

## MODEL MATEMATIK PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA PROSES PENGGORENGAN BUAH PADA KEADAAN HAMPA<sup>1</sup>

Jamaluddin<sup>2</sup>, Budi Rahardjo<sup>3</sup>, Pudji Hastuti<sup>4</sup> dan Rochmadi<sup>5</sup>

### ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan secara simultan model matematik perpindahan panas dan massa proses penggorengan buah pada keadaan hampa (dibawah tekanan atmosfer). Sampel penelitian adalah buah nangka digoreng pada berbagai variasi suhu, waktu dan tekanan vakum. Parameter yang diamati adalah perubahan kadar air dan kadar minyak bahan. Metode penyusunan elemen perpindahan panas dimodelkan dengan model fisik "lump capacitance" berdasarkan hukum Fourier, sedangkan perpindahan massa dimodelkan dengan hukum Ficks. Secara simultan model perpindahan panas dan massa dibuat dalam suatu sistem persamaan diferensial dengan memasukkan kondisi bahan baku kedalam model, kemudian diselesaikan dengan *Program Turbo Basic* untuk memperoleh kesesuaian data percobaan dengan prediksi. Model matematik perpindahan panas dan massa kemudian diverifikasi dan diuji kepekaannya sesuai dengan data percobaan, selanjutnya hasilnya digunakan untuk menemukan pengaruh suhu, tekanan vakum dan lama penggorengan terhadap perubahan kadar air dan kadar minyak akhir dalam bahan. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa model matematik yang telah dikembangkan cukup baik untuk menjelaskan fenomena perpindahan panas dan massa proses penggorengan buah pada keadaan hampa.

---

<sup>1</sup> Disampaikan dalam Gelar Teknologi dan Seminar Nasional Teknik Pertanian 2008 di Jurusan Teknik Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian UGM, Yogyakarta 18-19 November 2008

<sup>2</sup> S3 Teknik Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Gadjah Mada

<sup>3</sup> Staf Pengajar Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Gadjah Mada

<sup>4</sup> Staf Pengajar Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Gadjah Mada

<sup>5</sup> Staf Pengajar Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada

## A. PENDAHULUAN

Tanaman nangka adalah salah satu jenis buah-buahan yang bernilai ekonomis tinggi amat potensial dirancang sebagai sumber pendapatan ekonomi rumah tangga masyarakat tani, industri kecil, industri menengah dan devisa negara. Bagian tanaman nangka yang sudah populer dikembangkan saat ini adalah buah nangka, yang diolah dengan proses penggorengan secara vakum menjadi keripik nangka. Penggorengan buah nangka menjadi keripik nangka, adalah sebagai salah satu usaha penganekaragaman produk untuk meningkatkan kuantitas dan kualitas buah nangka. Saat ini keripik nangka sudah cukup populer dikonsumsi oleh masyarakat, karena keripik nangka mempunyai sifat yang khas, nikmat, enak, gurih dan renyah jika dikunyah, sehingga permintaan konsumen terhadap keripik nangka semakin meningkat. Namun yang menjadi permasalahan adalah bahwa nampaknya standarisasi mutu produk keripik nangka belum banyak diketahui saat ini, sehingga diperlukan pengendalian terhadap proses penggorengan buah nangka agar diperoleh produk keripik nangka sesuai dengan standar mutu yang diharapkan.

Selama penggorengan, terjadi secara simultan perpindahan panas dan massa. Perpindahan panas terjadi dari minyak panas ke permukaan bahan dan merambat ke dalam sehingga kandungan air bahan keluar dalam bentuk uap air ke permukaan, kemudian bahan menyerap minyak (perpindahan massa). Kondisi ini menyebabkan banyak perubahan dalam bahan, baik secara fisik maupun kimiawi pada bahan yang digoreng. Perubahan secara fisik antara lain pemasakan menjadi lebih cepat, garing, perubahan volume, memiliki tekstur yang renyah dan pengembangan rasa, sedangkan perubahan secara kimiawi antara lain penguapan air, penyerapan minyak, gelatinisasi pati, denaturasi protein, pencoklatan dan karamelisasi (Varela et. al., 1988; Farkas, Sing dan Rumsey, 1996).

Berbagai pendekatan telah dilakukan untuk menggambarkan kondisi dan perubahan yang terjadi selama proses penggorengan bahan pangan. Moreira et. al., (1995) dan Jung et. al., (2003) menjelaskan bahwa pada penggorengan vakum terbentuknya lapisan keras menjadi lambat sehingga memberi kesempatan penguapan air dari dalam sebelum produk menjadi kering, dengan warna produk yang cerah. Atteba dan Mittal (1994) telah mengembangkan model untuk memprediksi penyebaran panas, uap dan minyak pada penggorengan bakso daging menggunakan persamaan difusi untuk penyebaran panas dan uap, penyebaran minyak selama masa absorpsi dan persamaan aliran kapiler untuk penyebaran minyak selama masa desorpsi, akan tetapi permasalahan yang belum berhasil dijelaskan adalah pengaruh kondisi

bahan baku terhadap peristiwa perpindahan massa dan panas secara simultan selama proses penggorengan.

Pengembangan model matematik secara lebih detail yang menjelaskan perubahan yang mungkin terjadi selama proses penggorengan telah berhasil dikembangkan dengan baik oleh Kawas dan Moreira (1996); Lujan et. al., (1996); Math et. al., (2003); Yamsaengsung dan Moreira (2002). Hasil-hasil penelitian tersebut berhasil menjelaskan bahwa penggorengan dapat merubah struktur produk dengan fenomena pengerutan, pemekaran, kepadatan, perubahan tekstur dan kimiawi pada bahan yang digoreng. Meskipun model matematik yang telah dikembangkan sudah cukup detail namun belum memasukkan ke dalam model kemungkinan adanya energi panas yang dibutuhkan untuk proses gelatinisasi, perubahan fase, dan pemasakan bahan.

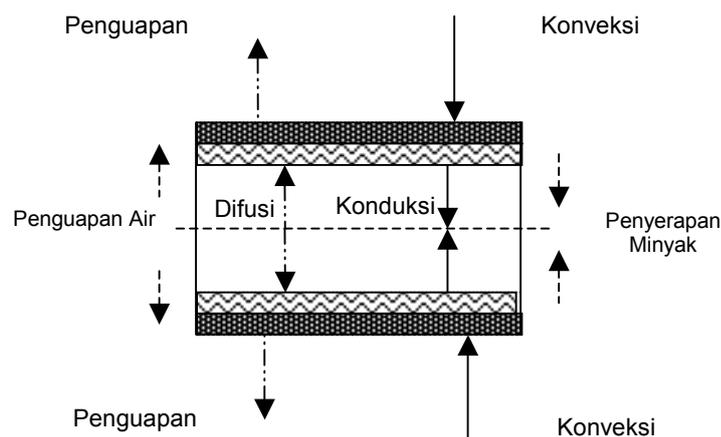
Whitaker (1977) dan Asensio (1999) mengembangkan model untuk menjelaskan perpindahan panas dan massa pada pengeringan kertas, penghilangan air yang terikat dianggap sebagai penyebab pengerutan pada struktur sel bahan. Penelitian tersebut berhasil menjelaskan sebagian gejala perpindahan panas dan massa yang belum terungkap pada penelitian sebelumnya. Namun permasalahan yang belum dijelaskan adalah pengaruh kondisi bahan baku terhadap fenomena perpindahan panas dan massa selama proses penggorengan dan hubungan secara empiris kadar air bahan mentah dengan perubahan volume dengan hanya melihat pada dimensi bahan .

Penelitian lebih menyeluruh selama proses penggorengan pada makanan berpati telah dilakukan oleh Supriyanto, et. al, (2007) dan memodelkan secara baik untuk menggambarkan fenomena pemanasan, penurunan kadar air dan peningkatan kadar minyak pada bahan makanan sumber pati. Akan tetapi penelitian tersebut belum mengungkap kondisi bahan baku dengan perubahan tekstur produk. Padahal proses ini sangat perlu untuk dimasukkan ke dalam model. Hal ini menunjukkan bahwa, selama penggorengan banyak perubahan yang tidak diinginkan bisa terjadi pada bahan yang digoreng jika tidak dikontrol dengan baik, karena itu proses yang beragam ini harus dapat dikendalikan sedemikian rupa, sehingga tidak merusak mutu produk. Salah satunya adalah dengan cara mengontrol suhu, waktu, tekanan penggorengan dan mempertimbangkan kondisi bahan baku. Sejauh ini belum banyak penelitian yang memperlihatkan hubungan secara simultan antara perpindahan panas dan massa yang terjadi selama proses penggorengan vakum (dibawah tekanan atmosfer).

Diharapkan dengan pemahaman dan pengkajian lebih mendalam untuk menemukan model matematik, maka fenomena perpindahan panas dan massa, akan memungkinkan dilakukan rekayasa kualitas pada produk goreng untuk dapat memenuhi selera konsumen dalam usaha menyelaraskan dengan isu kesehatan, sehingga dapat dihasilkan produk yang lebih berkualitas untuk pengembangan teknologi dalam proses penggorengan vakum.

## B. LANDASAN TEORI DAN PENGEMBANGAN MODEL

Selama penggorengan, panas dipindahkan dari media penggoreng kepermukaan bahan secara konveksi, dan dari permukaan bahan ke bagian dalam bahan secara konduksi. Perpindahan panas secara konveksi terjadi karena adanya aliran yang melalui bahan dengan suhu yang berbeda. Gambar 1 menunjukkan susunan mekanisme dan arah penyebaran panas dan uap selama proses penggorengan bahan.



Gambar 1. Mekanisme perpindahan panas dan massa proses penggorengan buah pada keadaan hampa

Perpindahan panas secara konveksi biasanya diikuti dengan perpindahan panas secara konduksi, setelah terjadinya kontak antara bahan dengan cairan maupun gas pada suhu yang berbeda (Isochenko, 1969).

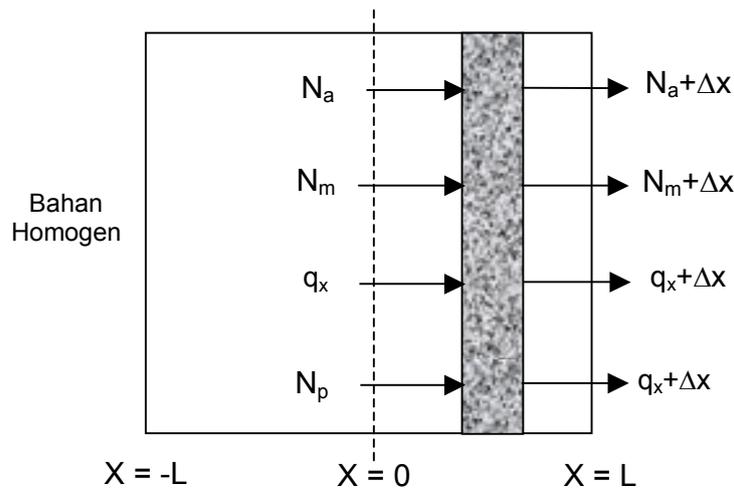
### 1. Perpindahan Massa dan Panas

Penggorengan adalah proses perpindahan panas dan uap air secara simultan yang memerlukan energi panas untuk menguapkan kandungan air bahan yang dipindahkan dari permukaan bahan yang digoreng dengan minyak sebagai media penghantar panas. Tujuan penggorengan adalah mengurangi kadar air bahan, kehilangan kadar air selama

penggorengan merupakan akibat dari penguapan karena pemanasan. Kadar air merupakan parameter penting untuk diterima oleh konsumen karena akan menentukan sifat keripik.

Lewis dalam Pudja (2003) menggunakan analogi dengan hukum pendinginan Newton dengan analisis pengeringan. Dengan asumsi bahwa laju kehilangan lengas dari sebutir bijian yang dikelilingi oleh udara pengering sebanding dengan perbedaan antara kadar air bijian dan kadar air setimbang. Krokida, M. K., (2000) menyederhanakan persamaan Lewis dalam Pudja (2003) dan menemukan model persamaan untuk penguapan air. Menurut Supriyanto et. al., (2007), perpindahan massa yang terjadi dalam proses penggorengan ada dua, yaitu penguapan air dan penyerapan minyak. Bahan makanan mengalami penurunan kadar air selama proses penggorengan dalam dua cara, pertama transfer massa air terjadi dari dalam ke permukaan bahan kemudian menguap kelingkuangan, dan kedua perubahan massa air menjadi uap terjadi di dalam bahan.

Selama penggorengan produk menyerap minyak dan kadar minyak dalam produk biasanya dihubungkan dengan kadar air awal bahan (Gamble, Rice, dan Selman, 1987; Moreira, Palau, Sweat dan Sun, 1995). Minyak sebagai medium pemanas dan penghantar panas memiliki sifat yang tidak dapat menyatu dengan air padahal buah-buahan banyak mengandung air, karena sifat alami air dan minyak yang tidak dapat menyatu, keduanya memegang peranan penting dalam proses penggorengan. Temperatur penggorengan yang tinggi menyebabkan air dalam bahan makanan menjadi panas dan terpompa keluar kedalam minyak disekitarnya dalam bentuk uap air. (Varela, dkk, 1988) dalam R. G. Math, 2003). Sebagian air akan menguap dari ruang kosong yang semula diisi air kemudian diisi oleh minyak (Ardianingmunir S, et. al., 2007). Menurut Pinthus dan saguy, (1993) mekanisme absorpsi minyak pada bahan makanan disebabkan oleh tekanan kapiler, dan sebagian lainnya disebabkan oleh kondensasi uap pada saat memindahkan produk dari penggorengan. Sun dan Moreira (2002) menjelaskan bahwa penyerapan minyak merupakan fenomena kompleks yang terjadi ketika produk diangkat atau dipindahkan dari penggorengan selama periode pendinginan. Jumlah kandungan minyak yang diserap oleh bahan setelah digoreng dapat menentukan penerimaan dan kenampakan produk (Krokida et. al., 2000). Supriyanto, et. al., (2007) menyatakan massa minyak masuk ke dalam bahan dengan cara difusi karena adanya perbedaan konsentrasi minyak pada bagian permukaan dengan bagian dalam bahan.



Gambar 2. Neraca panas dan massa di elemen volum padatan

Neraca massa setiap komponen yang ada di dalam elemen volume padatan dijelaskan dalam Gambar 2. Laju massa yang mengalir melewati bahan padatan setebal  $x$  dan seluas  $A$  dengan cara difusi dapat dijelaskan dengan hukum Fick.

$$N_A = -D_{AB} \cdot \frac{\partial C_A}{\partial x} \quad (1)$$

Berdasarkan Gambar 2 tersebut kemudian disusun neraca massa sebagai berikut.

#### a. Neraca Massa Air di Padatan

Persamaan keseimbangan massa air pada elemen volume setebal  $\Delta x$ , luas  $A_\phi$  dari  $x$  ke  $x+\Delta x$  dijabarkan.

$$\left( -A_\phi \cdot D_a \cdot \frac{\partial C_a}{\partial x} \Big|_x \right) - \left( -A_\phi \cdot D_a \cdot \frac{\partial C_a}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} + r_g (A_\phi \cdot \Delta x) + r_{pf} (A_\phi \Delta x) \right) = A_\phi \cdot \Delta x \frac{\partial \bar{C}_a}{\partial t} \quad (2)$$

$$-A_\phi \cdot D_a \cdot \frac{\partial C_a}{\partial x} \Big|_x + A_\phi \cdot D_a \cdot \frac{\partial C_a}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} = A_\phi \cdot \Delta x \frac{\partial \bar{C}_a}{\partial t} + r_g (A_\phi \cdot \Delta x) + r_{pf} (A_\phi \Delta x) \quad (3)$$

$$\frac{-D_a \cdot \frac{\partial C_a}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} + D_a \cdot \frac{\partial C_a}{\partial x} \Big|_x}{\Delta x} = \frac{\partial \bar{C}_a}{\partial t} + r_g + r_{pf} \quad (4)$$

Bila diambil  $\Delta x \rightarrow 0$ , maka diperoleh:

$$\frac{\partial^2 C_a}{\partial x^2} = \frac{1}{D_a} \left( \frac{\partial \bar{C}_a}{\partial t} + r_g + r_{pf} \right) \quad (5)$$

Kondisi awal (*initial condition/IC*) :

$$t = 0 \rightarrow C_a(x, 0) = C_{a0} \text{ untuk semua posisi } x \quad (6)$$

Kondisi batas (*boundary condition/BC*) :

$$x = 0 \rightarrow \left. \frac{\partial C_a}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (7)$$

$$x = L \rightarrow -D_a \left. \frac{\partial C_a}{\partial x} \right|_{x=L} = K_a (C_a - C_a^*) \quad (8)$$

### b. Neraca Massa Minyak di Padatan

Persamaan keseimbangan massa minyak pada elemen volume setebal  $\Delta x$ , luas  $A_\phi$  dari  $x$  ke  $x+\Delta x$  dijabarkan.

$$\left( -A_\phi \cdot D_m \cdot \left. \frac{\partial C_m}{\partial x} \right|_x \right) - \left( -A_\phi \cdot D_m \cdot \left. \frac{\partial C_m}{\partial x} \right|_{x+\Delta x} \right) = A_\phi \cdot \Delta x \frac{\partial \bar{C}_m}{\partial t} \quad (9)$$

$$\frac{-D_m \cdot \left. \frac{\partial C_m}{\partial x} \right|_{x+\Delta x} + D_m \cdot \left. \frac{\partial C_m}{\partial x} \right|_x}{\Delta x} = \frac{\partial \bar{C}_m}{\partial t} \quad (10)$$

Bila diambil  $\Delta x \rightarrow 0$ , maka diperoleh:

$$\frac{\partial^2 C_m}{\partial x^2} = \frac{1}{D_m} \left( \frac{\partial \bar{C}_m}{\partial t} \right) \quad (11)$$

Kondisi awal (*initial condition/IC*) :

$$t = 0 \rightarrow C_m(x, 0) = C_{m0} \text{ untuk semua posisi } x \quad (12)$$

Kondisi batas (*boundary condition/BC*) :

$$x = 0 \rightarrow \left. \frac{\partial C_m}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (13)$$

$$x = L \rightarrow -D_m \left. \frac{\partial C_m}{\partial x} \right|_{x=L} = K_m (C_m - C_m^*) \quad (14)$$

### c. Neraca Massa Pati di Padatan

Persamaan keseimbangan massa pati pada elemen volume setebal  $\Delta x$ , luas  $A_\phi$  dari  $x$  ke  $x+\Delta x$  dijabarkan.

$$-r_g \cdot (A_\phi \cdot \Delta x) = A_\phi \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial C_p}{\partial t} \quad (15)$$

$$-\frac{\partial C_p}{\partial t} = r_g \quad (16)$$

#### d. Perpindahan Panas

Proses pengeringan dan penggorengan adalah sangat mirip dan telah dibuat banyak untuk menjelaskan dan menduga kedua sistem tersebut. Persamaan dasar untuk massa dan energi adalah hampir sama, perbedaan pada model umumnya berasal dari sistem yang dijelaskan oleh model tersebut pada masing-masing kasus asumsi dan kondisi batas, mekanisme transfer dan sifat fisik untuk masing-masing sistem akan berbeda-beda. Pada proses penggorengan bahan makanan, panas yang diterima bahan digunakan antara lain; menaikkan suhu bahan dan penguapan air dari dalam bahan, proses gelatinisasi, dan pemasakan dan penguapan air lanjutan dan untuk menaikkan suhu bahan lagi.

Perpindahan panas akan dimodelkan dengan model fisik "lump capacitance". Asumsi-asumsi utama yang akan digunakan dalam menyusun model adalah sebagai berikut:

- 1) Suhu dalam bahan dianggap merata diseluruh padatan.
- 2) Transfer panas terjadi pada arah sumbu x
- 3) Transfer panas permukaan seketika sama dengan suhu bahan
- 4) Penyerapan minyak terjadi selama penggorengan, sedangkan selama pendinginan diabaikan.
- 5) Transfer massa permukaan berada pada keadaan seimbang dengan lingkungan.
- 6) Perubahan volume terjadi karena hilangnya air terikat dalam bahan.

Laju aliran panas yang mengalir melalui bahan setebal x dengan luas A dengan cara konduksi diselesaikan dengan hukum Fourier:

$$Q_x = -k.A. \frac{\partial T}{\partial x} \quad (17)$$

Berdasarkan pada Gambar 2 maka disusun neraca panas pada elemen volume setebal  $\Delta x$ ; luas  $A_\phi$  dari x ke  $x+\Delta x$ , sebagai berikut.

$$\left( -k.A \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x \right) - \left( -k.A \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} + r_g \cdot \Delta H_g + r_{pf} \cdot \Delta H_{pf} \right) A \cdot \Delta x = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (18)$$

$$\text{Dimana: } \partial Q = m.C_p. \partial T; m = A.\rho.\Delta x \quad (19)$$

$$k.A \left( \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} \right) - \left( \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x \right) = \frac{m.C_p.\partial T}{\partial t} + (r_g \cdot \Delta H_g + r_{pf} \cdot \Delta H_{pf}) A \cdot \Delta x \quad (20)$$

$$\frac{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x+\Delta x} - \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_x}{\Delta x} = \frac{\rho \cdot C_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{k} (r_g \cdot \Delta H_g + r_{pf} \cdot \Delta H_{pf}) \quad (21)$$

Bila diambil  $\Delta x \rightarrow 0$ , maka diperoleh:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{k} \left( \rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} + r_g \cdot \Delta H_g + r_{pf} \cdot \Delta H_{pf} \right) \quad (22)$$

Kondisi awal (*initial condition/IC*):

$$t = 0 \rightarrow T(x, 0) = T_0 \text{ untuk semua posisi } x \quad (23)$$

Kondisi batas (*boundary condition/BC*):

Neraca energi pada bagian tengah dan tepi bahan berlaku:

$$x = 0 \rightarrow \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (24)$$

$$x = L \rightarrow -k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = h(T_m - T_m^*) \quad (25)$$

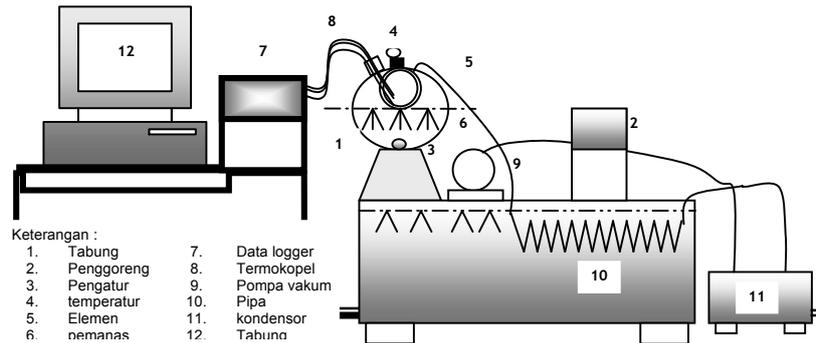
## C. BAHAN DAN METODE PENELITIAN

### 1. Bahan

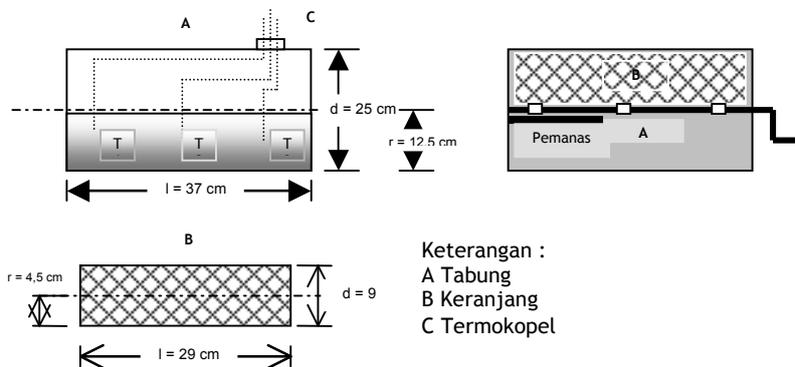
Bahan dasar dalam penelitian ini adalah buah nangka jenis nangka salak yang dibeli dari pasar tradisional Demangan Yogyakarta. Bentuk ukuran dimensi sampel; panjang 50 mm + 0,01 mm, lebar 25 mm + 0,01 mm dan tebal 3 mm + 0,01 mm. Bahan pendukung yang digunakan adalah minyak goreng jenis bimoli dengan volume 5 liter yang dibeli dari pasar tradisional Demangan Yogyakarta.

### 2. Alat

Alat pendukung yang digunakan adalah; termometer, stopwatch, gelas ukur, mikrometer, timbangan analitik, oven, eksikator, alat ukur analisa kadar air, kadar minyak. Alat utama yang digunakan untuk penggorengan sampel adalah penggorengan vakum (*vacuum frying*) dilengkapi dengan data logger sistem komputer, alat penggorengan vakum dibuat khusus untuk skala laboratorium dan dirancang sesuai dengan kebutuhan penelitian. Secara skematik bentuk alat penggorengan vakum ditunjukkan pada Gambar 3.



(a)



(b)

Gambar 3. Skematik alat penggorengan vakum (tidak berskala)  
(a) bagian utama, (b) ukuran tabung dan keranjang

### 3. Analisis Bahan

#### a. Kadar Air

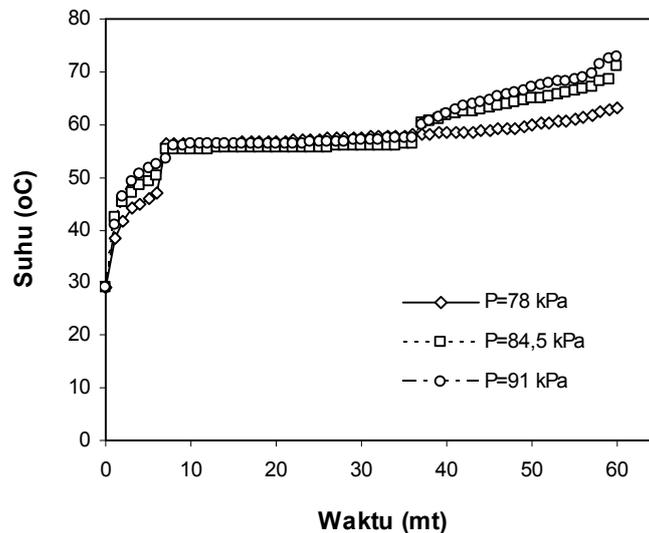
Kadar air bahan ditentukan sebelum dan sesudah penggorengan menggunakan metode oven (AOAC) dengan ukuran sampel 10 g dibuat sebanyak 3 sampel.

#### b. Kadar Minyak

Kadar minyak bahan ditentukan sebelum dan sesudah penggorengan menggunakan metode soxhlet (AOAC) dengan cara bahan dihaluskan sebelumnya dengan alat destilasi soxhlet kemudian diekstrak selama 3 sampai 4 jam dan dioven sampai mencapai berat konstan.

#### D. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Selama proses penggorengan bahan menerima energi panas dari elemen pemanas melalui media minyak goreng. Energi panas digunakan untuk menaikkan suhu bahan, proses gelatinisasi, penguapan air, dan pemasakan (Supriyanto, et. al., 2007). Diawal penggorengan suhu bahan meningkat dengan cepat sampai mencapai suhu 60°C, disebabkan karena sebagian besar energi panas yang diterima digunakan untuk menaikkan suhu bahan. Kenaikan suhu bahan pada awal penggorengan menggambarkan adanya perpindahan panas dari minyak panas ke dalam bahan. Pada saat suhu 45 – 50 °C, diduga bahan membutuhkan energi untuk proses gelatinisasi namun energi tersebut masih cukup dipenuhi oleh sumber energi panas yang tersedia sehingga tidak berpengaruh terhadap proses kenaikan suhu bahan. Gambar 4 memperlihatkan riwayat suhu proses penggorengan bahan pada keadaan hampa.

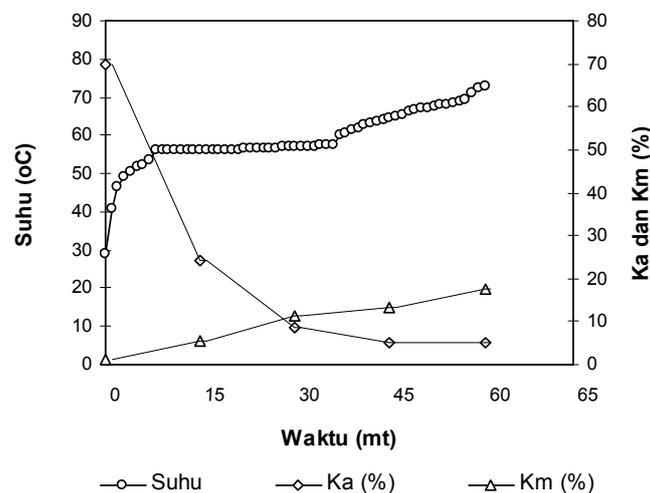


Gambar 4. Riwayat suhu proses penggorengan buah pada keadaan hampa suhu 70 °C dan tekanan 78 kPa

Pada proses penggorengan energi panas yang dibutuhkan oleh bahan tidak hanya digunakan untuk menaikkan suhu bahan, namun juga untuk proses perubahan fase air dari bentuk cair menjadi uap. Energi yang dibutuhkan selama proses perubahan fase cukup besar sedangkan pasokan energi dari sumber panas konstan, sehingga suhu bahan tidak mengalami kenaikan pada waktu tertentu. Selain itu karena adanya tekanan vakum selama proses penggorengan, maka titik didih air dan minyak turun, sehingga energi yang tersedia digunakan untuk penguapan kadar air bahan. Setelah proses perubahan fase selesai suhu bahan kembali perlahan-lahan naik mendekati atau sama dengan suhu penggorengan sampai

proses selesai. Pada kisaran suhu penggorengan 60 – 70 °C diperkirakan ada energi panas yang diserap untuk pemasakan proses bahan, akan tetapi energi yang tersedia pada saat itu cukup sehingga tidak mempengaruhi proses kenaikan suhu bahan, bahkan suhu bahan sudah cenderung konstan.

Selama proses penggorengan terjadi secara simultan perpindahan panas dari minyak panas ke bahan menyebabkan terjadinya perubahan fase air dalam bahan menjadi uap (Gambar 5). Bahan yang digoreng mengalami penurunan kadar air selama proses penggorengan. Berkurangnya air di dalam bahan terjadi dalam dua cara; pertama transfer massa air dari dalam ke permukaan bahan yang kemudian menguap kelingkuangan (dalam minyak panas), kedua perubahan massa air menjadi uap yang terjadi di dalam bahan (Yamsaengsung dan Moreira, 2002).



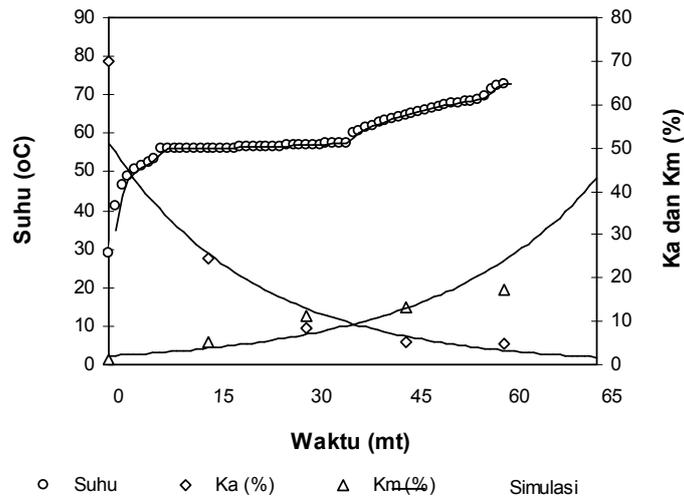
Gambar 5. Riwayat suhu, perubahan kadar air dan minyak proses penggorengan buah pada keadaan hampa suhu 70 °C dan tekanan 78 kPa

Bahan akan mengalami penurunan kadar air selama penggorengan. Penurunan kadar air dicirikan oleh adanya penguapan air dengan terjadinya gelembung gas dari permukaan bahan ke media minyak panas. Proses perpindahan massa air berlangsung dari dalam ke permukaan bahan disebabkan karena adanya perbedaan konsentrasi massa air pada bagian dalam dan permukaan. Konsentrasi massa air di permukaan bahan lebih rendah dibandingkan dengan konsentrasi massa air di bagian dalam bahan. Hal tersebut disebabkan karena air yang berada dibagian permukaan bahan lebih cepat menjadi uap karena adanya kontak langsung dengan minyak goreng yang mempunyai suhu di atas titik didih air.

Massa air terdifusi dari dalam ke permukaan bahan secara kontinyu sampai selesainya proses penggorengan. Perubahan fase yang dialami oleh sebagian massa air yang berada di dalam bahan yang digoreng disebabkan karena adanya perubahan suhu yang melebihi suhu titik didih air. Adanya perbedaan tekanan antara ruang penggorengan dengan tekanan atmosfer, mengakibatkan bahan akan kehilangan uap air lebih cepat. Peristiwa ini terjadi selain karena adanya perbedaan antara titik didih minyak dengan titik didih air, juga karena titik didih minyak dan titik didih air mengalami penurunan, disebabkan karena air disedot ke tabung vakum, sehingga waktu pemasakan menjadi lebih cepat. Makin jauh perbedaan antara tekanan di dalam ruang penggorengan dengan tekanan atmosfer (tekanan ruang penggorengan semakin rendah), air yang disedot ke tabung vakum akan semakin besar pula, sehingga penurunan kadar air terjadi lebih cepat dibandingkan dengan pada tekanan yang lebih tinggi.

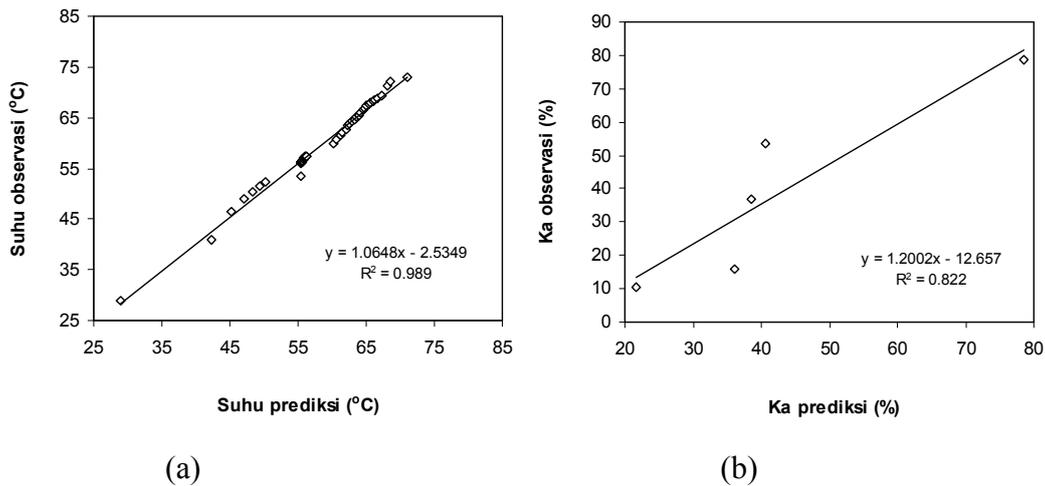
Gambar 5 memperlihatkan perubahan kadar minyak pada bahan. Kadar minyak dalam bahan nampak mendekati konstan pada awal proses penggorengan, peristiwa ini terjadi pada saat air secara serempak mulai keluar dari dalam melalui pori-pori bahan yang digoreng, kemudian pada saat yang bersamaan minyak mulai masuk secara perlahan-lahan ke dalam bahan, mengakibatkan terjadinya peningkatan kadar minyak pada bahan. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa selama proses penggorengan terjadi peristiwa penyerapan minyak pada bahan.

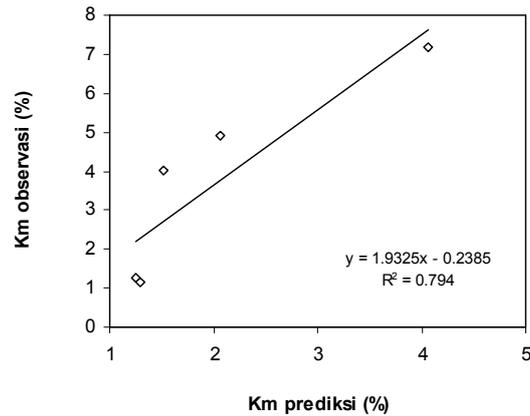
Proses penyerapan minyak terjadi ketika massa minyak secara perlahan masuk pada awal proses penggorengan ke dalam bahan yang digoreng, dan makin meningkat saat suhu semakin meningkat seiring dengan penurunan tekanan vakum. Massa minyak masuk ke dalam bahan yang digoreng dengan cara difusi, disebabkan karena adanya perbedaan konsentrasi massa minyak pada bagian permukaan dengan bagian dalam bahan. Proses penyerapan minyak pada bahan lebih cepat terjadi ketika penurunan kandungan kadar air bahan semakin rendah (Gambar 5). Hal ini terjadi karena posisi air yang keluar dari dalam bahan digantikan oleh minyak, sehingga proses penyerapan minyak akan berlangsung lebih cepat ketika kandungan kadar air bahan semakin rendah. Proses perubahan kandungan air di dalam bahan yang keluar nantinya akan digantikan oleh minyak. Dengan demikian proses penyerapan minyak baru bisa terjadi secara cepat pada saat semua air yang ada di dalam bahan hampir keluar.



Gambar 6. Riwayat suhu, perubahan kadar air, minyak dan simulasi terhadap waktu proses penggorengan buah pada keadaan hampa suhu 70 °C dan tekanan 78 kPa

Hasil simulasi model riwayat suhu, perubahan kadar air dan minyak diselesaikan dengan menggunakan persamaan (5), (11) dan (22), dari persamaan-persamaan tersebut kemudian diperoleh hasil prediksi riwayat suhu, perubahan kadar air dan minyak proses penggorengan buah pada keadaan hampa. Gambar 6 menunjukkan kecenderungan data prediksi suhu, perubahan kadar air dan minyak mengikuti kecenderungan data observasi. Grafik riwayat suhu, perubahan kadar air dan minyak pada berbagai variasi suhu, waktu dan tekanan vakum memperlihatkan pola yang hampir sama dengan Gambar 6.





(c)

Gambar 7. Skater plot hasil observasi dan simulasi (a) riwayat suhu, (b) perubahan kadar air, dan (c) perubahan kadar minyak proses penggorengan buah pada keadaan hampa suhu 70 °C dan tekanan 78 kPa

Data riwayat suhu, perubahan kadar air dan minyak hasil prediksi dan observasi cenderung mengikuti persamaan eksponensial, makin lama waktu penggorengan, maka kadar air bahan akan semakin menurun, sedangkan kadar minyak bahan akan lebih meningkat. Suhu observasi dan prediksi memperlihatkan kurva garis yang berhimpitan. Dengan demikian dapat dipahami bahwa model matematik yang telah dikembangkan dapat digunakan dalam memprediksi suhu, kadar air dan minyak selama proses penggorengan buah pada keadaan hampa.

Hubungan nilai observasi dan simulasi riwayat suhu, perubahan kadar air dan kadar minyak proses penggorengan buah pada keadaan hampa ditunjukkan pada Gambar 7. Hasil skater plot antara nilai obesrvasi dan simulasi untuk riwayat suhu didapat  $R^2 = 0,989$  ; perubahan kadar air  $R^2 = 0,822$  ; perubahan kadar minyak  $R^2 = 0,794$ . Hal ini menunjukkan bahwa nilai  $R^2$  untuk semua pengamatan lebih besar dari 0,75 (Edwards, 1976), sehingga dapat dikatakan bahwa model matematik perpindahan panas dan massa proses penggorengan buah pada keadaan hampa yang telah dikembangkan dinyatakan valid.

## V. KESIMPULAN

Perpindahan panas dan massa proses penggorengan buah pada keadaan hampa dapat dimodelkan secara matematik dan dapat digunakan dengan baik dalam memprediksi riwayat suhu, perubahan kadar air dan minyak bahan selama proses penggorengan. Energi panas

digunakan untuk menaikkan suhu bahan, proses gelatinisasi, penguapan air, dan pemasakan. Penurunan kadar air disebabkan karena adanya proses perpindahan massa air dari dalam ke permukaan bahan, dan perbedaan konsentrasi massa air pada bagian dalam dengan permukaan bahan. Massa minyak masuk ke dalam bahan dengan cara difusi, karena adanya perbedaan konsentrasi massa minyak pada bagian permukaan dengan bagian dalam bahan.

### DAFTAR LAMBANG DAN SIMBOL

A	Luas permukaan	$m^2$
C	Konsentrasi massa	$kg/m^3$ total
$C_a$	konsentrasi air di dalam padatan	$kg/m^3$ total
$C_a^*$	konsentrasi uap air di permukaan padatan	$kg/m^3$ total
$C_m$	konsentrasi minyak di dalam padatan	$kg/m^3$ total
$C_m^*$	konsentrasi minyak di permukaan padatan	$kg/m^3$ total
$C_p$	konsentrasi pati di dalam padatan	$kg/m^3$ total
$C_p$	Panas spesifik	J/kg K
$D_m$	Difusivitas uap	$m^2/s$
$D_{AB}$	Difusivitas A melalui B	$m^2/s$
h	Koefisien transfer panas	$W/m^2 \text{ } ^\circ C$
$K_y$	Koefisien transfer massa konveksi	m/dt
k	konduktivitas	$W/m^2 \text{ } ^\circ C$
$K_{rg}$	Konstante kecepatan reaksi gelatinisasi	kg/s
$k_{pf}$	Koefisien perpindahan massa perubahan fase	kg/s
$\Delta H_G$	Energi untuk proses gelatinisasi	J/kg
$\Delta H_{pf}$	Energi untuk proses perubahan fase	J/kg
$N_A$	Flux aliran massa	$Kg/s \text{ } m^2$
q	Transfer panas tiap satuan waktu tiap satuan luas	$s/m^2$
Q	Transfer panas tiap satuan waktu	s
$r_g$	Kecepatan reaksi gelatinisasi	$m/s^2$
$r_{pf}$	Kecepatan reaksi perubahan fase (penguapan)	$m/s^2$
T	Temperatur	$^\circ C$
t, $\theta$	Waktu	s
x,z	Jarak (posisi ke arah sumbu)	m
$\rho$	Densitas	$Kg/m^3$
Subscripts		
a	Air	
$a^*$	Air dipermukaan	
p	Pati	
g	Gelatinisasi	
m	Minyak	
$m^*$	Minyak dipermukaan	
s	Permukaan	
$\infty$	Kondisi pada saat $t \approx \infty$	
0	Awal	

## DAFTAR PUSTAKA

- Ardianingmunir S., et. al., 2007. *Pengaruh osmotik dehydration terhadap karakteristik wortel (Daucus carota) dan keripik wortel*. **Skripsi**. Fakultas Teknologi Pertanian. UGM. Yogyakarta.
- Asensio, M. C., 1999. *Transport phenomena during drying of deformable, hygroscopic porous media: Fundamentals and applications*. Ph.D. dissertation, Texas A&M University, College Station, TX.
- Ateba, P., and G.S. Mittal, 1994. Modeling the deep-fat frying of beef meatballs. *International Journal of Food Science and Technology* **29**, pp. 429–440.
- Edwards, A. L., 1976. *an Introduction to Linier regression on Correlation For India*. National Seed Corporation. New delhi.
- Farkas, B.E., and Hubbard, L.J., 2000. Analysis of convective heat transfer during immersion frying. *Drying Technology* **18**, pp. 1269–1285.
- Farkas, B.E., Singh, R.P., and Rumsey, T.R., 1996. Modeling heat and mass transfer in immersion frying, part I: Model development. *Journal of Food Engineering* **29** (1996a), pp. 211–226.
- Farkas, B.E., Singh, R.P., and Rumsey, T.R., 1996. Modeling heat and mass transfer in immersion frying, part II: Model solution and verification. *Journal of Food Engineering* **29**, pp. 227–248.
- Gamble et al., 1987. M.H. Gamble, P. Rice and J.D. Selman , Relationship between oil uptake and moisture loss during frying of potato slice from UK tubers. *International Journal of Food Science and Technology* **22**, pp. 223–241.
- Garayo, J, & Moriera R, 2001. Vacuum fraying of potato chips. *Journal of Food Engineering* **55**, pp. 181–191.
- Krokida, M. K., 2000. *Water Loss and Oil Uptake as a Function of Frying Time*. Journal of Food Engineering vol. **44** : 39-46.
- Matz, A. Samuel, 1984. 1984. *Snack Food Technology*. AVI Publishing Company, Inc. Westport. Connecticut).
- Moreira, R.G., Castell-Perez, M.E., and Barrufet, M.A., 1999. *Deep-fat frying of food-fundamentals and applications*, Aspen Publishers, Gaithersburg, MD.
- Moreira, R.G., and Barrufet, M.A., 1998. A new approach to describe oil absorption in fried foods: A simulation study. *Journal of Food Engineering* **35**, pp.1–22.

- Moreira, R.G. Moreira, J.E. Palau and X. Sun, 1995. , Deep-fat frying of tortilla chips: An engineering approach. *Food Technology* **49**, pp. 146–150.
- Moreira, R.G., J.E. Palau, V. Sweat and X. Sun, 1995. Thermal and physical properties of tortilla chips as a function of frying time. *Journal of Food Processing and Preservation* **19**, pp. 175–189.
- Sun, X., & Moreira, R. G. 1994. Oil distribution in tortilla chips during deep-fat frying. *American Society of Agricultural Engineers Paper no. 94-6506* (pp. 1–13). St. Joseph, MI: ASAE.
- Supriyanto, et. al., 2007, Proses penggorengan bahan makanan sumber pati: kajian nisbah amilosa – amilopektin. **Disertasai**. Fakultas Teknologi Pertanian. UGM Yogyakarta.
- Whitaker, S.,1977. Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media: A theory of drying. *Advances in Heat Transfer* **13**, pp. 119–203.
- Yamsaengsung, & Moriera, 2001. *Modeling the transport phenomena and structural changes during deep fat frying*. Part I: Model development. *Journal of Food Engineering* **53**, pp. 1–10.
- Yamsaengsung, & Moriera, 2001. *Modeling the transport phenomena and structural changes during deep fat frying*. Part II: Model solution & validation. *Journal of Food Engineering* **53**, pp. 11–25.