

PEMODELAN MATEMATIK PERUBAHAN PARAMETER MUTU KERUPUK SELAMA PENGGORENGAN DENGAN PASIR

[Mathematical Modeling of Quality Parameter Changes of Chips During Sand Frying]

Siswantoro^{1)*}, Budi Rahardjo²⁾, Nursigit Bintoro²⁾, dan Pudji Hastuti²⁾

¹⁾ Fakultas Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto

²⁾ Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta

Diterima 17 Agustus 2010 / Disetujui 7 Juni 2011

ABSTRACT

Chip is a preferred food by all economic levels of society. Before consumption, chip is prepared by frying. There are different kinds of frying methods; one of them is conducted using sand as the heat transfer medium, known as "hot sand frying". Frying using sand is interesting because of the specific characteristics of the final product. First, the chip is not oily, so that it does not easily become rancid. Secondly, chip prepared by sand frying is easily returned to its crunchiness by heating it at medium temperature (between 35 - 45°C). The general purpose of this research is to develop a frying process using sand as the heat transfer medium. The specific purpose of this research is to develop a mathematical model to explain the quality parameter changes during sand frying. This laboratory based experiment was conducted using river sand and ferric sand as the medium for hot transfer and raw chip as the sample food. Equipment used include tools for measuring physical and thermal properties, a sand frying machine, tachometer, thermocouple, data logger, interface, and a personal computer. The results show that the average deviation of the predicted values is less than 10%, which suggests that the proposed mathematical model has a reliable precision level.

Keyword: mathematical modeling, hot sand frying, quality parameter

PENDAHULUAN

Proses penggorengan berlangsung melalui kontak dengan media penghantar panas dan dilakukan pada suhu tinggi. Meskipun penggorengan merupakan proses pemasakan pangan yang sudah lama dilakukan, tetapi proses tersebut masih banyak yang belum diungkap secara ilmiah (Levine, 1990; Supriyanto, 2007).

Lazimnya penggorengan dilakukan dengan menggunakan minyak. Minyak berfungsi sebagai media penghantar panas, meratakan suhu dan berperan sebagai pemberi rasa gurih. Selama penggorengan kerupuk mengalami penyerapan minyak cukup tinggi, mencapai 18% (Soekarto, 1997). Pada penggorengan bahan berpati mengalami penyerapan minyak sebesar 15% (Supriyanto, 2007). Penyerapan minyak yang cukup tinggi akan menyebabkan produk mudah menjadi tengik apabila selama penyimpanan mengalami kontak dengan oksigen. Penggunaan minyak goreng pada akhir-akhir ini sering menimbulkan permasalahan yaitu : (1) Ketersediaannya kurang seimbang dengan kebutuhan sehingga menyebabkan harga melambung cukup tinggi; (2) Adanya kesadaran masyarakat untuk mengurangi konsumsi makanan yang mengandung lemak yang disinyalir akan berdampak kurang baik bagi kesehatan; (3) Adanya kewaspadaan terhadap produk hasil gorengan yang menggunakan minyak yang digunakan untuk penggorengan secara berulang; (4) Pengkonsumsian minyak terutama lemak jenuh dianggap merupakan penyebab naiknya potensi sakit jantung koroner, kanker, diabetes dan tekanan darah tinggi

(Sartika, 2009). Permasalahan tersebut memberikan pemikiran untuk dilakukan penelitian tentang penggorengan menggunakan pasir sebagai media penghantar panas (*hot sand frying*). Ada beberapa keuntungan apabila penggorengan dilakukan menggunakan pasir. Keuntungan tersebut antara lain : (1) Produk tidak mengandung minyak goreng sehingga tidak mudah tengik; (2) Pasir dalam bentuk curah (*bulk*) merupakan benda padat yang mudah mengalir (menyerupai benda cair), serta mempunyai nilai kontak panas permukaan (*h*) cukup besar, yaitu 69,2 J/dt.m².°C untuk pasir sungai, dan 128,7 J/dt.m².°C untuk pasir besi ; (3) Pasir sebagai media penghantar panas mudah di dapat dan murah; (4) Mengurangi ketergantungan penggorengan menggunakan minyak goreng; (5) Penurunan kerenyahan produk yang digoreng (kerupuk) dapat dicegah dengan melakukan rekondisi dengan cara dijemur pada sinar matahari atau dipanaskan pada suhu yang tidak terlalu tinggi (35 – 45°C) (Siswantoro, 2009).

Penggorengan makanan berpati (kerupuk) dengan pasir sebagai media penghantar panas telah dilakukan di beberapa daerah di Indonesia. Namun sejauh ini belum banyak informasi dan penelitian tentang penggorengan dengan pasir sebagai media penghantar panas, terutama yang terkait dengan perubahan parameter produk (kadar air, volume, tegangan-regangan dan kerenyahan) terhadap suhu dan lama penggorengan. Berdasarkan permasalahan dan keuntungan yang telah diuraikan, maka dilakukan penelitian dengan tujuan umum untuk mengembangkan metode penggorengan dengan menggunakan pasir sebagai media penghantar panas. Tujuan khusus adalah untuk mengembangkan model matematik perubahan parameter mutu kerupuk yang meliputi kadar air, volume, tegangan, dan regangan terhadap suhu dan lama

*Korespondensi penulis :
E-mail : siswantoro_07@yahoo.co.id

penggorengan dengan pasir sebagai media penghantar panas, serta menguji tingkat kerenyahan produk dengan acuan nilai tegangan, regangan, dan uji inderawi.

METODOLOGI

Bahan dan alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi kerupuk mentah, pasir sungai, dan pasir besi. Kerupuk dibuat dari tepung tapioka tanpa penambahan bumbu dengan kadar air 9 - 10% basis kering, dengan ukuran 2 x 2 cm dan tebal 2 mm. Pasir sungai diperoleh dari sungai Serayu yang terletak di Kabupaten Banyumas, sedangkan pasir besi diperoleh dari pantai Srandil di Kabupaten Cilacap. Ukuran diameter pasir sungai dipisahkan menjadi 3 kelompok ukuran (0,25 - 0,50, 0,50 - 1,00, dan 1,00 - 2,00 mm), sedangkan pasir besi dipisahkan menjadi 2 kelompok ukuran (0,10 - 0,25, dan 0,25 - 0,40 mm).

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi alat ukur suhu, plat Aluminium, alat ukur tegangan-regangan, alat analisis laboratorium, dan alat penggoreng kerupuk. Alat ukur suhu meliputi termokopel dengan diameter 0,4 mm, data logger dengan 4 titik pengukuran, interface, dan komputer. Plat Aluminium ukuran 2 x 2 cm dengan tebal 2 mm. Alat ukur tegangan-regangan berupa "Universal Testing Machine". Alat analisis laboratorium meliputi oven, neraca analitik, gelas ukur, desikator, tachometer, stop watch, ayakan pasir standar, dan jangka sorong. Alat penggoreng kerupuk menggunakan pasir dengan bentuk silinder (*drum*) yang dilengkapi dengan mekanisme pengatur kecepatan putar (rpm), serta pengatur suhu proses.

Metode yang digunakan meliputi pengukuran, pengembangan model matematik, dan uji inderawi tingkat kerenyahan kerupuk goreng pasir. Proses penggorengan dilakukan dengan variasi diameter pasir, variasi rpm silinder, dan variasi suhu yang direkam dengan data logger setiap interval 5 detik. Pasir yang digunakan dicuci guna menghilangkan kotoran dan debu yang tercampur dilakukan dengan cara dimasukkan dalam wadah (anyaman dari bambu) kemudian dimasukkan dalam air dan diaduk-aduk selama 15 menit. Setelah itu pasir ditiriskan dan dijemur pada terik matahari sampai kering (kadar air 9 - 10% basis kering). Pasir yang sudah kering diayak dan dikelompokkan berdasarkan ukuran diameter. Pasir yang sudah dikelompokkan berdasar diameter kemudian diukur nilai koefisien kontak panas permukaan (h), kemudian digunakan untuk penggorengan kerupuk.

Kerupuk setelah digoreng pasir dilakukan uji tingkat kerenyahan berdasarkan skala numerik (skoring) yang dilakukan secara inderawi (organoleptik). Panelis yang digunakan adalah panelis semi terlatih dengan jumlah 20 orang. Uji inderawi ini dimaksudkan sebagai acuan yang dapat digunakan untuk mendukung data sifat fisik (tegangan dan regangan) yang diukur secara kuantitatif dengan alat ukur "Universal Testing Machine". Disamping itu juga dilakukan pengukuran dan pengembangan model matematik yang meliputi kadar air, rasio volume, tegangan, dan regangan

kerupuk selama penggorengan. Bagan alir pelaksanaan penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.

Pengukuran

Data parameter mutu kerupuk yang terdiri dari kadar air, rasio volume pemekaran, tegangan, regangan, dan kerenyahan diperoleh melalui penggorengan sesuai perlakuan suhu proses (T) selama waktu (θ), kecepatan putar silinder penggoreng (rpm), dan diameter pasir (d) dengan pengulangan sebanyak 5 kali. Sebelum dilakukan pengukuran parameter mutu, kerupuk yang selesai digoreng dibiarkan selama sekitar 5 menit pada suhu kamar, kemudian baru dikemas dalam kantong plastik dan dimasukkan dalam desikator yang telah diisi dengan desikan. Kondisi tersebut dimaksudkan untuk menjaga agar sifat fisik dan kimia kerupuk tidak banyak berubah dari kondisi saat setelah digoreng. Pada kondisi ini kerupuk siap untuk diukur parameter mutunya.

Pemodelan

Beberapa batasan masalah yang digunakan pada pemodelan ini meliputi : (1) Suhu pasir merata dan konstan selama proses penggorengan; (2) Suhu kerupuk selama penggorengan dianggap homogen, serta memenuhi kondisi tahanan internal pindah panas kecil bila dibanding tahanan eksternalnya, dengan nilai Biot (Bi) = hr/k < 0,2 sehingga suhu rata-rata produk yang digoreng sama dengan suhu permukaannya (Earle, 1966; Mohsenin 1980).

Selama penggorengan panas dipindahkan dari pasir ke permukaan kerupuk melalui kontak panas permukaan. Pengukuran (observasi) koefisien kontak panas permukaan (h) dilakukan dengan penggorengan plat Aluminium di dalam alat penggoreng dengan pasir. Besaran fisik dan termis dari Aluminium yang terdiri : luas permukaan (A), massa (m), dan panas jenis (Cp) sudah diketahui. Selama proses penggorengan suhu Aluminium dan suhu pasir diukur dengan termokopel dan direkam dengan data logger dan komputer setiap interval waktu 5 detik. Dari hasil pengukuran diperoleh suhu awal plat Aluminium (Ti), suhu aluminium pada waktu θ (T θ), dan suhu pasir (Tps). Hasil pengukuran (observasi) koefisien kontak panas permukaan (h) dihitung dengan persamaan berikut :

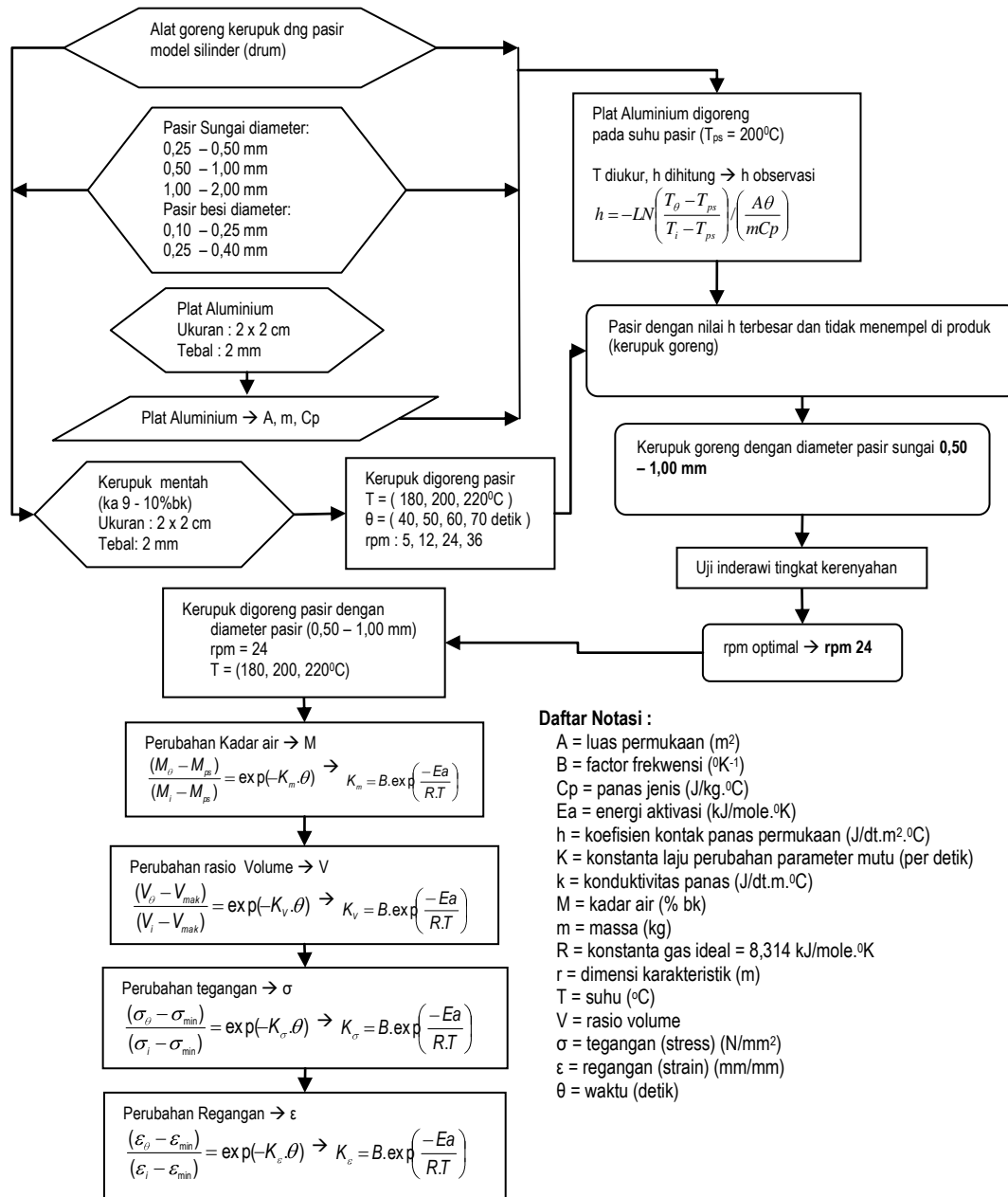
$$h = -LN \left(\frac{T_{\theta} - T_{ps}}{T_i - T_{ps}} \right) / \left(\frac{A \theta}{m Cp} \right) \dots \dots \dots (1)$$

Selama penggorengan kerupuk mengalami perubahan parameter yang meliputi kadar air, volume, tegangan, dan regangan. Pengembangan model matematik perubahan parameter produk selama penggorengan diuraikan sebagai berikut :

Rasio volume (V) selama penggorengan (mengalami kenaikan)

$$\frac{dV}{d\theta} = K_V (V_{mak} - V)$$

$$\left(\frac{V_{\theta} - V_{mak}}{V_i - V_{mak}} \right) = \exp(-K_V \cdot \theta) \dots \dots \dots (2)$$



- Daftar Notasi :**
 A = luas permukaan (m²)
 B = factor frekwensi (°K⁻¹)
 Cp = panas jenis (J/kg.°C)
 Ea = energi aktivasi (kJ/mole.°K)
 h = koefisien kontak panas permukaan (J/dt.m².°C)
 K = konstanta laju perubahan parameter mutu (per detik)
 k = konduktivitas panas (J/dt.m.°C)
 M = kadar air (% bk)
 m = massa (kg)
 R = konstanta gas ideal = 8,314 kJ/mole.°K
 r = dimensi karakteristik (m)
 T = suhu (°C)
 V = rasio volume
 σ = tegangan (stress) (N/mm²)
 ε = regangan (strain) (mm/mm)
 θ = waktu (detik)

Gambar 1. Bagan alir pelaksanaan penelitian

Seperti pada pindah panas, pindah massa air produk pada penelitian ini juga dimodelkan sebagai "thin layer" atau "single kernel". Pada model ini kadar air bahan adalah homogen diseluruh partikel. Kondisi ini dipenuhi pada nilai $D\theta/L^2 > 1,5$ (Hines, Maddox, 1985). Laju kehilangan air bahan proposional dengan perbedaan kadar air bahan rata-rata dan kadar air pasir saat penggorengan. Laju perubahan massa produk sebagai akibat terjadinya perpindahan air saat penggorengan dengan menggunakan pasir sebagai media penghantar panas, dapat ditulis dengan model matematik sebagai berikut :
 Kadar air (M) selama penggorengan (mengalami penurunan)

$$\frac{dM}{d\theta} = K_m(M_{ps} - M)$$

$$\frac{(M_{\theta} - M_{ps})}{(M_i - M_{ps})} = \exp(-K_m \cdot \theta) \dots \dots \dots (3)$$

Parameter produk yang terdiri dari tegangan, dan regangan selama penggorengan (mengalami penurunan)

Untuk tegangan (σ) :

$$\frac{d\sigma}{d\theta} = -K_{\sigma}(\sigma - \sigma_{min})$$

$$\left(\frac{\sigma_{\theta} - \sigma_{min}}{\sigma_i - \sigma_{min}} \right) = \exp(-K_{\sigma} \cdot \theta) \dots \dots \dots (4)$$

Untuk regangan (ε) :

$$\left(\frac{\epsilon_{\theta} - \epsilon_{min}}{\epsilon_i - \epsilon_{min}} \right) = \exp(-K_{\epsilon} \cdot \theta) \dots \dots \dots (5)$$

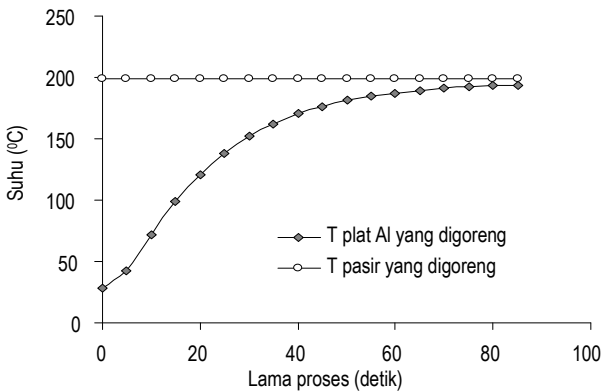
Konstanta laju perubahan parameter produk (K) yang diperoleh dari hasil perhitungan di atas tergantung pada suhu penggorengan. Konstanta laju perubahan tersebut dikemukakan dengan persamaan Arrhenius sebagai berikut :

$$\ln(K) = -\frac{Ea}{R.T} + \ln(B) \dots\dots\dots (6)$$

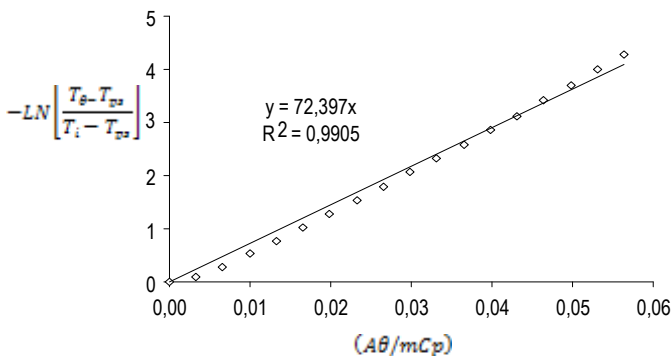
HASIL DAN PEMBAHASAN

Koefisien kontak panas permukaan (h)

Salah satu hasil pengukuran suhu plat Aluminium yang digoreng pada suhu 200°C dengan diameter pasir 0,25 – 0,50 mm, dan rpm 12 dapat dilihat pada Gambar 2. Hasil pengukuran tersebut dapat dilihat bahwa plat aluminium yang digoreng mulai mendekati suhu proses (200°C) setelah penggorengan berlangsung 70 detik. Dari hasil pengukuran suhu Aluminium dan suhu pasir (Gambar 2), nilai koefisien kontak panas permukaan (h) dapat ditentukan dengan cara menggambarkan secara grafik seperti dapat dilihat pada Gambar 3 dengan menggunakan Persamaan (1).



Gambar 2. Hasil pengukuran suhu Aluminium dan suhu pasir selama penggorengan



Gambar 3. Grafik untuk menentukan besarnya nilai h pengukuran

Gambar 3 diperoleh nilai koefisien kontak panas permukaan (h) sebesar 72,4 J/dt.m².°C, nilai h merupakan slope (gradient) dari persamaan garis lurus. Nilai h tersebut merupakan salah satu contoh hasil pengukuran. Hasil pengukuran nilai h rata-rata dari pasir yang digunakan sebagai penghantar panas dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai rata-rata koefisien kontak panas permukaan (h) pasir yang digunakan

Jenis pasir	Diameter pasir (mm)	Nilai h rata-rata (J/dt.m ² .°C)
Pasir sungai	0,25 – 0,50	78,4
	0,50 – 1,00	69,2
	1,00 – 2,00	60,3
Pasir besi	0,10 – 0,25	137,6
	0,25 – 0,40	119,9

Dari hasil pengukuran dapat dilihat bahwa makin kecil diameter pasir mempunyai nilai h makin besar, dan pasir besi mempunyai nilai h lebih besar dibanding pasir sungai. Apabila hanya ditinjau dari sudut pandang transfer panasnya maka pasir dengan nilai h paling besar akan menghasilkan laju pindah panas yang paling baik digunakan untuk media penggoreng. Namun demikian apabila digunakan untuk penggorengan produk pangan yang dalam penelitian ini digunakan kerupuk tidak cukup hanya dilihat dari laju transfer panasnya saja, tapi juga harus dipertimbangkan adanya pengaruh pasir yang masih menempel pada saat kerupuk selesai digoreng. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pasir dengan diameter < 0,50 mm kurang baik digunakan untuk penggorengan kerupuk karena ada sebagian pasir yang masih menempel pada kerupuk goreng. Hasil ini juga didukung penelitian (Siswantoro, 2009) yang menyatakan bahwa makin kecil diameter pasir akan menyebabkan makin banyak butiran pasir menempel pada kerupuk goreng.

Uji inderawi tingkat kerenyahan

Hasil uji inderawi terhadap tingkat kerenyahan dan hasil pengukuran tegangan dan regangan dapat dilihat pada Tabel 2, 3, dan 4. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa penggorengan pada suhu proses 180°C menghasilkan kerupuk dengan nilai organoleptik < 3 (kurang renyah). Penggorengan pada suhu proses 200°C selama 70 detik dengan rpm 24 menghasilkan kerupuk dengan nilai organoleptik 3,75 (sangat renyah). Hasil dengan perlakuan ini merupakan proses yang optimal karena nilai kerenyahannya tidak berbeda nyata dibanding dengan proses yang membutuhkan energi panas lebih besar yaitu perlakuan dengan suhu proses 220°C.

Tabel 2. Nilai tegangan, regangan, dan nilai uji inderawi kerupuk pada suhu proses 180°C.

Rpm	Perlakuan Waktu (detik)	Tegangan (N/ mm ²)	Regangan (mm/mm)	Nilai uji inderawi
12	40	0,487	0,263	1,00
12	50	0,354	0,234	1,40
12	60	0,245	0,211	2,40
12	70	0,176	0,185	2,85
24	40	0,477	0,254	1,20
24	50	0,345	0,225	1,50
24	60	0,237	0,200	2,50
24	70	0,165	0,173	2,95
36	40	0,472	0,250	1,20
36	50	0,341	0,223	1,50
36	60	0,235	0,196	2,50
36	70	0,162	0,169	2,95

Skor /nilai uji inderawi : (1) = tidak renyah; (2) = agak renyah; (3) = renyah; (4) = sangat renyah

Tabel 3. Nilai tegangan, regangan, dan nilai uji inderawi kerupuk pada suhu proses 200°C.

Perlakuan		Tegangan (N/mm ²)	Regangan (mm/mm)	Nilai uji inderawi
Rpm	Waktu (detik)			
12	40	0,330	0,206	1,60
12	50	0,226	0,179	2,60
12	60	0,157	0,158	3,15
12	70	0,112	0,140	3,50
24	40	0,325	0,198	1,70
24	50	0,220	0,173	2,70
24	60	0,150	0,150	3,25
24	70	0,105	0,133	3,75
36	40	0,321	0,195	1,75
36	50	0,218	0,170	2,75
36	60	0,147	0,149	3,25
36	70	0,102	0,130	3,75

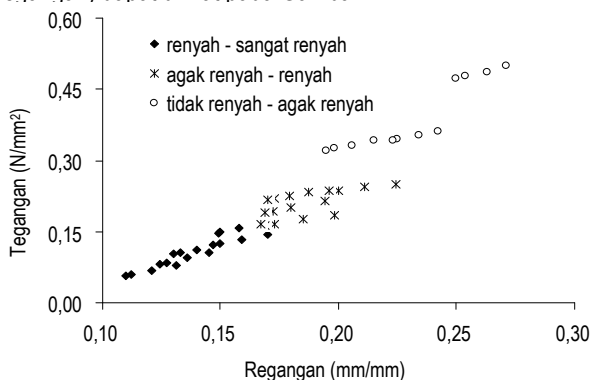
Skor /nilai uji inderawi : (1) = tidak renyah; (2) = agak renyah; (3) = renyah; (4) = sangat renyah

Tabel 4. Nilai tegangan, regangan, dan nilai uji inderawi kerupuk pada suhu proses 220°C.

Perlakuan		Tegangan (N/mm ²)	Regangan (mm/mm)	Nilai uji inderawi
Rpm	Waktu (detik)			
12	40	0,201	0,180	2,85
12	50	0,132	0,159	3,25
12	60	0,094	0,136	3,65
12	70	0,067	0,121	3,80
24	40	0,192	0,172	2,90
24	50	0,125	0,150	3,35
24	60	0,085	0,127	3,75
24	70	0,060	0,112	3,75
36	40	0,190	0,169	2,90
36	50	0,122	0,147	3,35
36	60	0,081	0,124	3,75
36	70	0,058	0,110	3,75

Skor /nilai uji inderawi : (1) = tidak renyah; (2) = agak renyah; (3) = renyah; (4) = sangat renyah

Hasil uji inderawi tingkat kerenyahan terhadap kerupuk goreng pasir, dan hasil pengukuran sifat fisik (tegangan dan regangan) dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Tingkat kerenyahan kerupuk goreng pasir berdasarkan nilai tegangan dan regangan

Dari Gambar 4 dapat dilihat bahwa kerupuk goreng pasir mempunyai tekstur renyah sampai sangat renyah (skor uji inderawi 3 – 4), tegangannya $\leq 0,150$ N/mm² dan regangannya $\leq 0,175$ mm/mm. Kerupuk mempunyai tekstur agak renyah sampai renyah (skor uji inderawi 2 – 3), apabila tegangannya

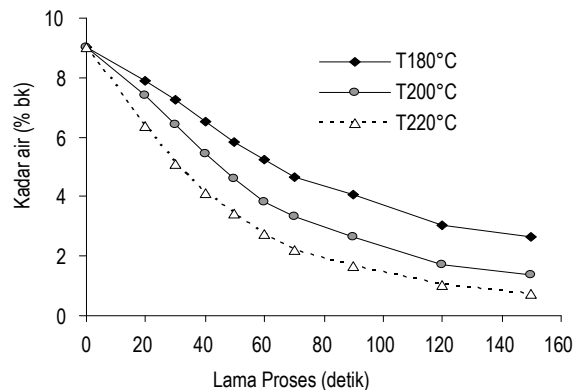
berada pada kisaran 0,15 – 0,30 N/mm², dan regangannya berada pada kisaran 0,175 – 0,225 mm/mm. Kerupuk mempunyai tekstur tidak renyah sampai agak renyah (skor uji inderawi 1 – 2), apabila tegangannya $\geq 0,30$ N/mm² dan regangannya $\geq 0,20$ mm/mm. Kerenyahan merupakan salah satu sifat penting yang digunakan oleh konsumen untuk menilai kualitas kerupuk goreng. Kerenyahan makanan dapat dinilai pada kemudahan terputusnya partikel-partikel penyusun apabila dilakukan pengunyahan. Kemudahan pengunyahan kerupuk goreng tergantung pada ukuran kekukuhan granula-granula pati yang sudah mekar (Haryadi, 1990; Amerine *et. al.*, 1985).

Kerenyahan secara kuantitatif dipengaruhi oleh nilai tegangan dan regangan. Kerupuk yang mempunyai nilai tegangan kecil dan regangan kecil dapat dipastikan kerupuk tersebut bersifat renyah. Kerupuk yang nilai tegangannya besar dapat dikatakan kerupuk tersebut keras, sedangkan kerupuk yang nilai regangannya besar dapat dikatakan kerupuk tersebut bersifat "alot". Dari kenyataan tersebut maka untuk mempresentasikan tingkat kerenyahan kerupuk sebaiknya digunakan dua sifat fisik yang dapat diukur secara kuantitatif yaitu tegangan dan regangan.

Perubahan kadar air

Perubahan kadar air kerupuk selama penggorengan terjadi karena perpindahan massa air dari dalam menuju ke luar produk. Salah satu contoh hasil pengukuran kadar air kerupuk selama penggorengan dapat dilihat pada Gambar 5. Dari hasil pengukuran (observasi) diperoleh bahwa selama penggorengan terjadi penurunan kadar air kerupuk yang mengarah pada kadar air pasir (M_{ps}) sebesar 0% basis kering, dengan bentuk secara umum mengikuti fungsi eksponensial. Penurunan kadar air kerupuk selama proses penggorengan dapat dikelompokkan menjadi 3 tahap berdasar waktu proses.

Tahap pertama waktu proses 0 – 20 detik, pada tahap ini penurunan kadar air berlangsung lambat. Penurunan kadar air yang lambat ini diduga pada tahap ini kerupuk baru menerima panas, dan suhunya masih dibawah 100°C, serta belum banyak mengalami perubahan volume.



Gambar 5. Kadar air kerupuk selama penggorengan (rpm 24, diameter pasir 0,50 – 1,00 mm)

Tahap kedua waktu proses 20 – 50 detik, pada tahap ini laju penurunan kadar air berlangsung cepat. Kondisi ini diduga pada tahap tersebut suhu kerupuk sudah melebihi 100°C sehingga air bahan telah mencapai titik dididih air serta volume kerupuk mulai

mengembang dan berlangsung secara simultan dengan terjadinya desakan uap air dari dalam ke luar bahan. Tahap ketiga waktu proses > 50 detik, pada tahap ini laju penurunan kadar air mulai melambat. Kondisi ini diduga kadar air bahan makin kecil sehingga air terikat makin kuat, serta perbedaan kadar air kerupuk dan kadar air pasir semakin kecil sehingga daya dorong air dari dalam ke luar produk juga semakin kecil.

Kondisi tersebut sejalan dengan pernyataan Rohsenow dan Choi (1961) bahwa pindah massa terjadi disebabkan adanya suatu perbedaan konsentrasi, yaitu pergerakan dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi yang lebih rendah. Seperti halnya pada pindah panas yang terjadi karena adanya perbedaan suhu. Pernyataan tersebut sejalan dengan apa yang diterangkan oleh (Crank, 1986; Geankoplis, 1980) bahwa besarnya fluks massa atau laju difusi suatu bahan yang melewati luas penampang adalah proposional dengan perbedaan konsentrasi pada daerah yang ditinjau.

Nilai konstanta laju perubahan kadar air (K_m) dapat dihitung dengan cara memplotkan kadar air hasil pengukuran (Gambar 5), dengan menggunakan persamaan perubahan kadar air Persamaan (3). Nilai konstanta laju perubahan kadar air (K_m) sebagai fungsi suhu seperti dapat dilihat pada Tabel 5. Kemudian diselesaikan dengan persamaan Arrhenius (Persamaan 6), sehingga diperoleh nilai konstanta laju perubahan kadar air sebagai berikut : $K_m = 74,672 \exp\{-4096,9/(273+T)\}$

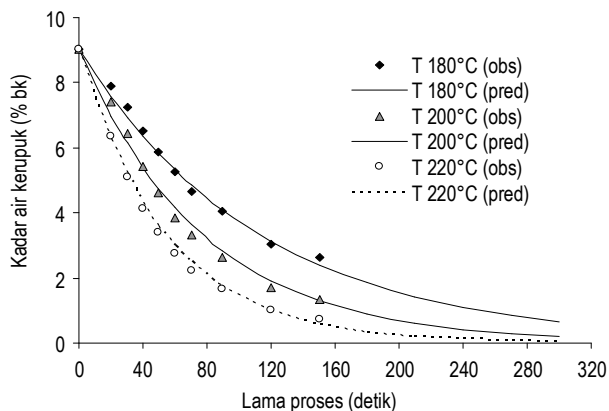
Tabel 5. Konstanta laju perubahan kadar air (K_m) hasil pengukuran

T (°C)	T (°K)	1/T (°K)	K_m	ln (K_m)
180	453	0,002207	0,0087	-4,74443
200	473	0,002114	0,0133	-4,31999
220	493	0,002028	0,0181	-4,01184

Jadi model matematik untuk menduga kadar air selama proses penggorengan adalah:

$$\left(\frac{M_\theta - M_{ps}}{M_i - M_{ps}} \right) = \exp\{(-74,672)(e^{-40969/(273+T_{ps})})\theta\}$$

Hasil prediksi kadar air kerupuk selama proses penggorengan dapat dilihat pada Gambar 6. Tingkat kesalahan rata-rata kadar air prediksi sebesar 4,95%, dengan standar deviasi 6,85%.



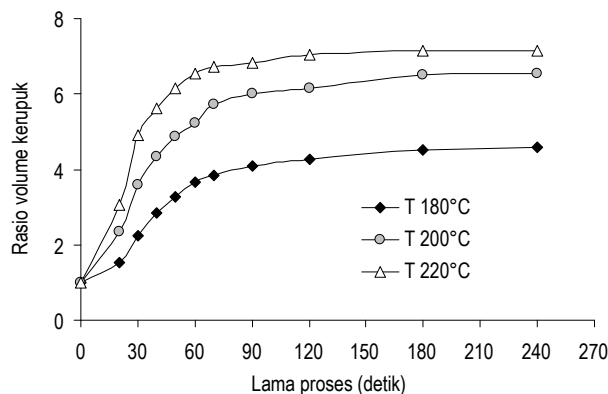
Gambar 6. Kadar air kerupuk prediksi dan observasi selama penggorengan

Dari Gambar 6 dapat dilihat bahwa makin tinggi suhu proses akan menyebabkan laju penguapan air kerupuk makin cepat, namun kondisi penguapan air tersebut makin lama proses penggorengan lajunya makin menurun dan menuju ke laju penguapan nol. Pada laju penguapan air sebesar nol dicapai apabila kadar air kerupuk sama dengan kadar air pasir sebagai media penghantar panas. Kondisi tersebut didukung dengan pustaka yang menyatakan bahwa laju kehilangan air proposional dengan perbedaan kadari air bahan rata-rata dan kadar air pasir (media penghantar panas) (Hines and Maddox, 1985).

Perubahan volume

Pada penelitian ini volume kerupuk didiskripsikan dengan rasio volume yaitu merupakan angka perbandingan antara volume pada waktu = θ dengan volume pada waktu = 0 (volume saat pengukuran dibagi volume awal). Hasil pengukuran (observasi) terhadap perubahan rasio volume kerupuk goreng pasir dapat dilihat pada Gambar 7.

Dari hasil pengukuran (observasi) diperoleh bahwa selama penggorengan kerupuk mengalami kenaikan volume yang mengarah pada rasio volume maksimal (V_{mak}), dengan bentuk secara umum mengikuti fungsi eksponensial. Laju perubahan rasio volume dari 180 detik penggorengan ke 240 detik cukup kecil atau dapat dikatakan volume kerupuk relatif tidak berubah (konstan). Dari hasil pengukuran tersebut maka waktu penggorengan 240 detik digunakan sebagai acuan rasio volume maksimal (V_{mak}).



Gambar 7. Rasio volume kerupuk selama penggorengan (rpm 24, diameter pasir 0,50 – 1,00 mm)

Pertambahan volume kerupuk selama proses penggorengan dapat dibagi menjadi 3 tahap berdasarkan waktu proses penggorengan. Tahap pertama, terjadi pada kisaran waktu 0 – 20 detik awal proses, pada tahap ini pertambahan volume berlangsung lambat. Pertambahan volume yang lambat ini diduga pada tahap pertama kerupuk baru menerima panas, sifat fisik kerupuk belum melunak, dan tekanan uap air dari dalam bahan yang berefek mendorong terhadap pengembangan volume kerupuk belum banyak berpengaruh. Tahap kedua, terjadi pada kisaran waktu 20 – 50 detik proses, pada tahap ini laju pertambahan volume berlangsung cepat. Pada tahap kedua suhu kerupuk sudah melebihi 100°C, sifat fisiknya melunak, dan air bahan telah mencapai titik dididih air sehingga

volume kerupuk mengembang dengan cepat sejalan dengan terjadinya desakan uap air dari dalam ke luar bahan. Pada tahap kedua ini bila dilihat lebih detail terjadi penambahan volume paling cepat yaitu pada perioda proses 20 – 30 detik, terjadinya penambahan volume secara cepat dan berlangsung secara tiba-tiba ini biasa dikenal dengan istilah “oven spring”. Tahap ketiga, terjadi setelah waktu proses penggorengan > 50 detik. Pada tahap ini laju penambahan volume mulai melambat dan menuju kearah volume konstan setelah waktu proses > 70 detik. Kondisi ini diduga air yang teruapkan makin kecil sehingga efek dorong akibat tekanan uap air dari dalam ke luar bahan yang berpengaruh pada proses pengembangan volume sudah makin kecil.

Penggorengan menyebabkan bahan makanan bersumber pati mengalami pemekaran volume. Pemekaran bahan makanan bersumber pati (kerupuk) selama penggorengan dipengaruhi oleh kadar air kerupuk mentah (Haryono, 1979; Haryadi, 1990). Lebih lanjut Soekarto (1997) menjelaskan bahwa bahan makanan bersumber pati selama penggorengan mencapai pemekaran maksimal pada kadar air bahan mentah spesifik. Sebagai contoh kerupuk sagu mekar dengan baik apabila bahan mentahnya mempunyai kadar air 4,1 – 12,7% basis kering, dan kerupuk tapioka pada kadar air 8,2 – 12,4% basis kering. Menurut (Soekarto, 1997; Supriyanto, 2007) pemekaran volume selain dipengaruhi oleh kadar air awal juga dipengaruhi oleh ketebalan awal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa makanan sumber pati dengan tebal > 0,25 cm tidak dapat mengalami pemekaran dengan sempurna. Kondisi tersebut diduga pada ketebalan > 0,25 cm kerupuk mempunyai nilai Biot > 0,2, dengan kondisi ini akan menyebabkan perbedaan (*gradient*) suhu di dalam produk, sehingga proses pemekarannya tidak dapat berlangsung secara serempak. Pemekaran volume kerupuk sangat penting dalam penggorengan karena makin besar volume pemekaran kerupuk makin renyah. Umumnya makin banyak kandungan amilopektin, kerupuk makin mengembang. Hal ini karena bangunan amilopektin kurang kompak dan kurang kuat menahan pengembangan volume massa selama penggorengan. Namun demikian pengembangan volume kerupuk yang makin besar mempunyai kelemahan karena akan menjebak kerupuk bersifat mudah menyerap air (higroskopis) atau makin mudah melempem (Haryadi, 1993; Soekarto, 1997).

Nilai konstanta laju perubahan volume (K_v) dapat dihitung dengan cara memplotkan rasio perubahan volume kerupuk hasil pengukuran dari Gambar 7, dengan menggunakan Persamaan (2). Nilai K_v sebagai fungsi suhu dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Konstanta perubahan volume kerupuk (K_v) pada variasi suhu proses

T (°C)	T (°K)	1/T (°K)	K_v	ln (K_v)
220	493	0,00203	0,0345	-3,367
200	473	0,00211	0,0234	-3,755
180	453	0,00221	0,0208	-3,873

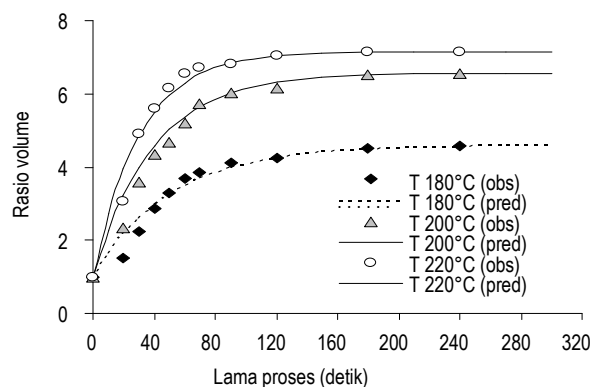
Kemudian diselesaikan dengan persamaan Arrhenius (Persamaan 6), sehingga diperoleh nilai

$$K_v = (9,646)e^{-28022/(273+T_{ps})}$$

Jadi model matematik untuk memprediksi rasio perubahan volume selama proses penggorengan adalah :

$$\left(\frac{V_t - V_{mak}}{V_i - V_{mak}} \right) = \exp\{(-9,646)(e^{-28022/(273+T_{ps})})\}$$

Hasil prediksi dengan model matematik, diperoleh bahwa rasio volume kerupuk selama proses penggorengan mempunyai tingkat kesalahan rata-rata prediksi sebesar 2,76 %, dengan standar deviasi 4,35 %. Menggunakan model ini juga dapat ditentukan waktu proses secara tepat guna menghasilkan volume pengembangan optimal sesuai dengan yang dikehendaki. Hasil prediksi dan observasi rasio volume kerupuk goreng pasir pada 3 variasi suhu proses dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Nilai observasi dan prediksi rasio volume kerupuk goreng pasir (rpm 24, diameter pasir 0,50 – 1,00 mm)

Dari Gambar 8 dapat dilihat bahwa pada batas kisaran suhu perlakuan yang diuji dapat dikatakan bahwa makin tinggi suhu proses akan menghasilkan volume kerupuk makin besar. Setelah 70 detik proses penggorengan rasio volume kerupuk tidak banyak mengalami perubahan.

Tegangan dan regangan

Hasil pengukuran tegangan dan regangan kerupuk pada 3 variasi suhu proses dan lama penggorengan dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Perubahan tegangan dan regangan terhadap suhu dan lama penggorengan (rpm 24, diameter pasir 0,50 – 1,00 mm)

Waktu (detik)	Tegangan (σ) (N/mm ²)			Regangan (ε) (mm/mm)		
	T180°C	T 200°C	T 220°C	T180°C	T 200°C	T 220°C
0	1,655	1,655	1,655	0,406	0,406	0,406
40	0,477	0,325	0,192	0,254	0,198	0,172
50	0,345	0,220	0,125	0,225	0,173	0,150
60	0,237	0,150	0,085	0,200	0,150	0,127
70	0,165	0,105	0,060	0,173	0,133	0,112
240	0,010	0,005	0,003	0,072	0,049	0,034
300	0,010	0,005	0,003	0,063	0,045	0,035

Dari hasil pengukuran (Tabel 7) dapat dilihat bahwa selama penggorengan kerupuk mengalami penurunan tegangan dan regangan. Tegangan dan regangan mencapai nilai minimal pada waktu proses 300 detik, nilai tersebut diambil sebagai acuan karena tegangan dan regangan sudah relatif tidak

mengalami penurunan (konstan) dari waktu proses 240 ke 300 detik.

Tegangan dan regangan merupakan sifat fisik dari bahan, dan sering dikaji sebagai parameter produk untuk menentukan tingkat kerenyahan bahan pangan. Tegangan tekan (stress) merupakan ukuran dari kemampuan bahan untuk menahan gaya tekan persatuan luas, untuk bahan pangan umumnya digunakan satuan N/mm². Regangan (strain) merupakan perbandingan dari deformasi suatu bahan dengan tebal bahan sebelum menerima gaya tekan, sehingga regangan mempunyai satuan mm/mm.

Nilai konstanta laju perubahan tegangan (K_{σ}) dan regangan (K_{ϵ}) dapat dihitung dengan cara memplotkan hasil pengukuran perubahan tegangan dan regangan dari Tabel 7, dengan menggunakan persamaan perubahan tegangan (Persamaan 4), dan regangan (Persamaan 5). Nilai K_{σ} dan K_{ϵ} sebagai fungsi suhu dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Nilai K_{σ} dan K_{ϵ} kerupuk goreng pasir sebagai fungsi suhu

T (°C)	T (°K)	1/T (°K)	Tegangan		Regangan	
			K_{σ}	$\ln(K_{\sigma})$	K_{ϵ}	$\ln(K_{\epsilon})$
180	453	0,002207506	0,0328	-3,4173	0,0155	-4,1669
200	473	0,002114165	0,0405	-3,2064	0,0206	-3,8824
220	493	0,002028398	0,0502	-2,9917	0,0232	-3,7636

Kemudian diselesaikan dengan persamaan Arrhenius (Persamaan 6), sehingga diperoleh nilai

$$K_{\sigma} = (6,177)e^{-23744/(273+T_{ps})}$$

Jadi model matematik untuk menduga perubahan tegangan kerupuk selama penggorengan adalah:

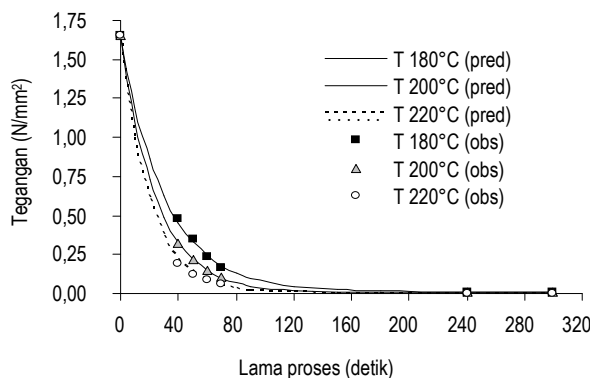
$$\left(\frac{\sigma_{\theta} - \sigma_{\min}}{\sigma_i - \sigma_{\min}} \right) = \exp\{(-6,177)(e^{-23744/(273+T_{ps})})(\theta)\}$$

Diperoleh nilai $K_{\epsilon} = (2,348)e^{-22635/(273+T_{ps})}$

Jadi model matematik untuk menduga perubahan regangan kerupuk selama penggorengan adalah:

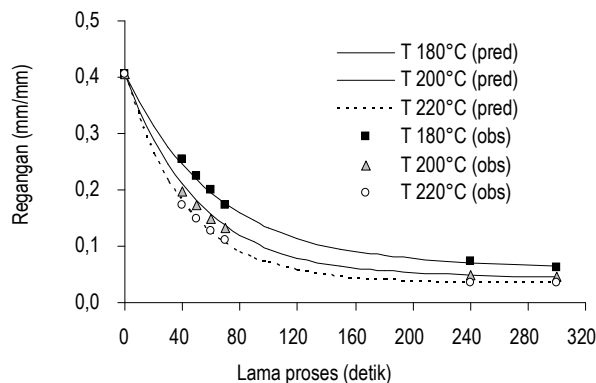
$$\left(\frac{\epsilon_{\theta} - \epsilon_{\min}}{\epsilon_i - \epsilon_{\min}} \right) = \exp\{(-2,348)(e^{-22635/(273+T_{ps})})(\theta)\}$$

Hasil prediksi perubahan parameter produk (tegangan dan regangan) selama proses penggorengan dengan menggunakan model matematik dianggap cukup baik karena tingkat kesalahan rata-rata prediksi untuk tegangan sebesar 6,77%, dengan standar deviasi 4,28%. Sedangkan tingkat kesalahan rata-rata prediksi untuk regangan sebesar 3,35%, dengan standar deviasi 2,75%. Model matematik perubahan tegangan-regangan kerupuk dapat digunakan untuk memprediksi dan mengendalikan tingkat kerenyahan karena kerenyahan kerupuk ditentukan oleh nilai tegangan dan regangannya, sehingga dihasilkan tegangan-regangan kerupuk sesuai dengan yang dikehendaki. Hasil prediksi dan observasi tegangan kerupuk goreng pasir dapat dilihat pada Gambar 9, sedangkan untuk regangan dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 9. Nilai observasi dan prediksi tegangan kerupuk goreng pasir (rpm 24, diameter pasir 0,50 – 1,00 mm)

Hasil penelitian (Gambar 9) dapat dilihat bahwa pada awal proses terjadi laju penurunan tegangan yang cukup cepat dan kemudian berangsur-angsur menurun sejalan dengan makin bertambahnya lama penggorengan. Pada proses penggorengan terjadinya penurunan tegangan yang cepat pada awal proses karena pada tahap tersebut kerupuk mengalami perubahan dari mentah menuju matang dan dalam proses tersebut secara simultan terjadi pertambahan volume dengan kondisi kerupuk makin porus dan makin kering. Setelah penggorengan selama 70 detik masih terjadi penurunannya namun lajunya sudah makin kecil dan setelah 120 detik laju penurunannya mendekati nol atau dengan kata lain nilai tegangan kerupuk sudah mulai konstan. Nilai tegangan kecil mempunyai arti bahwa kemampuan kerupuk untuk menahan gaya tekan persatuan luas makin kecil, sehingga kerupuk mudah patah atau pecah bila ditekan atau dikunyah.



Gambar 10. Nilai observasi dan prediksi regangan kerupuk goreng pasir (rpm 24, diameter pasir 0,50 – 1,00 mm)

Hasil penelitian (Gambar 10) dapat dilihat bahwa terjadi penurunan regangan yang semakin kecil sejalan dengan bertambahnya lama proses penggorengan. Dilihat dari lajunya, penurunan regangan tidak secepat penurunan tegangan. Laju penurunan regangan mulai mendekati nol setelah 200 detik proses penggorengan, artinya setelah 200 detik penggorengan nilai regangan kerupuk sudah mulai mengarah ke nilai regangan konstan. Nilai regangan kecil mempunyai arti bahwa perbandingan nilai deformasi dengan tebal kerupuk sebelum mendapat gaya tekan adalah kecil, sehingga kerupuk mudah hancur apabila ditekan atau dikunyah.

KESIMPULAN

Pada nilai tegangan $\leq 0,15$ N/m² dan regangan $\leq 0,175$ mm/mm kerupuk goreng pasir mempunyai tekstur renyah sampai sangat renyah. Penggorengan pada suhu 200°C selama 70 detik dengan rpm 24 merupakan proses yang optimal dengan skor kerenyahan 3,75 (sangat renyah), nilai tegangan 0,105 N/mm², dan regangan 0,133 mm/mm.

Kadar air (M) kerupuk selama penggorengan merupakan fungsi suhu pasir (T_{ps}) dan waktu (θ). Pada suhu proses 200°C selama 70 detik penggorengan kerupuk mengalami penurunan kadar air rata-rata dari 9,04 – 3,32%. Model matematik yang dikembangkan mempunyai penyimpangan rata-rata 4,95% dengan bentuk model matematik :

$$\left(\frac{M_{\theta} - M_{ps}}{M_i - M_{ps}} \right) = \exp\{(-74,672)(e^{-40969/(273+T_{ps})})\theta\}$$

Rasio volume (V) kerupuk selama penggorengan merupakan fungsi suhu pasir (T_{ps}) dan waktu (θ). Pada suhu proses 200°C selama 70 detik penggorengan kerupuk mengalami pertambahan rasio volume rata-rata 5,72 kali. Model matematik yang dikembangkan mempunyai penyimpangan 2,76% dengan bentuk model matematik:

$$\left(\frac{V_{\theta} - V_{mak}}{V_i - V_{mak}} \right) = \exp\{(-9,646)(e^{-28022/(273+T_{ps})})\theta\}$$

Tegangan (σ) kerupuk selama penggorengan merupakan fungsi suhu pasir (T_{ps}) dan waktu (θ). Model matematik yang dikembangkan mempunyai penyimpangan rata-rata 6,77% dengan bentuk model matematik:

$$\left(\frac{\sigma_{\theta} - \sigma_{min}}{\sigma_i - \sigma_{min}} \right) = \exp\{(-6,177e^{-23744/(273+T_{ps})})\theta\}$$

Regangan (ε) kerupuk selama penggorengan merupakan fungsi suhu pasir (T_{ps}) dan waktu (θ). Model matematik yang dikembangkan mempunyai penyimpangan rata-rata 3,35% dengan bentuk model matematik:

$$\left(\frac{\epsilon_{\theta} - \epsilon_{min}}{\epsilon_i - \epsilon_{min}} \right) = \exp\{(-2,348)(e^{-22635/(273+T_{ps})})\theta\}$$

DAFTAR PUSTAKA

Amerine MA, Pangborn RM, Roessler EB. 1985. Priciple of Sensory Evaluation of Food, Academic Press, New York.
 Crank J. 1986. The mathematics of Diffusion. Clarendon Press, Oxford.

Earle RL. 1966. Unit Operations in Food Processing. Pergamon Press. New York.
 Geankoplis CJ. 1980. Transport Processes and Unit Operations. Allyn and Bacon, Inc., Boston.
 Haryadi. 1990. Pengaruh Kadar Amilosa Beberapa Jenis Pati Terhadap Pengembangan, Higroskopisitas dan Sifat Inderawi Kerupuk. Lembaga Penelitian Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.
 Haryadi. 1993. Dasar-dasar dan pemanfaatan ilmu dan teknologi pati. Agritech 13(3), pp.37- 42, Fakultas Teknologi Pertanian UGM.
 Haryono B. 1979. Pengamatan Komposisi Kimia Kerupuk Udang Guna Mencari Sifat-sifat Penentu Mutunya. Fakultas Teknologi Pertanian. Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.
 Henderson SM, Perry RL. 1980. Agricultural Process Engineering. AVI Publishing Company, Inc., Westport, Connecticut.
 Hines AL, Maddox RN. 1985. Mass Transfer Fundamentals and Applications. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
 Holman JP. 1986. Heat Transfer. Mc. Graw Hill Ltd., USA.
 Levine L. 1990. Understanding frying operations. Cereal Foods World, 35, pp. 272 - 273.
 Mohsenin NN. 1980. Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials. Gordon and Breach Science Publishers, New York.
 Rohsenow WM, Choi H. 1961. Heat Mass and Momentum Transfer. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
 Sartika DRA. 2009. Pengaruh suhu dan lama proses menggoreng (deep frying) terhadap pembentukan asam lemak trans. Makara Sains 13(1) : 23 – 28.
 Siswanto. 2008. Model Matematik Transfer Panas pada Penggorengan Menggunakan Pasir. Makalah Seminar Nasional PERTETA, UGM-Yogyakarta.
 Siswanto. 2009. Penggorengan dengan Pasir Sebagai Media Penghantar Panas. Laporan Penelitian Hibah Mahasiswa Program Doktor. Fakultas Teknologi Pertanian, UGM, Yogyakarta.
 Soekarto ST. 1997. Perbandingan Pengaruh Kadar Air Kerupuk Mentah pada Penggorengan dengan Minyak dan dengan Oven Gelombang Mikro. Proseding Seminar Teknologi Pangan. Kantor Menteri Negara Urusan Pangan RI.
 Supriyanto. 2007. Proses Penggorengan Bahan Makanan Berpati : Kajian Nisbah Amilosa Amilopektin. Disertasi, Program Studi Teknik Pertanian, UGM.