahan terjadi secara konduksi (Costa et al., 1999)



Gambar 3. Riwayat suhu observasi bahan makanan berpati selama penggorengan, suhu diukur pada pusat bahan, suhu minyak dikendalikan pada 180°C, waktu penggorengan selama 36 menit

Kecepatan proses transfer panas antara lain dipengaruhi oleh sifat-sifat termis bahan (k dan C_p), kadar air awal bahan, suhu minyak goreng, sedangkan nilai k dan C_p bahan secara simultan bervariasi dengan perubahan suhu dan kadar air bahan. Kasus pada penelitian ini diduga proses transfer panas juga dipengaruhi oleh panas reaksi dan konstante kecepatan reaksi pada bahan akibat adanya pemanasan (persamaan (3)). Estimasi parameter menggunakan metode Hooke – Jeeves (Mickley et al., 1957) dari data hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nilai k dan C_p masing-masing merupakan fungsi suhu bahan (T) dan kadar air bahan (Ka) seperti berikut ini :

$$k = 2.462E-04 + 6.204E-06 T + 2.509E-04 Ka \dots\dots (18)$$

$$C_p = 2.081E+04 + 1.990E-05 T + 8.000E-04 Ka \dots (19)$$

dimana nilai k adalah konduktifitas panas bahan ($W/m^{\circ}C$), C_p adalah panas spesifik bahan ($J/kg^{\circ}C$), T adalah suhu bahan ($^{\circ}C$) dan Ka adalah kadar air bahan (%).

Pada bahan makanan nilai k dan C_p juga merupakan fungsi dari fraksi massa penyusunnya, yaitu X_c = fraksi massa karbohidrat, X_p = fraksi massa protein, X_f = fraksi massa lemak, X_a = fraksi massa abu dan X_w = fraksi massa air, seperti ditunjukkan oleh Heldman dan Singh (1981) dalam Singh (2001) berikut ini :

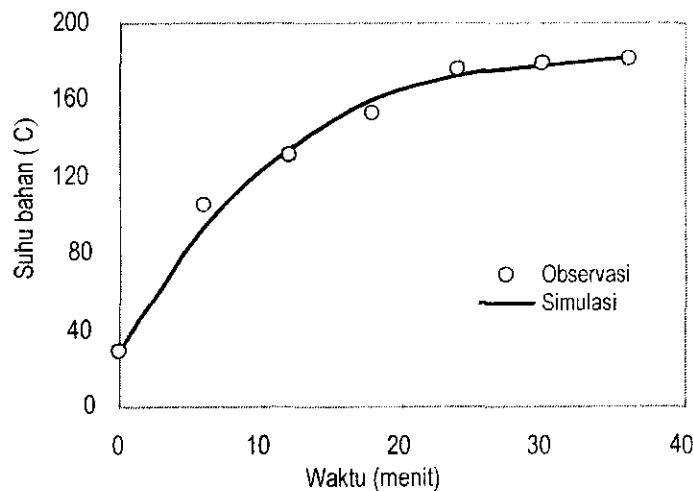
$$k = 0,25 X_c + 0,155 X_p + 0,16 X_f + 0,135 X_a + 0,58 X_w \dots\dots\dots (20)$$

$$C_p = 1,424 X_c + 1,549 X_p + 1,675 X_f + 0,837 X_a + 4,187 X_w \dots\dots\dots (21)$$

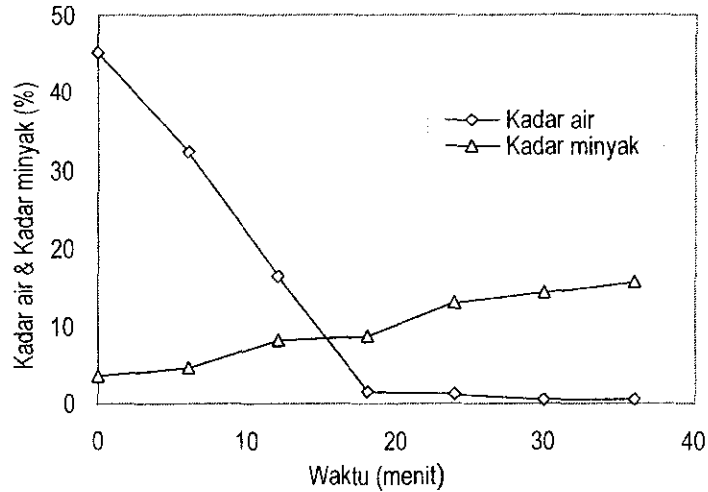
Oleh karena sifat-sifat termis bahan (k dan C_p) tersebut merupakan fungsi suhu dan kadar air bahan, sedangkan suhu bahan akan dipengaruhi oleh

suhu minyak maka dapat dikatakan bahwa suhu minyak goreng dan kadar air awal bahan adalah faktor dominan yang menentukan kecepatan proses transfer panas pada bahan dan sekaligus kenaikan suhu bahan. Model matematik transfer panas yang ditunjukkan pada persamaan (3) dapat digunakan untuk memprediksi riwayat suhu bahan makanan selama penggorengan, grafik riwayat suhu hasil simulasi model matematik tersebut dilukiskan pada Gambar 4. Pada Gambar 4 tampak bahwa garis simulasi suhu bahan berdekatan dengan titik titik suhu hasil observasi. Kedekatan nilai-nilai tersebut secara statistik juga ditunjukkan dengan nilai koefisien determinasi (r^2) sebesar 0.991 ($r^2 > 0.75$), nilai r^2 tersebut menunjukkan bahwa model valid untuk memprediksi riwayat suhu bahan makanan selama proses penggorengan (Edwards, 1976).

Krokida et al., (2000) telah melakukan pengamatan terhadap penurunan kadar air dan kenaikan kadar minyak pada bahan selama penggorengan, namun belum mengungkap secara matematik proses yang menyebabkan terjadinya kedua peristiwa tersebut. Pada penelitian ini peristiwa penurunan kadar air dan kenaikan kadar minyak bahan makanan berpati selama penggorengan ditunjukkan pada Gambar 5. Perubahan kadar air bahan pada awal penggorengan sampai pada menit ke 18 terjadi sangat cepat dengan kadar awal 45% hingga 1.58%, selanjutnya kadar air bahan relatif konstan hingga akhir penggorengan yaitu dengan kadar air akhir 0.41%. Gambar 5 juga menggambarkan fenomena kenaikan kadar minyak bahan, pada awal penggorengan hingga menit yang ke-6 penambahan kadar minyak masih relatif sedikit dari kadar minyak awal (3.50%) menjadi 4.74%, pada menit ke-12 hingga akhir penggorengan (menit ke-36) terjadi peningkatan kadar minyak yang mendekati linier dari 8.29% sampai 15.73%



Gambar 4. Riwayat suhu observasi dan simulasi bahan makanan berpati selama penggorengan, suhu terukur dan dihitung ditampilkan pada selang waktu setiap 6 menit, suhu minyak dikendalikan pada 180°C, waktu penggorengan selama 36 menit

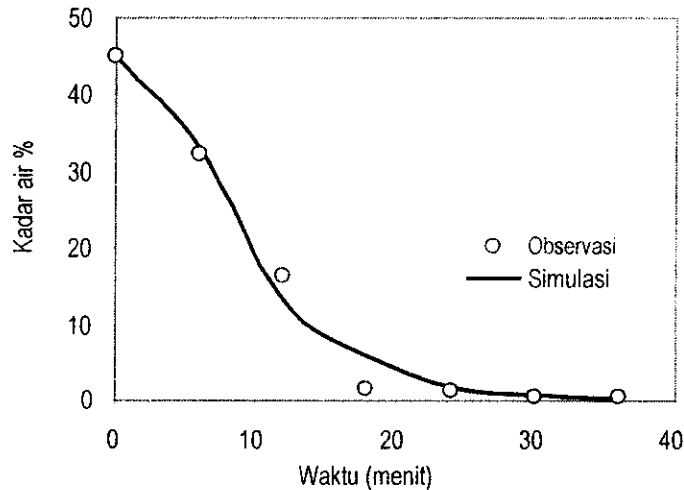


Gambar 5. Riwayat kadar air dan kadar minyak observasi bahan makanan berpati selama penggorengan, kadar air dan kadar minyak bahan diukur

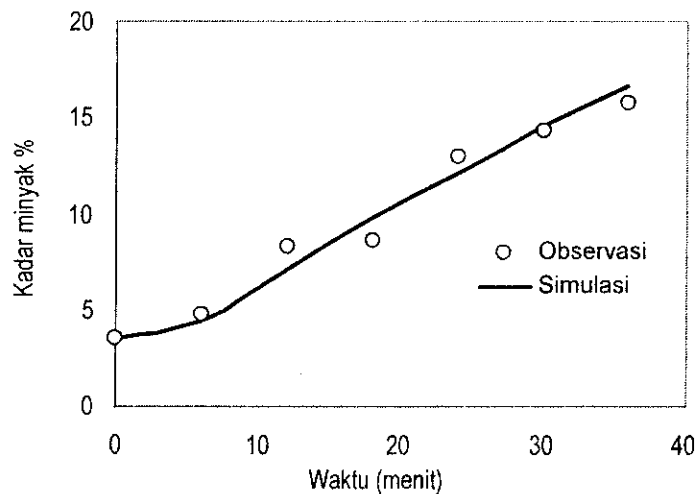
Proses transfer massa air dan massa minyak pada bahan makanan berpati tersebut di atas terjadi karena proses difusi yang disebabkan karena adanya perbedaan konsentrasi baik air ataupun minyak antara permukaan dan di dalam bahan. Proses difusi air dari dalam ke permukaan bahan dan difusi minyak dari permukaan ke dalam bahan berlangsung bersamaan (simultan) dengan proses transfer panas dari permukaan ke dalam bahan, apabila terjadi perubahan suhu bahan maka pada saat yang bersamaan akan terjadi perubahan kadar air dan perubahan kadar minyak. Kecepatan proses transfer massa air dipengaruhi oleh sifat difusifitas air dalam padatan (D_w) dan kecepatan proses transfer massa minyak dipengaruhi oleh sifat difusifitas minyak dalam padatan (D_o). Air yang berada di permukaan bahan akan cepat menjadi uap karena adanya kontak langsung dengan minyak goreng yang memiliki suhu di atas titik didih air, akibatnya konsentrasi air pada permukaan bahan selalu lebih rendah dibandingkan konsentrasi air yang berada di dalam bahan. Massa air akan terdifusi dari dalam ke permukaan bahan secara kontinyu sampai akhir penggorengan, sebagian kecil air akan tersisa dalam bahan sebagai kadar air akhir bahan masak goreng. Sebagaimana air, konsentrasi minyak juga berbeda antara permukaan dan di dalam bahan. Permukaan bahan yang langsung kontak dengan minyak goreng memiliki konsentrasi minyak lebih tinggi dibandingkan dengan di dalam bahan, akibatnya proses difusi minyak berlangsung dari permukaan ke dalam bahan. Minyak akan masuk ke dalam bahan menempati pori-pori yang ditinggalkan oleh air (Pinthus et al., 1995), proses difusi minyak akan berlangsung terus sampai akhir penggorengan bahkan pada waktu pendinginan pasca penggorengan (Pinthus & Sagui, 1994; Moreira &

Barrufet, 1998). Proses transfer massa air dan massa minyak selama penggorengan dapat dimodelkan matematik, model transfer massa air dinyatakan pada persamaan (9) dan persamaan (13) menyatakan model transfer massa minyak. Riwayat kadar air simulasi dan kadar minyak simulasi masing-masing ditunjukkan pada Gambar 6. dan Gambar 7. Pada Gambar 6. ditunjukkan bahwa garis kadar air simulasi akan berada di dekat titik-titik kadar air observasi, demikian juga dengan Gambar 7. menunjukkan bahwa garis kadar minyak prediksi berdekatan dengan titik-titik kadar minyak observasi. Analisa statistik juga menunjukkan bahwa titik-titik simulasi berdekatan dengan titik-titik observasi, baik untuk riwayat kadar air maupun kadar minyak. Kedekatan antara titik-titik observasi dan simulasi ditunjukkan dengan nilai koefisien determinasi (r^2), dengan nilai r^2 masing-masing untuk r^2 riwayat kadar air sebesar 0.9896 ($r^2 > 0.75$) dan untuk r^2 riwayat kadar minyak sebesar 0.9714 ($R^2 > 0.75$), masing-masing nilai R^2 tersebut menunjukkan bahwa masing-masing model valid untuk memprediksi riwayat kadar air dan kadar minyak bahan makanan selama proses penggorengan (Edwards, 1976).

Untuk kepentingan aplikasi lebih lanjut, model-model matematik yang telah dikembangkan dapat digunakan untuk memprediksi riwayat suhu, kadar air dan kadar minyak bahan makanan selama penggorengan tanpa harus melakukan pengukuran secara langsung asalkan peralatan goreng, kondisi proses maupun bentuk dan perlakuan bahan yang digoreng sama dengan peralatan goreng, kondisi proses maupun bentuk dan perlakuan bahan yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 6. Riwayat kadar air observasi dan simulasi bahan makanan berpati selama penggorengan, kadar air terukur dan terhitung ditampilkan pada selang waktu setiap 6 menit, suhu minyak dikendalikan pada 180°C, waktu penggorengan selama 36 menit



Gambar 7. Riwayat kadar minyak observasi dan simulasi bahan makanan berpati selama penggorengan, kadar minyak terukur dan terhitung ditampilkan pada selang waktu setiap 6 menit, suhu minyak dikendalikan pada 180°C, waktu penggorengan selama 36 menit

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Hasil simulasi secara simultan terhadap suhu, kadar air dan kadar minyak dapat menghasilkan riwayat suhu, kadar air dan kadar minyak yang mendekati nilai observasi dengan nilai r^2 mendekati 1 (satu). Masing masing nilai : r^2 simulasi suhu = 0.991, r^2 simulasi kadar air = 0.9896 dan nilai r^2 simulasi kadar minyak = 0.9714

Model matematik yang dikembangkan masing-masing untuk prediksi suhu, kadar air dan kadar minyak terbukti valid.

Saran

Model matematik masih perlu dikembangkan lagi untuk meningkatkan validitasnya dengan cara mengurangi asumsi-asumsi yang diberlakukan, misalnya dengan mempertimbangkan massa air yang hilang karena penguapan dan adanya pemekaran bahan makanan berpati akibat adanya perlakuan panas dan kadar air.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada pihak pihak yang membantu membiayai sebagian penelitian ini, yaitu : Dirjen Dikti Depdiknas melalui program BPPS, Departemen Agama melalui Bantuan Biaya Pendidikan bagi tenaga pengajar Perguruan Tinggi Agama Islam Swasta dan Yayasan Pendidikan Islam "45" Bekasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N. (1960). *Transport Phenomena*. John Wiley and Sons, Inc., New York, N. Y.
- Costa, R. M., Fernanda, A. R., Delaney, O., Gekas, V. (1999). *Analysis of The Heat Transfer Coefficient during Potato Frying*. Journal of Food Engineering, 39 : 293 –299.
- Edwards, A.L., 1976. *an Introduction to Linier regression on Correlation For India*, National Seed Corporation, New delhi.
- Farkas, B. E., Singh, R. P. dan Rumsey, T. (1996a). *Modelling Heat and Mass Transfer in Immersion Frying. I. Model Development*. Journal of Food Engineering, 29, 211-226
- Farkas, B. E., Singh, R. P. dan Rumsey, T. (1996b). *Modelling Heat and Mass Transfer in Immersion Frying. II. Model Solution and Verification* Journal of Food Engineering, 29, 227-248
- Gekas, Vassilis. (1992). *Transport Phenomena of Foods and Biological Materials*. CRC Press, Boca Raton Ann Arbor London Tokyo.
- Gould, W. A. (1996). *Unit Operations for The Food Industries*. CTI Publications, Inc. 2 Oakway Road, Timonium, Maryland 21093-4247 USA.
- Krokida, M. K., Oreopoulou, V. and Maroulis, Z. B. (2000). *Effect of Frying Conditions on Shrinkage and Porosity of Fried Potatoes*. Journal of Food Engineering, 43, 147 – 154.
- Krokida, M. K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z. B. and Marinos-Kouris, D. (2001a). *Colour Changes during Deep Fat Frying*. Journal of Food Engineering, 48, 219 – 225.
- Krokida, M. K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z. B. and Marinos-Kouris, D. (2001b). *Deep Fat Frying of Potato Strips – Quality Issues*. Drying Technology, 19(25) : 879 – 935.
- Mickley, H.S., Sherwood, T.S., and Reed, C.E., 1957. *Applied Mathematics in Chemical Engineering*, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York.
- Moreira, R. G. and Barrufet, M. A. (1996). *Spatial Distribution of Oil After deep-fat Frying Tortilla Chips from a Stochastic Model*. Journal of Food Engineering, 27, 279 – 290.
- Moreira, R. G. Sun Xiuzhi, Chen Youhong. (1997). *Factors Affecting oil Uptake in Tortilla Chips in deep-fat frying*. Journal of Food Engineering, 31, 485 – 498.
- Moreira, R. G. and Barrufet, M. A. (1998). *A New Approach to Describe oil adsorption in fried foods : a simulation studi*. Journal of Food Engineering, 35, 1 – 22.
- Okos, M. R., Narsimhan, G., Singh, R. K., and Weitnauer, A. C. (1992). *Food Dehydration*. In *Handbook of Food Engineering*, Edited by D. R. Heldman and D. B. Lund, Marcel Dekker, New York.
- Pinthus, E. J. and Sagui, I. S. (1994). *Initial Interfacial Tension and Oil Uptake by Deep-Fat Fried Foods*. Journal of Food Science, 59 (4), 804-807.
- Pinthus, E. J., Weinberg, P., Sagui, I. S. (1995). *Oil Uptake in Deep-Fat Frying as Affected by Porosity*. Journal of Food Science, 60 (4), 767-769.
- Pinthus, E. J., Weinberg, P., Sagui, I. S. (1995). *Deep-Fat Fried Potato Product Oil Uptake as Affected by Crust Physical Properties*. Journal of Food Science, 60 (4), 770-772.
- Sahin, S., Sastry, S. K., Bayindirli, L. (1999). *The Determination of Convective Heat Transfer Coefficient During Frying*. Journal of Food Engineering, 39 ; 307 – 311.
- Singh, R. P. and Heldman, D. R. (1993). *Introduction to Food Engineering*. 2nd Edition. Academic Press, Inc., New York, NY.
- Whitaker, S. (1977a). *Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media : a theory of drying*. In : *Advances in Heat Transfer*, Vol. 13. James P. Harnett and Thomas F. Irvine, Jr (eds). Academic Press, pp. 119 – 202

LAMBANG DAN SIMBUL

Lambang dan Simbul	Arti
A	= Luas penampang melintang (m^2)
a,b,c	= Konstante
C_{pi}	= Panas spesifik dari i ($J/kg^{\circ}C$)
$D_{\beta\sigma}$	= Diffusivitas (m^2/S)
h_1	= Koef. Trans panas konveksi, konveksi bebas ($W/m^{20}C$)
h_2	= Koef. Trans panas konveksi, batas didih ($W/m^{20}C$)
ΔH_c	= Energi untuk pemasakan (W/m^2)
ΔH_g	= Energi untuk gelatinisasi (W/m^2)
k_{eff}	= Konduktivitas panas efektif bagian i ($W/m^{\circ}C$)
K_y	= Koefisien transfer panas konveksi ($kg.mol/dt.Pa.m^2$)
L	= Setengah ketebalan bahan (m)
N_{ix}	= Fluks spesies arah sumbu -x (kg/m^2dt)
q_x	= Fluks panas arah sumbu -x (W/m^2)
R^2	= Koefisien korelasi
t	= Waktu (detik)
T	= Suhu ($^{\circ}C$)
T_G	= Suhu gelatinisasi ($^{\circ}C$)
T_c	= Suhu bahan masak ($^{\circ}C$)
X	= Kadar
Z	= Jarak
Subskrip	Arti
w	= Air
o	= Minyak