

MODEL PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA SELAMA PENGGORENGAN BUAH PADA KEADAAN VAKUM

Model of Heat and Mass Transfer during Vacuum Fruit Frying Abstract

Jamaluddin¹, Budi Rahardjo², Pudji Hastuti², Rochmadi³

¹Fakultas Teknik, Universitas Negeri Makassar, Jl. Dg. Tata Malengkeri Makassar, Sulawesi Selatan 92114; ²Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada, Jl. Flora, Bulaksumur 55281; ³Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta 55281

Email: mamal_ptm@yahoo.co.id

ABSTRAK

Saat ini produk keripik buah hasil proses penggorengan vakum sudah populer dikonsumsi oleh masyarakat, karena produk keripik buah mempunyai sifat yang khas, enak, gurih dan renyah jika dimakan. Selama proses penggorengan buah pada keadaan vakum, perpindahan panas dan massa terjadi secara simultan. Perpindahan panas dari minyak panas ke permukaan kemudian merambat ke dalam buah dan kandungan air di dalam buah keluar ke permukaan, pada saat yang bersamaan buah menyerap minyak. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model matematik perpindahan panas dan massa secara simultan pada penggorengan buah pada keadaan vakum. Sampel penelitian adalah buah nangka digoreng pada suhu 70-100 °C, lama penggorengan 15-60 menit dan tekanan vakum 13-23 kPa. Model meliputi perubahan kadar air, kadar minyak, kadar pati, kadar sukrosa, kadar gula reduksi dan kadar β -karoten di dalam padatan. Penyusunan model didasarkan pada konsep persamaan diferensial ordiner order satu simultan yang diselesaikan dengan metode numerik Runge-Kutta. Hasil simulasi kenaikan suhu, penurunan kadar air dan penyerapan minyak selama proses penggorengan secara vakum menggambarkan bahwa model matematik yang dikembangkan cukup baik untuk menjelaskan fenomena perpindahan panas dan massa secara simultan selama proses penggorengan buah pada keadaan vakum.

Kata kunci: Model matematika, perpindahan panas, perpindahan massa dan penggorengan vakum

ABSTRACT

Recently, vacuum frying flaky products have been popularly consumed by people as they have specific characteristics, good taste, crispy, and crunchy. During vacuum frying process, heat and mass transfer simultaneously occur. Heat transfer takes place from hot frying oil to the fruit, and water in the fruit comes out. At the same time, the fruit absorbs oil. The objective of this research is to develop mathematical model of simultaneous heat and mass transfer during vacuum fruit frying. Sample of the research is jack fruit vacuumly fried in the temperature of 70-100 °C, duration of 15-60 minutes, and pressure of 13-23 kPa. The model includes changes of water, oil, extract, sucrose, reduction glucose, and β -carotene content in product. The developed model is based on the one order simultaneous ordinary differential equation solved by Runge-Kutta numerical method. Simulation result showed that increasing temperature, decreasing water content, and oil absorption during the vacuum frying process describe that the developed mathematical model is good enough to explain simultaneously heat and mass transfer phenomena during the process of vacuum fruit frying.

Keywords: Mathematical model, heat transfer, mass transfer, and vacuum frying

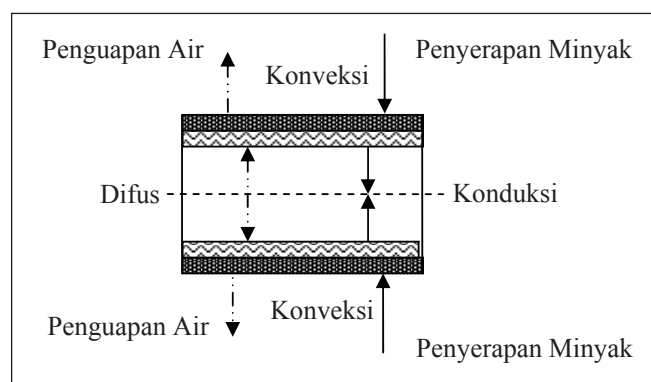
PENDAHULUAN

Saat ini keripik buah sudah populer dikonsumsi oleh masyarakat, karena produk keripik buah mempunyai sifat yang khas, enak, gurih dan renyah jika dimakan, sehingga permintaan konsumen terhadap produk keripik buah semakin meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa produk keripik buah mempunyai peluang pasar yang sangat besar untuk dikembangkan pada skala nasional maupun internasional. Selama penggorengan buah dalam keadaan vakum, perpindahan panas dan massa terjadi secara simultan. Perpindahan panas terjadi dari minyak panas ke permukaan dan merambat ke dalam buah, sehingga kandungan air di dalam buah keluar dalam bentuk uap air ke permukaan buah, kemudian pada waktu yang bersamaan buah menyerap minyak. Kondisi ini menyebabkan banyak perubahan di dalam buah, baik secara fisik maupun kimiawi. Perubahan secara fisik pemasakan menjadi lebih cepat, garing, mekar, tekstur renyah dan pengembangan rasa, sedangkan perubahan secara kimiawi terjadi penguapan air, penyerapan minyak, gelatinisasi pati, denaturasi protein, pencoklatan non enzimatis dan perubahan warna pada bahan yang digoreng dari warna alaminya (Farkas dkk., 1996a; Yamsaengsung dan Moreira, 2002a).

Berbagai pendekatan telah dilakukan untuk menggambarkan kondisi dan perubahan yang terjadi selama proses penggorengan pada bahan pangan. Atteba dan Mittal (1994) serta Supriyanto (2007) mengembangkan model perpindahan massa dan panas secara simultan selama proses penggorengan bahan pangan. Penelitian tersebut hanya memperhitungkan adanya energi panas untuk proses gelatinisasi, perubahan fase, dan pemasakan bahan, sedangkan energi panas untuk proses denaturasi, pencoklatan, dan perubahan warna alami produk belum dimasukkan ke dalam model. Model yang dikembangkan sampai sekarang menggambarkan perubahan yang terjadi selama proses penggorengan. Namun belum menjelaskan hubungan antara karakteristik bahan baku dan proses dengan perubahan pada produk yang dihasilkan.

Perpindahan panas selama proses penggorengan celup (*deep fat frying*) adalah perpindahan panas secara konveksi (Fellow, 1988) disertai perpindahan panas dari permukaan bahan ke dalam bahan secara konduksi (Meyer, 1982). Farkas dkk. (1996b); Kawas dan Moreira (2000) serta Yamsaengsung dan Moreira (2002b) mengembangkan model perpindahan panas dan massa pada penggorengan keripik kentang. Ni dan Datta (1999) mengembangkan model media berpori multifasa untuk menstimulasi penggorengan keripik kentang berdasarkan pendekatan Whitaker (1977). Model tersebut melibatkan aliran yang disebabkan tekanan, namun model tersebut tidak mencakup fase minyak dan belum memperhitungkan perubahan porositas produk dan

pengaruhnya terhadap perpindahan panas dan massa sistem. Dalam penggorengan bahan pangan fenomena perpindahan panas dan massa dikaji secara bersama-sama disajikan pada Gambar 1. Oleh sebab itu penelitian lebih komprehensif masih perlu lebih dikembangkan agar diperoleh pemahaman yang lebih lanjut pada proses penggorengan bahan pangan. Salah satunya adalah dengan cara menyertakan karakteristik bahan baku dengan teknik proses agar diperoleh produk yang sesuai dengan standar mutu yang diinginkan. Saat ini belum banyak penelitian yang memperlihatkan hubungan antara kadar air, kadar minyak, kadar pati, kadar sukrosa, kadar gula reduksi dan kadar β -karoten bahan baku dengan perpindahan panas dan massa secara simultan. Diharapkan dengan model ini, rekayasa kualitas pada produk goreng mungkin untuk dilakukan, agar dapat memenuhi selera konsumen dalam usaha menyelaraskan dengan isu kesehatan dan menghasilkan produk goreng yang lebih berkualitas untuk pengembangan teknologi dalam proses penggorengan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan model matematik perpindahan panas dan massa secara simultan proses penggorengan buah pada keadaan vakum dengan menyertakan kadar air, kadar minyak, kadar pati, kadar sukrosa, kadar gula reduksi dan kadar β -karoten bahan baku ke dalam model.



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

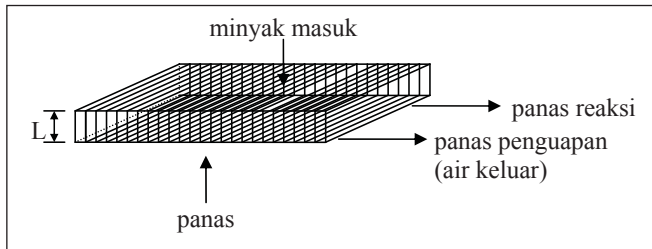
METODE PENELITIAN

Landasan Teori dan Pengembangan Model

Model matematika perpindahan panas dan massa disusun berdasarkan pada jumlah komponen yang ada di dalam padatan yang diduga mengalami perubahan selama proses penggorengan. Perpindahan panas dan massa dimodelkan dengan model fisik *lump capacitance*. Gambar 2 menyajikan neraca massa dan panas yang mengalir melewati bahan padatan setebal L dan seluas A_ϕ .

Asumsi utama yang digunakan dalam menyusun model perpindahan panas dan massa adalah sebagai berikut:

1. Suhu dan konsentrasi bahan (air, minyak, pati, sukrosa, gula reduksi, dan β -karoten) dalam padatan dianggap merata di seluruh padatan, termasuk di permukaan padatan.
2. Penyerapan minyak terjadi selama proses penggorengan, sedangkan selama pendinginan diabaikan.



Gambar 2. Neraca massa dan panas di elemen volum padatan sampel

Perpindahan Massa

Neraca massa setiap komponen yang ada di dalam elemen volum padatan berdasarkan Gambar 2, kemudian disusun sebagai berikut.

Laju perubahan konsentrasi air di padatan

$$\frac{d\bar{C}_a}{dt} = -k_g(C_a \cdot C_{pt}) - \frac{2}{L} k_{pf}(C_a^* - C_a) \quad (1)$$

Laju perubahan konsentrasi minyak di padatan

$$\frac{d\bar{C}_m}{dt} = \frac{2}{L} k_m(C_m^* - C_m) \quad (2)$$

Laju perubahan konsentrasi pati di padatan

$$\frac{d\bar{C}_{pt}}{dt} = -k_g(C_a \cdot C_{pt}) \quad (3)$$

Laju perubahan konsentrasi sukrosa di padatan

$$\frac{d\bar{C}_{sk}}{dt} = -k_{km}(C_{sk}) \quad (4)$$

Laju perubahan konsentrasi gula reduksi di padatan

$$\frac{d\bar{C}_{gr}}{dt} = -k_{ml}(C_{gr} \cdot C_{am}) \quad (5)$$

Laju perubahan konsentrasi β -karoten di padatan

$$\frac{d\bar{C}_{\beta k}}{dt} = -k_{\beta k}(C_{\beta k}) \quad (6)$$

Kondisi awal (*initial condition/IC*) untuk persamaan (1) sampai dengan persamaan (6) adalah:

$$t = 0, \bar{C}_a = C_{a \text{ awal}}, \bar{C}_m = 0, \bar{C}_{pt} = C_{pt \text{ awal}}, \bar{C}_{sk} = C_{sk \text{ awal}}, \bar{C}_{gr} = C_{gr \text{ awal}}, \bar{C}_{\beta k} = C_{\beta k \text{ awal}}$$

Perpindahan Panas

Berdasarkan pada Gambar 2 maka disusun neraca panas pada elemen volum padatan setebal L , luas A_ϕ , dijabarkan sebagai berikut.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_p \rho} \left(2h(T_m - T) + \frac{2}{L} r_m [C_p(T_m - T)] - \frac{2}{L} r_{pf} \cdot \lambda - r_g \Delta H_{Rg} - r_{km} \Delta H_{Rkm} - r_{mi} \Delta H_{mi} - r_{\beta k} \Delta H_{R\beta-k} \right) \quad (7)$$

Kondisi awal:

$$t = 0 \longrightarrow T = T_{\text{awal}} \quad (8)$$

Persamaan (1) sampai dengan persamaan (7) adalah persamaan diferensial ordiner order satu yang diselesaikan secara simultan dengan cara numerik, menggunakan *Program MATLAB*. Evaluasi parameter konstanta h , C_p , ρ , k_g , k_{pf} , k_m , λ dan ΔH_{Rg} dilakukan dengan menggunakan "curve fitting" yang dilakukan secara "trial and error".

Bahan

Bahan utama penelitian adalah buah nangka jenis nangka salak (berdasarkan sifat-sifat buahnya) yaitu daging buah padat, berair dan kurang aroma. Buah nangka dibeli dari petani melalui pedagang buah di pasar tradisional di Kota Baru Yogyakarta berumur 12-24 jam setelah dipanen. Sebagai bahan pendukung penelitian adalah minyak goreng dan bahan-bahan kimia untuk analisis kimia.

Alat

Alat utama adalah penggoreng vakum (*vacuum fryer*) dilengkapi dengan *data logger* sistem komputer dibuat secara khusus untuk skala laboratorium dan dirancang sesuai dengan kebutuhan penelitian, sedangkan alat pendukung adalah alat untuk analisa kadar air, kadar minyak, kadar pati, kadar sukrosa, kadar gula reduksi dan kadar β -karoten serta *Universal Testing Machine Do-FBO.STS (Zwich/Zo.5)*.

Pelaksanaan Penelitian

Sampel buah nangka digoreng pada variasi suhu 70 sampai 100 °C, lama penggorengan 15 sampai 60 menit dan tekanan vakum 13 sampai 23 kPa.

Pengamatan dan Analisis

Pengamatan suhu. Selama proses penggorengan vakum diamati perubahan suhu minyak di permukaan dan di titik tengah sampel dengan termokopel tipe K dilengkapi pembacaan dan *data logger* yang mempunyai akurasi ± 1 °C.

Analisis kadar air. Kadar air sampel sebelum dan sesudah penggorengan dianalisis menggunakan metode oven vakum (AOAC, 1995), ukuran sampel 10 g dibuat sebanyak

3 sampel. Analisa dilakukan tiga kali pengulangan untuk setiap satu kali proses dan semua proses penelitian dilakukan sebanyak tiga kali.

Analisis kadar minyak. Kadar minyak sampel sebelum dan sesudah penggorengan dianalisis menggunakan metode soxhlet (Goldfisch, AOAC) dengan cara bahan dihaluskan sebelumnya dengan alat destilasi soxhlet kemudian diekstrak selama 3 sampai 4 jam dan dioven sampai mencapai berat konstan. Analisis dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan untuk setiap satu kali proses dan semua proses penelitian dilakukan sebanyak tiga kali.

Analisis kadar pati, sukrosa, dan gula reduksi. Kadar pati, sukrosa, dan gula reduksi sampel sebelum dan sesudah penggorengan dianalisis dengan metode (Spektrofotometri, Metode Nelson-Somogyi, AOAC, 1995). Analisis dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan untuk setiap satu kali proses dan semua proses penelitian dilakukan sebanyak tiga kali.

Analisis β -karoten. Kadar β -Karoten sampel sebelum dan sesudah penggorengan dianalisis dengan metode Carr Price. Pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan untuk setiap satu kali proses dan semua proses penelitian dilakukan sebanyak tiga kali.

Penyelesaian numerik. Metode numerik digunakan untuk menyelesaikan persamaan (1) sampai (7) secara simultan dengan analisis numerik meliputi: perpindahan massa terdiri dari perubahan kadar air, kadar minyak, kadar pati, kadar sukrosa, kadar gula reduksi dan kadar β -karoten serta perpindahan panas dengan program *Matlab*.

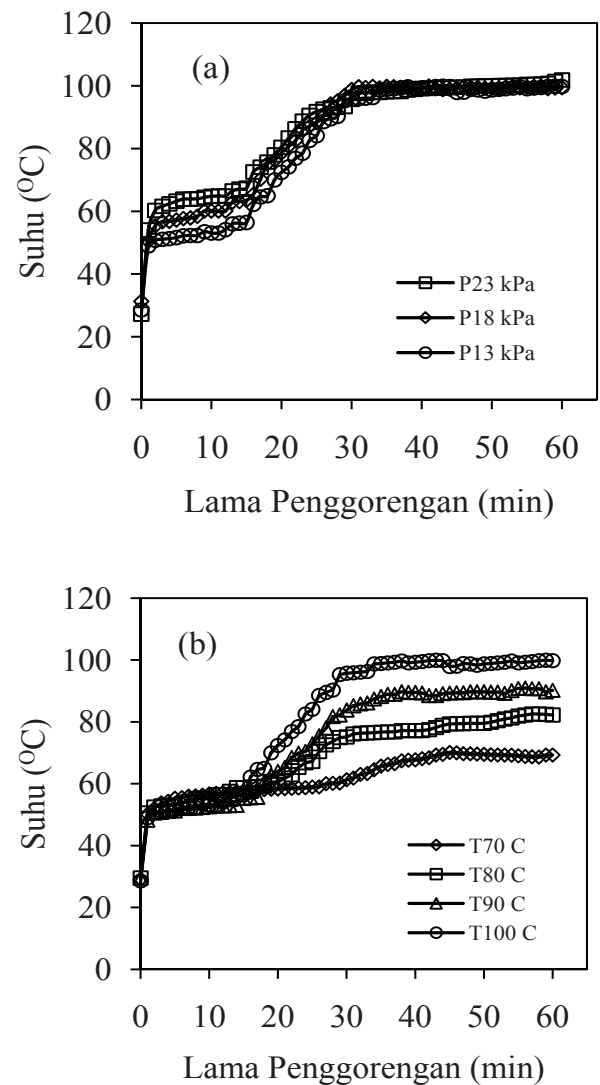
Analisis data. Data penelitian dianalisis secara statistik menggunakan program *excel*. Analisis statistik digunakan adalah analisis korelasi produk moment untuk mencari hubungan antara data hasil pengamatan dengan hasil simulasi model. Data-data yang akan dikorelasikan antara lain adalah: kenaikan suhu, penurunan kadar air dan penyerapan minyak di dalam padatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perubahan Suhu Padatan Nangka selama Penggorengan Vakum

Perubahan suhu padatan nangka dengan berbagai variasi tekanan vakum dan suhu minyak disajikan pada Gambar 3a dan 3b. Dari gambar nampak laju perubahan suhu padatan meningkat sangat cepat dimulai dari awal penggorengan sampai mencapai suhu 51 sampai 63 °C. Pada periode tersebut terjadi perpindahan panas dari minyak ke permukaan padatan, namun beberapa lama tampak ada kecenderungan suhu padatan bertahan pada 51 sampai 63 °C untuk beberapa

lama, pada saat suhu padatan nangka telah mencapai suhu tersebut energi panas pada periode tersebut digunakan untuk proses penguapan air bebas dari dalam padatan. Setelah proses penguapan air bebas dari dalam padatan selesai suhu kembali perlahan-lahan naik mendekati suhu minyak goreng sampai akhir proses. Pada saat suhu di dalam padatan sudah cenderung menjadi konstan, diduga energi panas lebih banyak digunakan untuk proses pemasakan dan penguapan lebih lanjut sampai akhir proses penggorengan atau sampai padatan menjadi masak.



Gambar 3. Riwayat suhu padatan nangka selama proses penggorengan (a) variasi tekanan vakum pada suhu minyak 100 °C dan (b) variasi suhu minyak pada tekanan vakum 13 kPa

Suhu penguapan air dari dalam padatan dipengaruhi oleh tekanan vakum seperti diperlihatkan pada Gambar 3a. Berdasarkan gambar ditunjukkan makin rendah tekanan

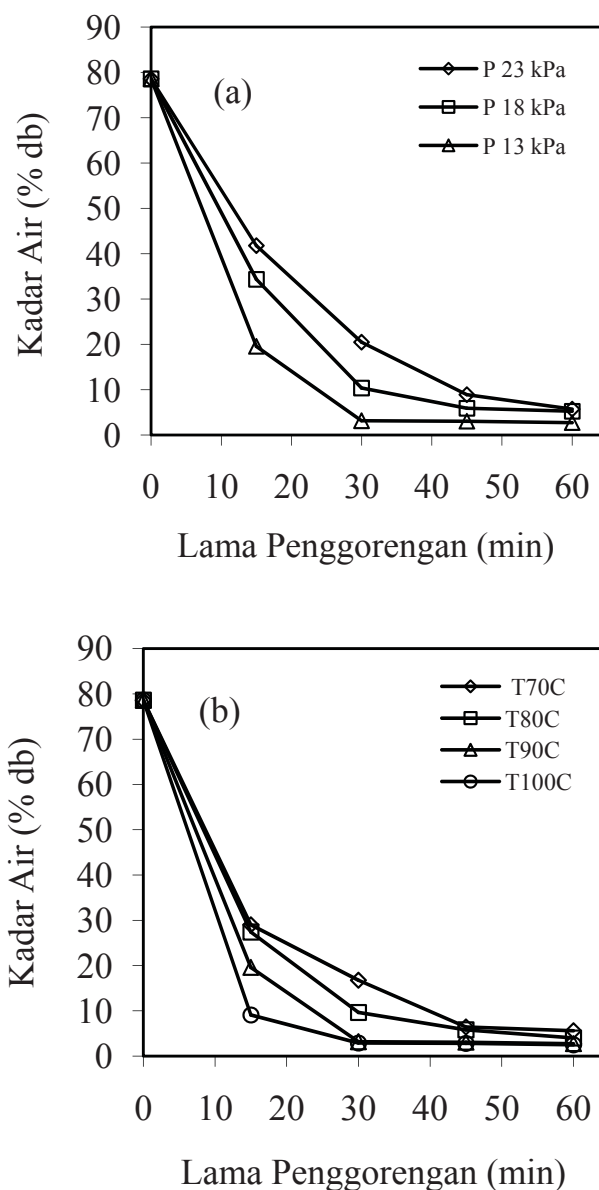
vakum dengan suhu minyak sama semakin rendah pula suhu penguapan air dari dalam padatan, atau sebaliknya makin tinggi tekanan vakum semakin tinggi pula suhu penguapan air dari dalam padatan. Hal tersebut disebabkan pada penggorengan dengan tekanan rendah, laju penguapan air bebas dari dalam padatan lebih cepat berlangsung mengakibatkan padatan menjadi cepat kering, dan karena penguapan air lebih cepat pada penggorengan dengan tekanan rendah dan suhu tinggi (Gambar 3b), sehingga energi panas yang masuk ke dalam padatan cenderung lebih besar jika dibandingkan dengan tekanan vakum tinggi dan suhu minyak sama, akhirnya padatan yang digoreng pada tekanan sama dengan suhu tinggi lebih cepat menjadi masak. Hasil penelitian Garayo dan Moreira (2002) mendukung penelitian ini yang menjelaskan bahwa penurunan tekanan vakum 3,113 kPa dan 16,661 kPa pada suhu minyak 144 °C membutuhkan waktu lebih singkat untuk mencapai kadar air keripik kentang selama dalam penggorengan tekanan vakum, dibandingkan dengan penggorengan tekanan atmosfer. Selanjutnya penelitian ini sejalan pula dengan penelitian Winarno dan Fardiaz (1992) yang mengungkapkan bahwa jika suhu yang digunakan rendah maka proses pemasakan lebih lama, sebaliknya apabila suhu tinggi maka proses pemasakan akan menjadi lebih singkat.

Penurunan Kadar Air Padatan selama Penggorengan Vakum

Penurunan kadar air padatan selama penggorengan dengan berbagai variasi suhu minyak dan tekanan vakum disajikan pada Gambar 4a dan 4b. Berdasarkan gambar tersebut nampak laju penguapan air selama penggorengan juga dipengaruhi oleh suhu dan tekanan vakum. Makin tinggi suhu dan tekanan vakum rendah ada kecenderungan laju penguapan air semakin cepat. Penelitian ini mendukung penelitian Garayo dan Moreira (2002) yang menjelaskan bahwa kentang yang digoreng pada suhu lebih tinggi dengan tekanan vakum sama memerlukan waktu lebih singkat untuk mencapai kadar air yang sama. Di samping itu nampak laju penurunan kandungan air padatan mendekati konstan sebelum kadar air mencapai 20 %, kemudian melambat setelah kadar air di bawah 20 %.

Penurunan kadar air terkait dengan lama periode suhu padatan konstan pada 51 sampai 63 °C. Suhu padatan mulai bertambah tinggi setelah kadar air mendekati 20 %, kemudian mencapai suhu penggorengan. Laju kenaikan suhu padatan menuju suhu penggorengan nampak menyerupai kenaikan suhu pada pemanasan awal. Pada awal penggorengan, energi panas digunakan untuk memanaskan permukaan kemudian bagian dalam padatan. Pada kondisi ini proses penguapan air bebas mulai berlangsung dari bagian dalam ke permukaan,

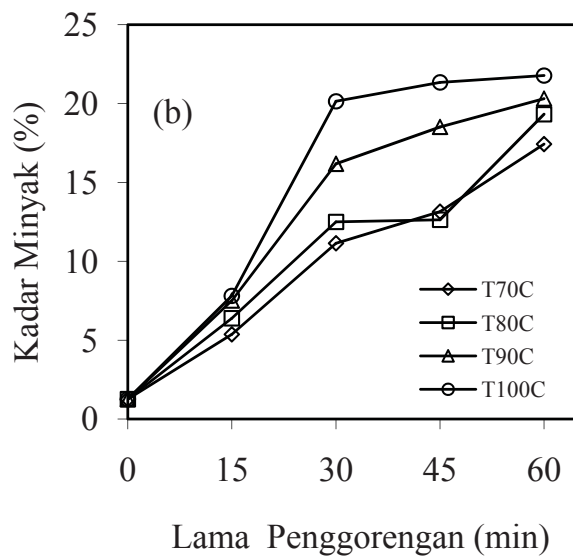
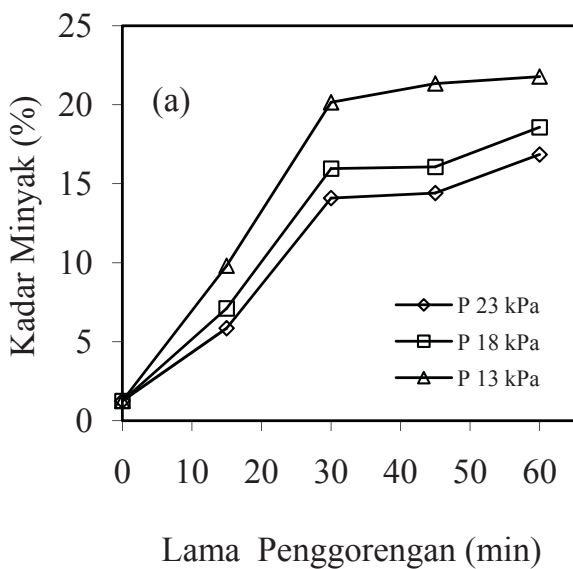
karena adanya perbedaan konsentrasi massa air pada bagian dalam dengan permukaan, dan karena konsentrasi massa air di permukaan lebih rendah dibandingkan konsentrasi massa air dalam padatan. Air di permukaan lebih cepat menjadi uap disebabkan adanya kontak langsung padatan dengan minyak goreng. Penurunan kadar air dicirikan adanya penguapan air dan terjadinya gelembung gas dari permukaan padatan ke media minyak panas. Penurunan kadar air disebabkan hilangnya sebagian air bebas dari dalam padatan ke permukaan yang menguap ke lingkungan (dalam minyak panas), dan perubahan massa air menjadi uap di dalam padatan.



Gambar 4. Penurunan kadar air padatan angka selama penggorengan (a) variasi tekanan vakum pada suhu minyak 100 °C dan (b) variasi suhu minyak pada tekanan vakum 13 kPa

Peningkatan Kadar Minyak Padatan selama Penggoreng-an Vakum

Peningkatan kadar minyak padatan nangka selama penggorengan dengan berbagai variasi suhu minyak dan tekanan vakum disajikan pada Gambar 5a dan 5b. Dari gambar nampak profil peningkatan kadar minyak dalam padatan seperti halnya sama dengan laju penurunan kadar air. Pada awalnya berlangsung lambat dan beberapa saat kemudian laju penyerapan minyak menjadi cepat. Titik perubahan laju penyerapan minyak umumnya berlangsung secara lambat sampai menit ke 15 kemudian menjadi cepat dan akhirnya konstan.



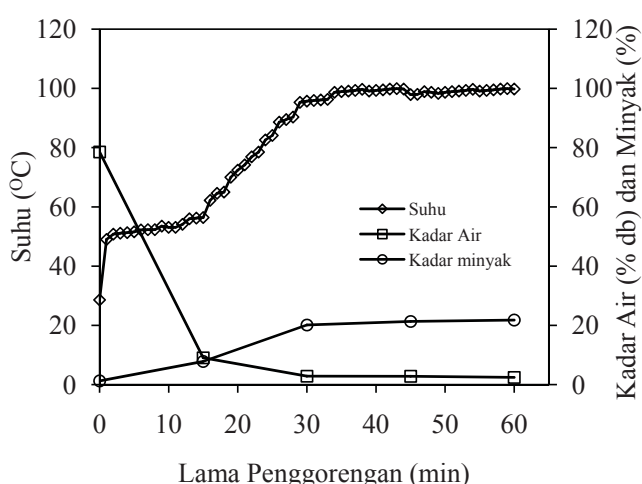
Gambar 5. Peningkatan kadar minyak padatan nangka selama penggoreng-an (a) variasi tekanan vakum pada suhu minyak 100 °C dan (b) variasi suhu minyak pada tekanan vakum 13 kPa

Titik laju perubahan penyerapan minyak agaknya dipengaruhi oleh suhu dan tekanan vakum, makin tinggi suhu dan tekanan vakum rendah semakin banyak padatan menyerap minyak atau sebaliknya, makin rendah suhu dan tekanan vakum tinggi semakin sedikit padatan menyerap minyak. Hasil penelitian ini mendukung penelitian Math dkk. (2003) yang menyatakan pada penggorengan dengan suhu minyak lebih tinggi penyerapan minyak semakin besar dibandingkan dengan suhu minyak lebih rendah. Namun penelitian Saguy dkk. (1998) nampaknya bertentangan dengan hasil ini, meskipun datanya belum meyakinkan tapi kelihatannya waktu yang lebih lama dan suhu minyak goreng lebih rendah kadar minyak lebih tinggi pada produk kentang goreng. Sejak awal penggorengan sudah berlangsung penyerapan minyak dalam padatan secara perlahan-lahan pada saat kadar air belum konstan sampai mencapai 20 %, namun beberapa lama setelah kadar air di bawah 20 % penyerapan minyak dalam padatan menjadi lebih cepat. Perubahan ini ada keterkaitan dengan penurunan kandungan air di dalam padatan. Oleh sebab itu penggabungan laju perubahan suhu, penguapan air dan penyerapan minyak akan dapat memperlihatkan keterkaitan ketiga proses tersebut.

Penggabungan Laju Perubahan Suhu, Penurunan Kadar Air dan Peningkatan Kadar Minyak Padatan Nangka selama Penggorengan Vakum

Gambar 6 menyajikan penggabungan laju perubahan suhu, penurunan kadar air dan penyerapan minyak padatan nangka selama penggorengan pada suhu 100 °C dengan tekanan vakum 13 kPa. Nampak hubungan ketiga proses perpindahan panas, penurunan kadar air dan penyerapan minyak selama penggorengan padatan nangka pada kondisi vakum. Kenaikan suhu dimulai dari suhu awal dan berubah dengan cepat sampai mencapai suhu 51 °C. Pada kondisi ini sebagian besar energi panas yang diterima digunakan untuk menaikkan suhu padatan nangka yang digoreng, sehingga pada kondisi tersebut proses penguapan air bebas dari dalam padatan belum berarti. Pada saat suhu mencapai 51 °C tampak suhu terjaga beberapa saat disebabkan pada kondisi tersebut terjadi proses penguapan air bebas dari dalam padatan pada tekanan vakum 13 kPa. Suhu terjaga pada 51 °C selama masih terdapat air bebas dalam padatan, sehingga semua pasokan panas digunakan untuk proses penguapan air bebas. Ketika suhu minyak di bawah 51 °C nampaknya penguapan yang terjadi belum berarti kemudian meningkat setelah suhu di atas 51 °C. Apabila keberadaan air bebas sudah terbatas dan tinggal berupa air terikat dalam struktur sel di dalam padatan, nampak laju penguapan air bebas menjadi menurun, sehingga suhu padatan mengalami kenaikan sampai mencapai atau menyamai suhu penggorengan. Pada saat itu diduga proses

pemasakan padatan nangka sedang berlangsung dan proses penguapan lanjut. Demikian juga halnya dengan penyerapan minyak. Keberadaan air nampaknya mempengaruhi penyerapan minyak di dalam padatan, dimana minyak dapat masuk ke dalam pori-pori padatan yang ditinggalkan oleh air. Pada awalnya penyerapan minyak berlangsung lambat pada saat penguapan air belum konstan ketika kadar air masih di atas 20 %, namun beberapa lama setelah penguapan air mulai konstan sampai kadar air sudah di bawah 20 %, terjadi peningkatan laju penyerapan minyak yang cukup tinggi, pada kondisi ini diduga air yang keluar meninggalkan pori-pori padatan digantikan posisinya oleh minyak.



Gambar 6. Riwayat suhu, penurunan kadar air dan penyerapan minyak secara simultan dalam padatan nangka selama proses penggorengan pada suhu minyak 100 °C dengan tekanan vakum 13 kPa.

Perhitungan perubahan suhu, penurunan kadar air dan peningkatan kadar minyak dalam padatan nangka selama dalam penggorengan vakum berdasarkan persamaan (1) sampai dengan (7) diselesaikan secara simultan dengan cara numerik menggunakan metode Runge-Kutta. Hasil simulasi perubahan suhu, penurunan kadar air dan peningkatan kadar minyak padatan nangka secara simultan selama dalam penggorengan vakum didasarkan pada perubahan nilai konstanta perpindahan panas, konstanta perpindahan massa air dan konstanta perpindahan massa minyak. Perubahan nilai konstanta-konstanta perpindahan panas, perpindahan massa air dan perpindahan massa minyak dicari berdasarkan data dengan menggunakan "curve fitting" yang dilakukan secara "trial and error". Hasil pencarian konstanta perpindahan panas, perpindahan massa air dan perpindahan massa minyak secara menyeluruh disajikan pada Tabel 1.

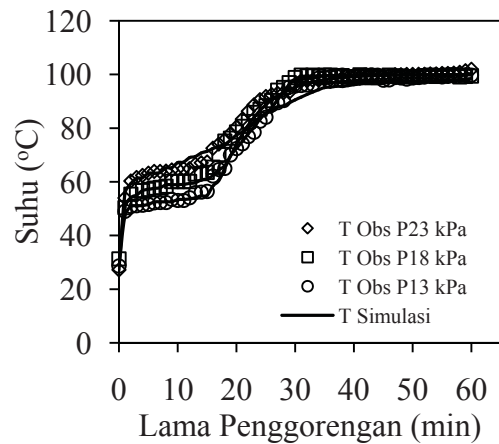
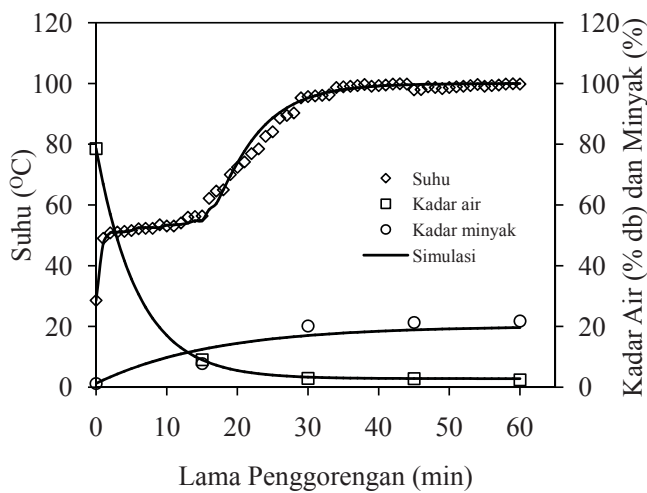
Dalam Tabel 1 disajikan konstanta perpindahan panas (h), perpindahan massa air (k_{pf}) dan minyak (k_m). Dari tabel tersebut tampak nilai h , k_{pf} dan k_m dipengaruhi oleh tekanan vakum. Perubahan nilai h berpengaruh pada riwayat suhu, k_{pf} berpengaruh pada penguapan air dan k_m berpengaruh pada penyerapan minyak. Berdasarkan tabel tampak mula-mula nilai h_1 rendah kemudian nilai h_2 naik dan akhirnya menjadi turun kembali h_3 . Kondisi tersebut disebabkan pada periode h_1 terjadi perpindahan panas dari minyak ke permukaan padatan dan belum terjadi penguapan, sehingga nilai h_1 masih rendah, namun setelah itu terjadi peningkatan nilai h_2 disebabkan pada kondisi tersebut mulai terjadi proses penguapan air bebas dari dalam padatan. Penguapan terjadi karena adanya perbedaan tekanan uap air di dalam padatan dan di permukaan (lingkungan) menyebabkan terjadinya ekspansi dan turbolensi dari dalam dan di permukaan menyebabkan uap air ke luar dari dalam padatan, setelah melewati kondisi tersebut nilai h_3 menjadi turun kembali karena proses penguapan air bebas sudah mulai menurun dan tinggal penguapan lanjut sampai semua air bebas dari dalam padatan menguap dan tinggal air terikat. Demikian pula halnya dengan k_{pf} diawal penggorengan sampai titik h_1 nilai k_{pf1} masih ≈ 0 karena belum terjadi penguapan air bebas dari dalam padatan, namun setelah mencapai kondisi h_2 mulai terjadi peningkatan nilai k_{pf2} disebabkan terjadinya penguapan air bebas dari dalam padatan, dan setelah semua air bebas diuapkan dan tinggal air terikat nilai k_{pf3} menjadi turun kembali sampai akhir proses. Begitu juga halnya dengan nilai k_m dipengaruhi oleh nilai k_{pf} . Mula-mula pada kondisi k_{pf2} nilai k_{m1} rendah disebabkan pada kondisi tersebut masih terjadi proses penguapan air bebas dari dalam padatan. Namun setelah berada pada kondisi k_{pf3} , nilai k_{m2} menjadi tinggi disebabkan semua air bebas sudah diuapkan dan meninggalkan pori dalam padatan, sehingga posisi air bebas digantikan oleh minyak.

Hasil simulasi perubahan suhu, penurunan kadar air dan peningkatan kadar minyak di dalam padatan nangka selama proses penggorengan secara vakum disajikan pada Gambar 7, Pada simulasi suhu padatan nangka selama dalam penggorengan pada berbagai tekanan vakum digunakan kondisi batas bahwa, suhu akan tetap pada 51 °C apabila kadar air masih lebih besar dari 20 %, selama kenaikan suhu dari pemanasan awal sampai suhu 51 °C digunakan konstanta perpindahan panas h_1 , selama suhu tetap sampai kadar air 20 % digunakan konstanta perpindahan panas h_2 dan kenaikan suhu lebih lanjut menggunakan konstanta perpindahan panas h_3 . Untuk proses penguapan, apabila suhu pemanasan kurang dari 51 °C dianggap tidak terjadi penguapan yang berarti $k_{pf1} \approx 0$, namun dari suhu 51 °C sampai kadar air mencapai 20 % digunakan konstanta perpindahan massa air k_{pf2} , kemudian setelah kadar air kurang dari 20 % digunakan konstanta

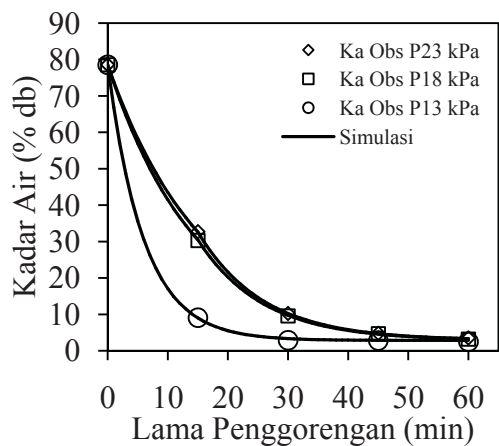
Tabel 1. Perubahan nilai konstanta perpindahan panas, konstanta perpindahan massa air dan konstanta perpindahan massa minyak pada padatan nangka selama penggorengan vakum

Konstanta, notasi dan satuan	Nilai konstanta pada suhu			
	70 °C	80 °C	90 °C	100 °C
Densitas ρ , kg/m ³	1.23E+03	1.23E+03	1.23E+03	1.23E+03
Panas jenis C_p , J/kg °C	3.64E+03	3.64E+03	3.64E+03	3.64E+03
Tekanan vakum 23 kPa				
Konstanta perpindahan panas h , W/m ² °C				
Periode sampai suhu 63 °C	0.05E+02	0.04E+02	0.03E+02	0.03E+02
Periode suhu 63 °C sampai kadar air 20 %	0.27E+02	0.21E+02	0.18E+02	0.18E+02
Periode setelah kadar air kurang dari 20 %	0.26E+02	0.17E+02	0.16E+02	0.15E+02
Konstanta Perpindahan Massa Air k_{pf} (m/detik)				
Periode sampai suhu 63 °C				
Periode suhu 63 °C sampai kadar air 20 %	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0
Periode setelah kadar air kurang dari 20 %	1.50E-02	2.26E-02	3.35E-02	4.92E-02
Konstanta Perpindahan Massa minyak k_m (m/detik)				
Periode kadar air sampai 20 %	1.15E-03	1.26E-03	1.37E-03	1.49E-03
Periode kadar air kurang 20 %	3.16E-04	5.10E-04	8.14E-04	1.28E-03
	4.40E-04	6.17E-04	8.58E-04	1.18E-03
Tekanan vakum 18 kPa				
Konstanta perpindahan panas h , W/m ² °C				
Periode sampai suhu 58 °C	0.02E+02	0.03E+02	0.04E+02	0.03E+02
Periode suhu 58 °C sampai kadar air 20 %	0.19E+02	0.28E+02	0.20E+02	0.18E+02
Periode setelah kadar air kurang dari 20 %	0.25E+02	0.13E+02	0.11E+02	0.15E+02
Konstanta Perpindahan Massa Air k_{pf} (m/detik)				
Periode sampai suhu 58 °C				
Periode suhu 58 °C sampai kadar air 20 %	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0
Periode setelah kadar air kurang dari 20 %	2.31E-02	3.47E-02	5.15E-02	7.56E-02
Konstanta Perpindahan Massa minyak k_m (m/detik)				
Periode kadar air sampai 20 %	1.43E-03	1.56E-03	1.71E-03	1.85E-03
Periode kadar air kurang 20 %	3.54E-04	5.73E-04	9.14E-04	1.44E-03
	6.00E-04	8.42E-04	1.17E-03	1.61E-03
Tekanan vakum 13 kPa				
Konstanta perpindahan panas h , W/m ² °C				
Periode sampai suhu 51 °C	0.12E+02	0.06E+02	0.04E+02	0.04E+02
Periode suhu 51 °C sampai kadar air 20 %	0.40E+02	0.26E+02	0.18E+02	0.16E+02
Periode setelah kadar air kurang dari 20 %	0.09E+02	0.11E+02	0.08E+02	0.06E+02
Konstanta Perpindahan Massa Air k_{pf} (m/detik)				
Periode sampai suhu 51 °C				
Periode suhu 51 °C sampai kadar air 20 %	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0
Periode setelah kadar air kurang dari 20 %	4.09E-02	6.14E-02	9.12E-02	1.34E-01
Konstanta Perpindahan Massa minyak k_m (m/detik)				
Periode kadar air sampai 20 %	1.91E-03	2.09E-03	2.28E-03	2.48E-03
Periode kadar air kurang 20 %	4.13E-04	6.67E-04	1.06E-03	1.68E-03
	9.06E-04	1.27E-03	1.77E-03	2.44E-03

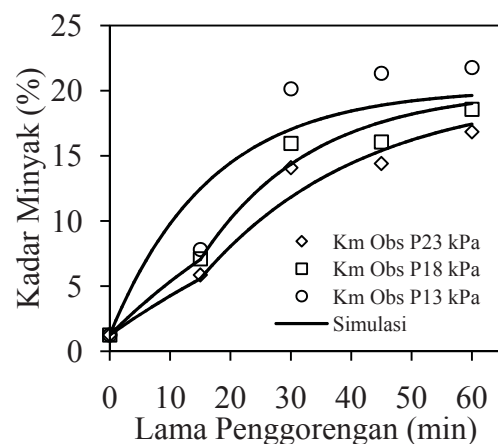
perpindahan massa air k_{p13} , sedangkan untuk perpindahan massa minyak, sebelum kadar air mencapai 20 % digunakan konstanta perpindahan massa minyak k_{m1} dan sesudah kadar air kurang dari 20 % digunakan konstanta perpindahan massa minyak k_{m2} . Dari Gambar 7 tampak hasil perhitungan menggunakan model kenaikan suhu, penurunan kadar air dan penyerapan minyak yang dikembangkan mengikuti data kenaikan suhu, penurunan kadar air dan penyerapan minyak hasil pengamatan. Hal ini menunjukkan bahwa dengan menggunakan model matematik yang sama tetapi sifat fisik mengalami perubahan selama penggorengan, maka model yang telah dikembangkan dapat digunakan dengan baik untuk memprediksi perpindahan panas, perpindahan massa air dan minyak secara simultan selama proses penggorengan buah dalam kondisi vakum.



(a)



(b)



(c)

Gambar 7. Simulasi perubahan suhu, penurunan kadar air dan penyerapan minyak secara simultan dalam padatan nangka selama penggorengan pada suhu minyak 100 °C dengan tekanan vakum 13 kPa.

Keandalan model kemudian diuji dengan menggunakan grafik secara skater plot dengan cara membandingkan antara data hasil pengamatan dan simulasi. Gambar 8a, 8b dan 8c menyajikan perbandingan hasil observasi dan simulasi model kenaikan suhu, penurunan kadar air dan penyerapan minyak penggorengan padatan nangka secara vakum. Dari hasil pengujian diperoleh nilai $R^2 = 0,99$ untuk kenaikan suhu, $R^2 = 0,99$ untuk penurunan kadar air dan $R^2 = 0,94$ untuk penyerapan minyak. Menurut Edwards (1976) apabila nilai R^2 lebih besar dari 0,75 model yang diuji dapat dinyatakan valid, dengan demikian model yang dikembangkan dapat digunakan dengan baik untuk memprediksi perpindahan panas, penurunan kadar air dan penyerapan minyak secara simultan selama proses penggorengan buah pada keadaan vakum.

Gambar 8. (a). Data suhu observasi dan simulai, (b). Data kadar air observasi dan simulasi serta (c). Data kadar minyak observasi dan simulasi padatan nangka selama dalam penggorengan dengan berbagai variasi tekanan vakum pada suhu minyak 100 °C.

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian ini adalah bahwa suhu dan tekanan vakum mempengaruhi laju perubahan suhu, penguapan air dan penyerapan minyak padatan nangka selama dalam penggorengan vakum. Laju perpindahan panas dan laju penyerapan minyak dipengaruhi oleh laju penguapan air sesuai dengan kandungan air dalam padatan. Bilamana kandungan air dalam padatan masih di atas 20 % ada kecenderungan suhu padatan konstan pada suhu 51 sampai 63 °C yang merupakan suhu titik didih air pada tekanan vakum 13 sampai 23 kPa. Begitu pula dengan laju penyerapan minyak meningkat ketika laju penguapan menurun pada saat kadar air dalam padatan di bawah 20 %. Model matematika perpindahan panas dan massa secara simultan yang dikembangkan dapat digunakan dengan baik untuk memperkirakan kenaikan suhu, penurunan kandungan air dan penyerapan minyak dengan menggunakan perubahan sifat fisik selama penggorengan.

DAFTAR LAMBANG DAN SIMBOL

A_{ϕ}	Luas permukaan	m^2
C	konsentrasi	kg/m^3 total
C_p	Panas jenis	$J/kg \text{ } ^\circ C$
h	Koefisien transfer panas	$W/m^2 \text{ } ^\circ C$
k	Konstanta kecepatan atau koefisien perpindahan massa	m/s
ΔH	Energi untuk proses	J/kg
L	Ketebalan	m
r	Kecepatan reaksi	Kg/s
T	Temperatur di dalam bahan	$^\circ C$
T_m	Temperatur minyak di permukaan bahan	$^\circ C$
t	Waktu	s
λ	Energi untuk proses perubahan fase	J/kg
ρ	Densitas	Kg/m^3

Subscripts

a	Air di dalam padatan
a^*	Air di luar padatan
am	Asam amino
g	Gelatinisasi
gr	Gula reduksi
km	Karamelisasi
m	Minyak di dalam padatan
m_l	Maillard
m^*	Minyak di luar padatan
pf	Massa perubahan fase
pt	Pati
sk	Sukrosa
β -k	β -karoten

DAFTAR PUSTAKA

- AOAC (1995). *Official methods analysis of the associations of official analytical chemists*. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.
- Atteba, P. dan Mittal, G.S. (1994). Modeling the deep-fat frying of beef meatballs. *International Journal of Food Science and Technology* **29**: 429-440.
- Edwards, A.L. (1976). *An introduction to linear regression on correlation for india*. National Seed Corporation. New Delhi.
- Farkas, B.E., Singh, R.P. dan Rumsey, T.R. (1996a). Modeling heat and mass transfer in immersion frying, part I: Model development. *Journal of Food Engineering* **29**: 211-226.
- Farkas, B.E., Singh, R.P. dan Rumsey, T.R. (1996b). Modeling heat and mass transfer in immersion frying, part II: Model solution and verification. *Journal of Food Engineering* **29**: 227-248.
- Fellow, P. (1988). *Food processing technology principles and practice*. Ellis Horwood Chichester.
- Garayo, J. dan Moriera, R. (2002). Vacuum frying of potato chips. *Journal of Food Engineering* **55**: 181-191.
- Kawas, M.L. dan Moreire, R.G. (2000). *Characterization of product quality attributes of tortilla chips during the frying process*. M.S. thesis, Texas A&M University, College Station, TX.
- Math, R.G., Velu, V., Nagender, A. dan Rao, D.G. (2003). Effect of frying conditions on moisture, fat and density of papad. *Journal of Food Engineering* **64**: 429-434.
- Meyer, L.H. (1982). *Food chemistry*. Westport Connecticut : The AVI Publishing Company Inc.
- Ni, H., dan Datta, A.K. (1999). Moisture, oil and energy transport during deep frying of food materials. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers* **77**: 194-203.
- Saguy, I.S., Ufheil, G. dan Livings, S. (1998). Oil uptake in deep-fat frying: a review. *Oleagineux Corps gras Lipides*, 5, 30-35. SAS Institute, Inc. 1990. SAS procedures guide (3rd edition). Version 6. SAS Institute, Inc., Cary, NC.
- Supriyanto (2007). *Proses Penggorengan Bahan Makanan Sumber Pati: Kajian Nisbah Amilosa-Amilopektin*. Disertasi. Sekolah Pascasarjana. UGM Yogyakarta

Whitaker, S. (1977). Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media: A theory of drying. *Advances in Heat Transfer* **13**: 119-203.

Winarno, F.G. dan Fardiaz, S. (1992). *Pengantar Teknologi Pangan*. Edisi II. Gramedia. Jakarta.

Yamsaengsung, dan Moriera, R.G. (2002a). Modeling the transport phenomena and structural changes during

deep fat frying. Part I: Model development. *Journal of Food Engineering* **53**: 1-10.

Yamsaengsung, dan Moriera, R.G. (2002b). Modeling the transport phenomena and structural changes during deep fat frying. Part II: Model solution and validation. *Journal of Food Engineering* **53**: 11-25.