

PERILAKU ISOTERM SORPSI AIR DAN PERUBAHAN FISIK KERUPUK TAPIOKA PADA SUHU PENYIMPANAN YANG BERBEDA

*[Moisture Sorption Isotherm Behavior and Physical Properties of
Tapioca Crackers at Different Storage Temperatures]*

Novriaman Pakpahan¹⁾, Feri Kusnandar^{2)*}, dan Elvira Syamsir^{2,3)}

¹⁾ Program Studi Ilmu Pangan Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor, Bogor

²⁾ Departemen Ilmu dan Teknologi Pangan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Bogor

³⁾ Southeast Asian Food and Agricultural Science and Technology Center, Institut Pertanian Bogor, Bogor

Diterima 21 Juni 2017 / Disetujui 29 September 2017

ABSTRACT

The qualities of tapioca crackers after frying, such as degree of expansion and crispness are influenced by their moisture content before frying. This research aimed to study the moisture sorption isotherm (MSI) behavior of crackers at different storage temperatures and their physical properties before and after frying. Pre-fried crackers were stored at water activities (a_w) of 0.07-0.89 and 20, 30, and 40°C and their MSI pattern as well as bound water were determined, while their physical changes were observed. The fittest MSI model was Guggenheim, Anderson and de Boer (GAB). The primary bound water at 20, 30 and 40°C were 0.043, 0.040, dan 0.037 g H₂O/g solid, while the secondary bound water were 0.096, 0.102, and 0.113 g H₂O/g solid, respectively. The density and texture profile of the pre-fried crackers changed rapidly above their secondary bound water. Rapid reduction in the degree of expansion and crispness occurred at tertiary bound water. The a_w of pre-fried crackers with high degree of expansion were at 0.33-0.53, 0.42-0.57, and 0.53-0.63 when stored at 20, 30, and 40°C, respectively. At the same storage conditions their maximum degree of expansion occurred at a_w of 0.44, 0.47, and 0.52, respectively. Similarly, high crispness occurred at a_w of 0.33-0.57, 0.42-0.57, and 0.40-0.63, respectively, while maximum crispness was at a_w of 0.44, 0.44, and 0.54, respectively.

Keywords: bound water, moisture sorption isotherm, tapioca crackers, texture

ABSTRAK

Mutu fisik kerupuk goreng, seperti daya mengembang dan kerenyahan dipengaruhi oleh kadar air. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari perilaku isoterm sorpsi air (ISA) dari kerupuk mentah pada suhu penyimpanan berbeda, dan mengkaji perubahan sifat fisiknya sebelum dan setelah kerupuk digoreng. Kerupuk mentah disimpan pada a_w 0,07-0,89 dan suhu 20, 30, dan 40°C. Pola ISA ditentukan model ISA dan kadar air terikatnya, kemudian diamati perubahan fisiknya. Model yang paling mendekati perilaku ISA kerupuk mentah adalah Guggenheim, Anderson, dan de Boer (GAB). Air terikat primer pada suhu 20, 30, dan 40°C masing-masing adalah 0,043; 0,040; dan 0,037 g H₂O/g padatan, sedangkan air terikat sekunder pada masing-masing suhu yaitu 0,096; 0,102; dan 0,113 g H₂O/g padatan. Densitas kerupuk mentah dan tekstur kerupuk mentah berubah secara cepat di atas daerah air terikat sekunder. Penurunan tajam daya mengembang kerupuk terjadi pada daerah air terikat tersier. Rentang a_w kerupuk mentah yang disimpan pada suhu 20, 30, dan 40°C yang memiliki daya mengembang yang tinggi yaitu 0,33-0,53; 0,42-0,57; dan 0,53-0,63. Daya mengembang maksimum pada masing-masing suhu terjadi pada a_w 0,44; 0,47; dan 0,52. Kerupuk mentah yang memberikan nilai kerenyahan yang baik pada masing-masing suhu penyimpanan memiliki rentang a_w yang berbeda yaitu 0,33-0,57; 0,42-0,57; dan 0,40-0,63 sementara kerenyahan maksimumnya masing-masing terjadi pada a_w 0,44; 0,44; dan 0,54.

Kata kunci: air terikat, isoterm sorpsi air, kerupuk tapioka, tekstur

PENDAHULUAN

Kerupuk adalah produk yang dibuat dengan atau tanpa dicampur adonan tepung dan bumbu-

bumbu serta bahan pangan lain yang sesuai, berbentuk pipih atau bentuk lainnya, dikeringkan untuk digoreng, dipanggang, disangrai atau proses lain yang sesuai (BPOM, 2006). Pengertian lain dari kerupuk adalah produk ekstrusi yang mengalami pengembangan volume untuk membentuk produk yang porous dan mempunyai densitas kamba yang

*Penulis Korespondensi:
E-mail: fkusnandar@ipb.ac.id

rendah setelah digoreng (Taewee, 2011). Kerupuk dikelompokkan sebagai makanan ringan yang terbuat dari bahan pangan yang mengandung pati cukup tinggi, seperti tepung terigu, tapioka, beras dan sebagainya (Chang dan Chen, 2013). Kerupuk dibuat dengan cara mencampurkan tepung tapioka atau tepung lainnya dengan bumbu-bumbu (garam, gula dan rempah-rempah) dan air kemudian dibuat adonan, dicetak dan dikeringkan (Tongdang *et al.*, 2008; Chang dan Chen, 2013). Proses pengeringan menghasilkan tekstur kerupuk mentah yang keras dan mengandung kadar air yang rendah (12%), tetapi mengembang saat digoreng dan memiliki tekstur yang renyah (Taewee, 2011; Nguyen *et al.*, 2013).

Saeleaw dan Schleining (2011a) dan Chang dan Chen (2013) menyatakan kerupuk yang renyah didapatkan dari produk dengan daya mengembang yang tinggi dan densitas kamba yang rendah. Van der Sman dan Broeze (2013) menyatakan bahwa kadar air kerupuk mentah memengaruhi daya mengembang dan densitasnya. Nguyen *et al.* (2013) melaporkan bahwa kadar air kerupuk mentah yang terlalu tinggi menyebabkan kerupuk goreng yang dihasilkan cenderung keras dan daya mengembangnya rendah, sedangkan kadar air yang terlalu rendah menghasilkan kerupuk goreng dengan permukaan retak, penurunan daya mengembang dan tekstur yang keras.

Kerupuk mentah biasanya disimpan terlebih dahulu sebelum digoreng. Selama periode penyimpanan, kadar air kerupuk mentah dapat meningkat. Peningkatan kadar air ini disebabkan oleh penyerapan uap air dari lingkungan akibat tidak seimbang antara jumlah air di dalam pangan dengan di lingkungan (Guine, 2009). Kerupuk mentah memiliki aktivitas air (a_w) yang rendah dan tidak setimbang dengan kelembaban relatif (RH) dari lingkungan sehingga terjadi migrasi uap air dari udara ke dalam kerupuk. Akibatnya kadar air dan a_w kerupuk meningkat sehingga tercapai kondisi kesetimbangan dengan lingkungannya.

Perilaku isoterm sorpsi air (ISA) untuk penyerapan atau pelepasan dari bahan pangan memiliki kaitan dengan interaksi molekul air dengan matriks bahan pangan. Andrade *et al.* (2011) mengelompokkan air dalam matriks pangan berdasarkan derajat keterikatannya, yaitu zona air monolayer yang terikat kuat dengan senyawa polimer secara kimia, zona air yang terikat pada matriks mikrokapiler, dan zona air yang terikat pada matriks makrokapiler. Perbedaan derajat keterikatan air ini memberikan perubahan sifat fisikokimia air dan bahan pangannya. Kupfer (2005) menyebutkan bahwa densitas air dari tepung terigu di masing-masing zona berbeda-beda, yaitu air terikat primer (ATP) (1,42 g/mL), air terikat sekunder (ATS) (1,11 g/mL) dan air terikat tersier (ATT) (0,97 g/mL). Selanjutnya, Serdyuk

(2008) melaporkan bahwa derajat keterikatan air memengaruhi densitas dari biji gandum. Hasil penelitian lain menyebutkan bahwa air berperan sebagai *plasticizer* yang memberikan pengaruh terhadap tekstur bahan pangan (Dogan dan Kokini, 2007; Mosquera *et al.*, 2011). Perilaku isoterm sorpsi air (ISA) dipengaruhi oleh suhu penyimpanan (Balderrama dan Cadima, 2012; Chuma *et al.*, 2012). Hal ini karena suhu mengubah interaksi molekul air terhadap bahan pangan (Zomorodian *et al.*, 2011). Pengaruh suhu penyimpanan terhadap perilaku ISA dan pengaruhnya terhadap karakteristik produk pangan telah dilaporkan seperti pada tepung borojo (Mosquera *et al.*, 2011) dan makanan bayi (Tham *et al.*, 2016). Secara umum hasil penelitian tersebut menunjukkan suhu mengubah perilaku ISA dan memengaruhi sifat fisik (tekstur, warna dan volume) produk pangan.

Fenomena perilaku ISA dari kerupuk mentah pada suhu penyimpanan yang berbeda dan pengaruhnya terhadap karakteristik kerupuk sebelum dan sesudah digoreng belum ada yang melaporkan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mempelajari perilaku ISA dari kerupuk mentah pada beberapa suhu penyimpanan, dan mengevaluasi perubahan sifat fisiknya, sebelum dan setelah kerupuk digoreng. Dari penelitian ini dapat dijelaskan pengaruh sifat fisik kerupuk mentah terhadap daya mengembang kerupuk, dan memberikan informasi suhu penyimpanan yang sesuai untuk menghasilkan kerupuk goreng yang memiliki daya mengembang dan nilai kerenyahan yang diinginkan.

BAHAN DAN METODE

Bahan

Bahan yang digunakan terdiri dari bahan untuk pembuatan kerupuk yaitu tepung tapioka komersial (Merek Gunung Merah) dan tepung terigu protein sedang komersial (Merek Segitiga Biru) dan bumbu lainnya (garam, bawang, dan rempah-rempah).

Pengolahan kerupuk mentah

Pengolahan kerupuk diawali dengan mencampurkan dan memanaskan tepung tapioka (300 g), garam (20 g) dan air (400 mL) sehingga membentuk gel pati. Selanjutnya, gel pati ditambahkan tepung terigu (200 g) dan tepung tapioka (700 g) sedikit demi sedikit sambil diaduk dengan *mixer* (Hitachi Ltd tipe SS-111, Japan) selama 30-45 menit untuk membentuk adonan yang plastis. Adonan dibentuk persegi (3x3x20 cm³), kemudian dikukus pada suhu 105°C selama 60 menit menggunakan *steamer* (Christian Wagner Metallwarenfabric tipe KA120/1,6, France) sehingga adonan tergelatinisasi. Gel adonan didinginkan pada suhu 4-5°C selama 12 jam. Selanjutnya, adonan tersebut diiris dengan

ketebalan 2 mm menggunakan *slicer* (Halde, Sweden). Irisan dikeringkan dalam *tray dryer* pada suhu 55°C selama 18-20 jam sampai diperoleh kerupuk mentah yang kering dan getas (mudah dipatahkan).

Pembuatan kurva isoterm sorpsi air (ISA)

Sampel kerupuk mentah (10 g) ditimbang dalam cawan dan disimpan didalam 11 desikator (diameter 20 cm, tinggi 15 cm) berisi larutan garam (*analytical grade*) jenuh yang berbeda-beda yaitu NaOH, KCH₃CO₂, MgCl₂, K₂CO₃, Mg(NO₃)₂, NaBr, NaNO₂, NaCl, KCl dan BaCl₂, (Merck, Germany). Larutan garam jenuh tersebut memberikan kondisi RH lingkungan pada rentang 7-90%. Nilai RH dari masing-masing larutan garam jenuh merujuk pada Sahin dan Summu (2006). Desikator kemudian disimpan dalam inkubator pada suhu 20, 30, dan 40°C. Sampel tersebut ditimbang setiap hari selama 15-28 hari sehingga tercapai kondisi kesetimbangan (tidak terjadi perubahan berat), yaitu pada saat perubahan berat tidak lebih dari 2 mg (pada 3 kali penimbangan). Khusus untuk sampel yang disimpan pada RH tinggi, perubahan berat tidak lebih dari 10 mg/g (Sahin dan Summu, 2006). Saat kondisi kesetimbangan tercapai, *a_w* sampel diasumsikan sama dengan *a_w* larutan garam jenuh. Setelah konstan, sampel tersebut diukur kadar airnya dengan menggunakan metode oven (AACCC, 2012). Kadar air kesetimbangan yang diperoleh dinyatakan dengan satuan g H₂O/g padatan. Plot hubungan antara *a_w* dan kadar air kesetimbangan digunakan untuk memperoleh kurva ISA.

Model matematika dicobakan untuk membuat pola kurva ISA yang tepat, yaitu persamaan Brunauer-Emmett-Teller (BET), Caurie, Chen-Claton, Guggenheim, Anderson, dan de Boer (GAB), Handerson, Hasley, Oswin, dan Smith (Tabel 1). Kesesuaian model diuji dengan menggunakan nilai koefisien determinasi (*R*²), *Mean Relatif Determination* (MRD) dan *Root Mean Square Error* (MRSE) (persamaan (1) dan (2)) (Purohit dan Rao, 2017).

$$MRD = 100/n \sum_{i=1}^n |(m_i - m_{pi})/m_i| \dots \dots \dots (1)$$

$$MRSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - m_{pi})^2} \dots \dots \dots (2)$$

di mana, *m_i* = kadar air percobaan; *m_{pi}* = kadar air hasil perhitungan; *n* = jumlah data.

Penentuan air terikat primer

Air ikatan primer ditentukan dari kurva ISA dengan model BET (Tabel 1) dengan menggunakan data pada daerah *a_w* rendah dan menengah (Soekarto, 1978).

Tabel 1. Persamaan matematik model isoterm sorpsi air (Al-muhtaseb *et al.*, 2002; Andrade *et al.*, 2006)

Model	Persamaan Matematik	Parameter
Caurie	$M_e = \exp(\ln A - B a_w)$	<i>A, B</i> adalah Konstanta
Chen-Clayton	$\ln(\ln(1/a_w)) = \ln A - B M_e$	<i>M_e</i> adalah kadar air kesetimbangan
Handerson Hasley	$M_e = (\ln(1-a_w)/(-A))^{1/B}$ $M_e = (-A/\ln a_w)^{1/B}$	<i>a_w</i> adalah <i>a_w</i> <i>m_o</i> adalah kadar air monolayer
Oswin	$M_e = A(a_w/1-a_w)^B$	
Smith	$M_e = A+B(\ln 1-a_w)$	
GAB	$M_e = M_o A B a_w / (1 - B a_w)(1 - A a_w + A B a_w)$	
BET	$M_e = M_o A a_w / (1 - a_w)(1 + (A-1)a_w)$	

Penentuan air terikat sekunder (ATS)

Air terikat sekunder (ATS) ditentukan dengan memplotkan semi log (1-*a_w*) terhadap *m_e* dari seluruh data percobaan dengan menggunakan persamaan (3) (Soekarto, 1978).

$$\log(1-a_w) = b(m_e) + a \dots \dots \dots (3)$$

di mana, *m_e* = kadar air kesetimbangan (g H₂O)/g padatan) pada *a_w*; *b* = faktor kemiringan; dan *a* = titik potong pada ordinat.

Plot tersebut menghasilkan garis patah yang terlihat seperti dua garis lurus yang saling memotong. Garis lurus pertama merupakan ATS dan garis lurus kedua merupakan ATT. Titik potong kedua garis tersebut merupakan titik peralihan antara ATS dan tersier atau batas atas air ikatan sekunder. Titik potong kedua garis ditentukan untuk mengetahui batas ATS dengan persamaan (4).

$$b_1 m_s + a_1 = b_2 m_s + a_2 \dots \dots \dots (4)$$

di mana, *m_s* = kadar air pada titik potong (kapasitas air ikatan sekunder); *a₁* dan *a₂* = intersep garis 1 dan 2, *b₁* dan *b₂* = kemiringan garis 1 dan 2.

Analisis densitas kerupuk mentah

Sampel (5 g) dimasukkan ke dalam labu volumetrik berukuran 60 mL kemudian diisi dengan air destilasi hingga batas volume (Muzilla *et al.*, 1990). Densitas dihitung dengan persamaan (5).

$$\text{Densitas} = m/(60-V) \dots \dots \dots (5)$$

di mana, *m* = massa sampel (g); *V* = volume air destilasi (mL).

Analisis tekstur kerupuk mentah

Tekstur kerupuk mentah dianalisis dengan menggunakan *texture analyzer* (TA-XT2, Stable Micro Systems, Ltd, Surrey, UK). Kondisi pengujian diatur pada *pretest speed test* 1 mms^{-1} , *trigger* 10 g dan *distance* 1 mm dengan *spherical probe* (p/0,25s) 0,635 cm. Kekerasan diperoleh dari nilai gaya maksimum (Newton).

Analisis daya mengembang

Daya mengembang kerupuk diukur pada sampel kerupuk mentah yang berada daerah ikatan air sekunder dan tersier. Dari daerah ikatan air tersebut diambil delapan titik pengamatan, yaitu enam titik di daerah air ikatan sekunder dan dua titik di daerah ATT. Pengukuran daya mengembang kerupuk dilakukan dengan *sand displacement method* (modifikasi Chang *et al.*, 2013; Nguyen *et al.*, 2013).

Sebanyak 4-5 g kerupuk mentah diukur densitasnya dan dihitung volumenya (persamaan (6)). Pasir sebanyak 1 kg dimasukkan ke dalam gelas ukur 1000 mL kemudian dimampatkan dengan cara diketuk dan volume pasir yang tertera dicatat. Densitas kamba pasir dihitung dengan persamaan (7). Selanjutnya, kerupuk goreng dimasukkan ke dalam wadah yang telah diketahui volumenya dan ditambahkan pasir. Pasir lalu dimampatkan dengan cara diketuk. Pasir diisi dan diketuk kembali hingga gelas ukur tidak dapat kembali terisi pasir, dan kemudian ditimbang. Volume kerupuk goreng dihitung dengan persamaan (8)-(10) dan daya mengembang kerupuk dihitung dengan persamaan (11).

$$V_{\text{kerupuk mentah}} = W_{\text{kerupuk mentah}} / \rho_{\text{mentah}} \dots \dots \dots (6)$$

$$\text{Densitas kamba pasir} = W_{\text{pasir}} / V_{\text{pasir}} \dots \dots \dots (7)$$

$$W_{\text{pasir}} = W_{\text{total}} - W_{\text{sampel}} - W_{\text{gelas ukur}} \dots \dots \dots (8)$$

$$V_{\text{pasir}} = W_{\text{pasir}} / \text{densitas kamba pasir} \dots \dots \dots (9)$$

$$V_{\text{kerupuk}} = V_{\text{wadah}} - V_{\text{pasir}} \dots \dots \dots (10)$$

$$\text{Daya mengembang (\%)} = ((V_{\text{kerupuk goreng}} - V_{\text{kerupuk mentah}}) / V_{\text{kerupuk mentah}}) \times 100 \dots \dots \dots (11)$$

di mana, W = berat (g); V = Volume (cm^3); ρ = densitas (g/cm^3).

Analisis kerenyahan

Kerenyahan kerupuk dievaluasi secara organoleptik. Sampel kerupuk diuji oleh 10 orang panelis terlatih. Pengujian dilakukan dengan uji rating menggunakan skala garis (0-10). Skala tersebut menunjukkan rentang tekstur kerupuk dari sangat tidak renyah (0) hingga sangat renyah (10).

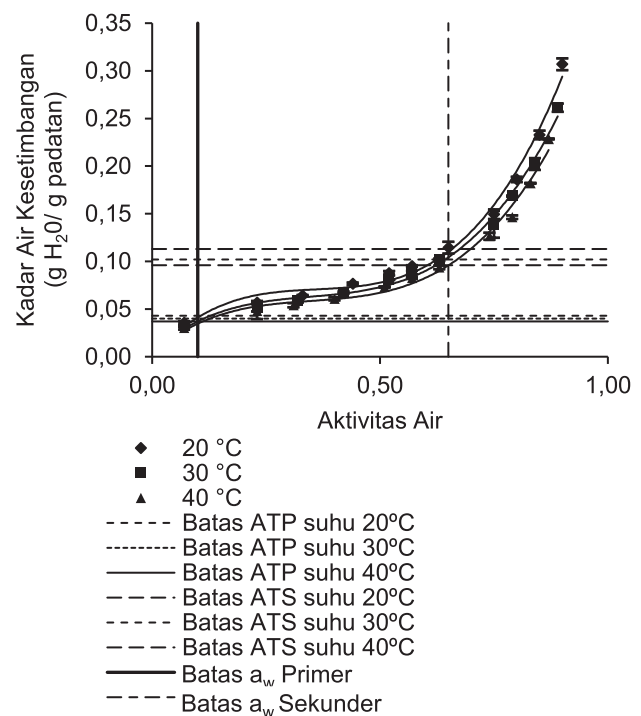
Analisis data

Parameter statistik seperti rata-rata, standar deviasi dan korelasi diolah menggunakan Microsoft Excel 2013 (Microsoft office Co. inc).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perilaku ISA kerupuk mentah

Kurva ISA kerupuk mentah pada suhu 20, 30 dan 40°C ditunjukkan pada Gambar 1. Kurva ISA ini berbentuk sigmoid (tipe II). Kurva ISA tipe II merupakan kurva ISA berbentuk sigmoid yang biasa diperoleh dari produk larut, yang menunjukkan kecenderungan *asymptotic* (peningkatan kadar air menghasilkan a_w mendekati 1). Perilaku ISA tipe II paling banyak ditemui pada produk pangan (Ugwuanyi, 2008; Madrigal *et al.*, 2011). Sahin dan Summu (2006) menjelaskan bahwa perilaku ISA tipe II menunjukkan adanya daerah multilayer pada permukaan dalam bahan dan perilaku ISA-nya berkaitan dengan hukum Raoult, efek kapilaritas serta interaksi air dan permukaan bahan.



Gambar 1. Kurva isoterm sorpsi air kerupuk mentah pada suhu 20, 30, dan 40°C

Kurva ISA menunjukkan bahwa kerupuk mentah yang disimpan pada rentang suhu $20-40^\circ\text{C}$ memiliki kurva ISA tipe II, namun kurva sedikit bergeser ke kanan dengan meningkatnya suhu. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu menyebabkan jumlah air yang dapat diserap kerupuk mentah lebih rendah. Chuma *et al.* (2012) mengemukakan bahwa suhu berpengaruh terhadap mobilitas molekul air

dan kesetimbangan dinamis antara uap air dan fase terserap. Zomorodian *et al.* (2011) menyatakan bahwa suhu yang lebih tinggi menyebabkan molekul air teraktifkan hingga pada tingkat energi tertentu memungkinkan air lepas dari ikatan matriks pangan baik secara fisik maupun kimia. Perilaku ISA dari kerupuk ini juga ditemukan pada produk pangan lain, seperti tepung gandum (Chuma *et al.*, 2012) dan canola (Zomorodian *et al.*, 2011).

Model matematik ISA kerupuk mentah

Tabel 2 menunjukkan nilai R^2 , konstanta C dan K, MRD dan MRSE dari enam model matematika untuk kurva ISA. Nilai R^2 terendah adalah model Chen-Clayton dan yang tertinggi adalah model Hasley. Nilai MRD dan MRSE tertinggi diperoleh dari model Chen-Clayton, sedangkan yang terendah adalah model GAB. Berdasarkan nilai tersebut, maka model matematika Hasley dan GAB sesuai untuk menggambarkan kurva ISA kerupuk mentah. Di antara kedua model tersebut, maka model GAB lebih baik dalam memprediksi perilaku ISA kerupuk mentah karena memiliki nilai MRD dan MRSE yang lebih rendah. Al-muhtaseb *et al.* (2002) mengemukakan bahwa model GAB sangat baik untuk menjelaskan perilaku ISA hampir seluruh produk pangan pada rentang a_w 0,00-0,90.

Kadar air terikat primer dan sekunder

Perilaku ISA tipe II memiliki pembagian fraksi air berdasarkan daerah adsorpsi air. Fraksi tersebut dibagi menjadi tiga, yaitu ATP, ATS dan (ATT. ATP merupakan air yang berada pada daerah monolayer. Fraksi air ini terikat kuat oleh biopolimer hidrofilik. Hal ini menyebabkan air bersifat tidak dapat membeku, dan tidak berperan dalam reaksi kimia atau sebagai *plasticizer* (Perdomo *et al.*, 2009). ATS merupakan fraksi air yang terperangkap pada pori kecil pada matriks pangan. Sifat fraksi air ini berbeda dengan fraksi air monolayer dan air murni. Molekul air terikat lebih lemah dibandingkan air pada monolayer entalpi penguapan molekul air lebih tinggi dibandingkan air murni. Fraksi air ini dapat berfungsi sebagai pelarut untuk senyawa dengan berat molekul rendah dan untuk beberapa reaksi kimia dalam pangan. Fraksi air ini dapat dikatakan sebagai transisi lanjutan dari air terikat ke air bebas. ATT dikenal sebagai transisi menuju air bebas. Fraksi air ini terdapat pada makrokapiler atau bagian cair pada bahan pangan berkadar air tinggi. Fraksi air tersier dapat bertindak sebagai pelarut dan secara keseluruhan sifat fisik dan kimia fraksi air ini mirip dengan air biasa (Soekarto dan Steinberg, 1981). Penentuan ATP menggunakan data kadar air pada a_w 0,07 hingga 0,53 sesuai model BET. Al-muhtaseb *et al.* (2002) menjelaskan bahwa model BET mampu menjelaskan perilaku ISA pada a_w rendah hingga menengah.

Tabel 2. Nilai konstanta (A dan B), R^2 , m_0 , MRD dan MRSD model matematika isoterm sorpsi air

Model	Suhu (°C)	R^2	A	B	m_0	MRD	MRSE
Caurie	20	0,960	2,846	-2,363		11,38	2,47
	30	0,969	2,627	-2,346		9,88	1,81
	40	0,968	2,507	-2,291		9,79	1,64
Chen-Clayton	20	0,895	2,098	11,060		33,95	2,88
	30	0,909	2,252	12,750		29,53	2,26
	40	0,899	2,321	14,110		28,69	2,07
Handerson	20	0,897	0,022	1,480		18,78	2,93
	30	0,909	0,024	1,507		17,31	2,32
	40	0,908	0,025	1,540		16,19	2,09
Hasley	20	0,997	18,030	1,511		3,04	0,43
	30	0,997	15,596	1,502		2,70	0,30
	40	0,996	13,900	1,498		3,48	0,50
Oswin	20	0,966	9,478	0,445		11,02	1,91
	30	0,971	8,689	0,445		10,09	1,46
	40	0,968	8,069	0,449		9,48	1,47
Smith	20	0,962	1,082	-11,540		15,58	1,61
	30	0,971	1,274	-10,260		13,86	1,20
	40	0,961	1,331	-9,332		13,14	1,21
GAB	20	0,991	57,800	0,945	0,045	2,59	0,28
	30	0,994	41,700	0,941	0,043	2,35	0,24
	40	0,993	53,600	0,949	0,039	3,65	0,41
BET	20	0,959	82,540		0,043	12,09	4,00
	30	0,959	69,310		0,040	18,59	4,51
	40	0,982	80,260		0,037	9,72	1,91

Keterangan: R^2 (koefisien regresi), A dan B (konstanta), m_0 (kadar air monolayer), *mean relative determination* (MRD), *mean relative square error* (MRSE)

Hasil analisis ATP (Tabel 3) dan ATS (Tabel 4) menunjukkan penurunan kapasitas air terikat akibat kenaikan suhu. Hasil analisis ATP pada suhu 20, 30, dan 40°C adalah 0,043; 0,040; dan 0,037g H₂O/g padatan. Selanjutnya, pengamatan air sekunder kerupuk mentah adalah 0,113; 0,102; dan 0,096 g H₂O/g padatan. Al-muhtaseb *et al.* (2002) mengemukakan bahwa daerah ISA ditentukan oleh interaksi molekul air dalam pangan dan suhu memberikan pengaruh terhadap energi ikatan molekul-molekul air.

Tabel 3. Nilai Kapasitas air terikat primer dan a_w kerupuk mentah pada beberapa suhu

Suhu (°C)	$a_w/(1-a_w)m = ((c-1)/m_o c)a_w + 1/m_o c$	Air Terikat Primer (gH ₂ O/g padatan)	a _w
20	$y = 22,83x + 0,280$	0,043	0,10
30	$y = 24,73x + 0,362$	0,040	0,11
40	$y = 26,71x + 0,337$	0,037	0,10

Keterangan: c (konstanta), m_o (kadar air monolayer)

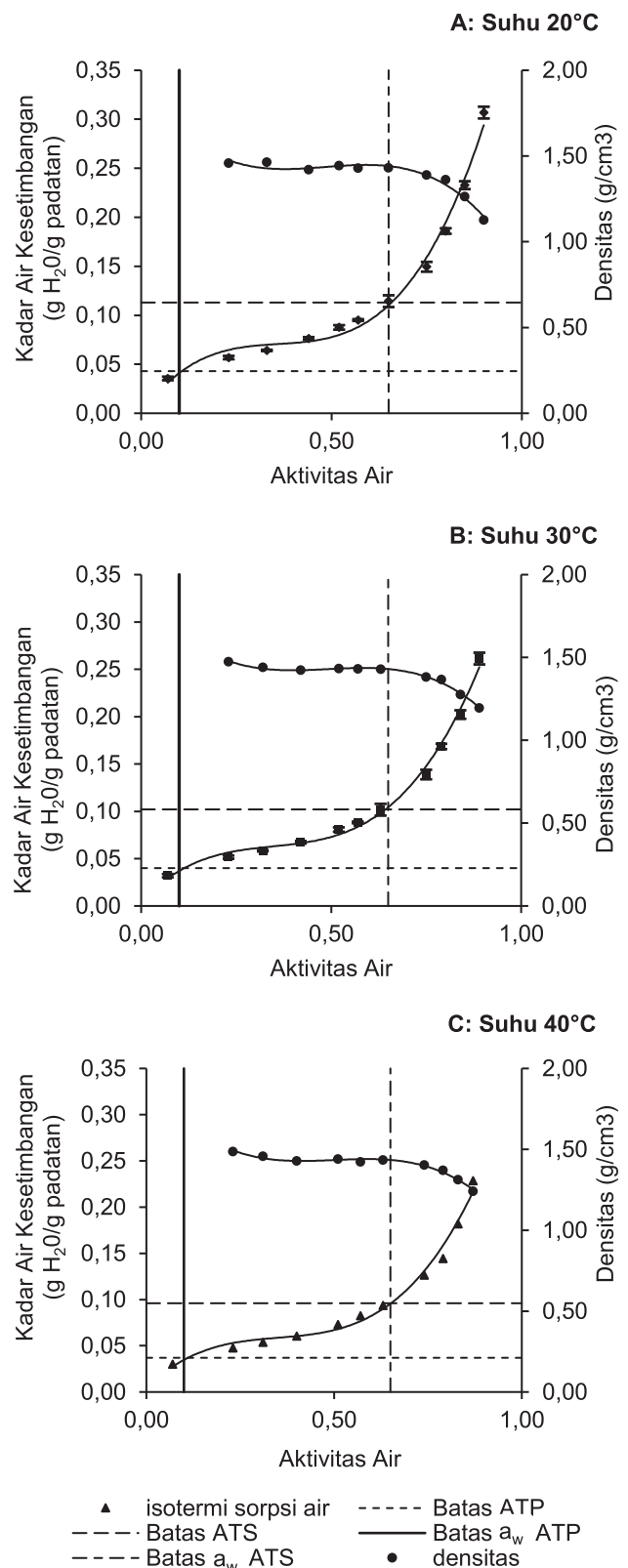
Tabel 4. Nilai Kapasitas air terikat sekunder dan a_w kerupuk mentah pada beberapa suhu

Suhu (°C)	Persamaan Garis		Air Terikat Sekunder (g H ₂ O/g padatan)	a _w
	Pertama	Kedua		
20	$y = -0,057x + 0,191$	$y = -0,025 - 0,227$	0,113	0,65
30	$y = -0,061x + 0,182$	$y = -0,029 - 0,189$	0,102	0,64
40	$y = -0,066 + 0,185$	$y = -0,028 - 0,249$	0,096	0,65

Nilai a_w kerupuk mentah pada batas ATP dan sekunder di masing-masing suhu memiliki nilai yang tidak jauh berbeda. Nilai a_w pada batas ATP yaitu 0,10; 0,11; dan 0,10, sedangkan a_w pada batas ATS yaitu 0,65; 0,64; dan 0,65. Hal ini menunjukkan kenaikan suhu pada rentang 20-40°C tidak banyak mengubah tekanan uap air dan a_w pada batas daerah ikatan air meskipun jumlah air yang terserap menurun. Penentuan daerah air terikat penting untuk pengendalian mutu bahan pangan. Bahan pangan umumnya memiliki daerah kritis pada daerah ATT. ATT berperan sebagai pelarut reaksi kimia, dapat digunakan oleh mikroba untuk aktivitas metabolisme dan memiliki sifat plastis yang tinggi. Hal tersebut menyebabkan bahan pangan mudah ditumbuhi oleh mikroba (Kulchan *et al.*, 2010; Sant'Anna *et al.*, 2014), dan mengalami perubahan tekstur (Dogan dan Kokini, 2007) sehingga mutu bahan pangan menjadi menurun.

Densitas kerupuk mentah

Gambar 2 menunjukkan hubungan perilaku ISA kerupuk mentah dan perubahan densitasnya.

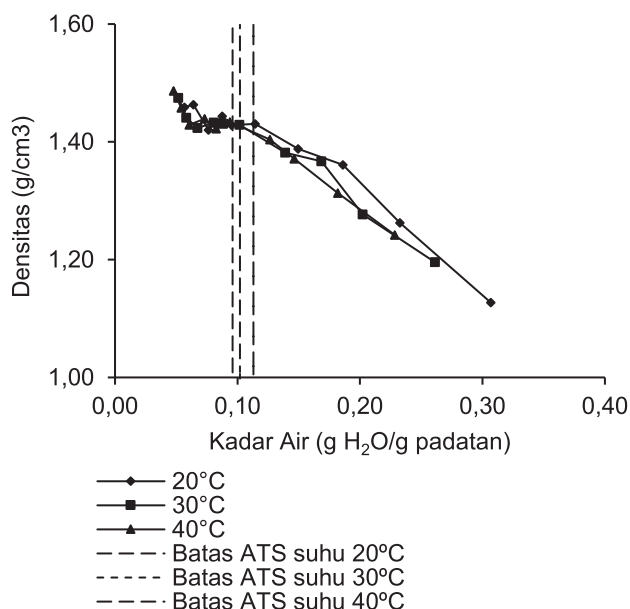


Gambar 2. Hubungan perilaku isotherm sorpsi air kerupuk tapioka mentah dan densitas kerupuk mentah pada suhu 20, 30, dan 40°C

Pengamatan nilai densitas pada daerah ATS menunjukkan bahwa densitas kerupuk mentah sedikit menurun. Kerupuk mentah yang disimpan di suhu 20°C memiliki densitas 1,46 g/cm³ pada a_w 0,23 dan menurun pada a_w 0,65 menjadi 1,43 g/cm³. Kerupuk yang disimpan pada suhu 30°C memiliki densitas 1,47 g/cm³ pada a_w 0,23 dan menurun pada a_w 0,63 menjadi 1,43 g/cm³. Kerupuk mentah pada suhu 40°C memiliki densitas 1,48 g/cm³ pada a_w 0,23 dan menurun pada a_w 0,63 menjadi 1,43 g/cm³. Selanjutnya, nilai densitas kerupuk mentah mengalami penurunan lebih besar pada daerah ATT. Densitas kerupuk mentah yang disimpan pada suhu 20, 30, dan 40°C berturut-turut memiliki densitas 1,13 g/cm³ (pada a_w 0,90), 1,20 g/cm³ (pada a_w 0,89), dan 1,24 g/cm³ (pada a_w 0,87).

Perubahan densitas tersebut menunjukkan air memiliki pengaruh yang berbeda pada setiap daerah air terikat. Penyerapan air pada daerah ATS sedikit menurunkan kerapatan polimer pati, sementara penyerapan air pada daerah ATT menyebabkan kerapatan polimer pati menurun secara tajam. Almuhtaseb *et al.* (2002) menjelaskan bahwa interaksi air dalam bahan pangan dibagi menjadi tiga fraksi yaitu air terikat secara kimia, air terikat secara fisik dan air yang menempati matriks pangan. Interaksi air tersebut menyebabkan terjadinya perbedaan densitas kerupuk mentah pada masing-masing daerah ikatan air.

Pengamatan hubungan densitas kerupuk mentah dan kadar air pada suhu penyimpanan yang berbeda (Gambar 3) menunjukkan pola yang mirip dengan hubungan densitas dan a_w .



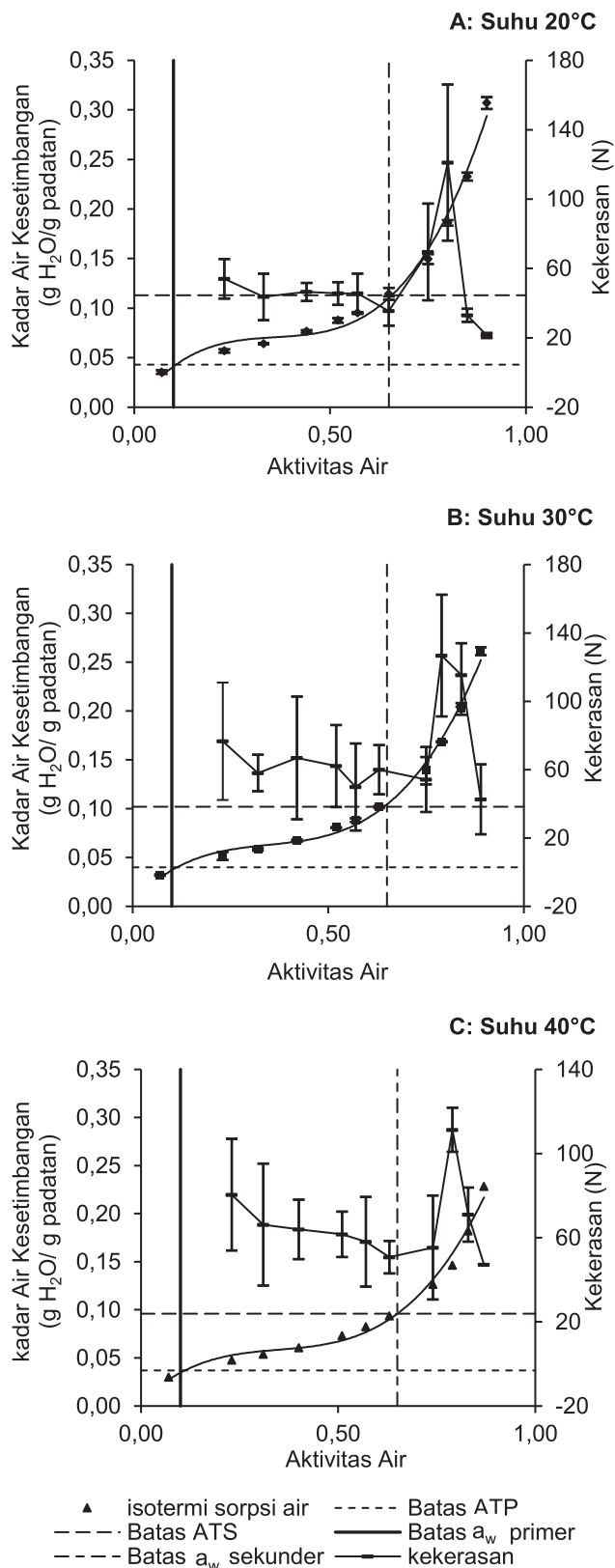
Gambar 3. Hubungan kadar air dan densitas kerupuk tapioka mentah pada suhu penyimpanan 20, 30, dan 40°C

Densitas kerupuk mentah dengan kadar air yang sama memiliki densitas lebih rendah pada suhu penyimpanan yang lebih tinggi. Boukouvalas *et al.* (2006) mendapati bahwa beberapa jenis buah dan sayur juga mengalami penurunan densitas akibat peningkatan kadar air dan suhu penyimpanan. Pengamatan densitas buah apel, wortel dan kentang pada suhu 40°C dan kadar air 0,10 g H₂O/g padatan masing-masing adalah 1,56; 1,85; dan 1,64 g/cm³, sedangkan pada kadar air 10 g H₂O/g padatan masing-masing adalah 1,08; 1,04; dan 1,04 g/cm³. Selanjutnya, nilai densitas kentang dengan kadar air 8 g H₂O/g padatan pada suhu 20, 70, dan 100°C masing masing adalah 1,05; 1,03; dan 1,01 g/cm³.

Kekerasan kerupuk mentah

Gambar 4 memperlihatkan kekerasan kerupuk mentah pada kadar air dan suhu penyimpanan yang berbeda. Nilai kekerasan menurun akibat kenaikan kadar air, namun meningkat secara tiba-tiba pada kadar air yang berbeda pada setiap kondisi suhu penyimpanan. Kerupuk mentah yang disimpan 20°C mengalami peningkatan kekerasan pada kadar air 0,186 g H₂O/g padatan, suhu 30°C pada kadar air 0,169g H₂O/g padatan dan suhu 40°C pada kadar air 0,146g H₂O/g padatan. Peningkatan tiba-tiba ini diikuti oleh perubahan sifat mekanis kerupuk mentah dari rapuh (dapat patah) menjadi plastis. Hal ini dapat diidentifikasi dari jarak tekan dari gaya maksimum yang memiliki nilai yang sama dengan batas *speed test* 1 mm/detik (data tidak ditunjukkan). Analisis tersebut menunjukkan bahwa kerupuk mentah tidak memiliki sifat patah. Pola perubahan sifat mekanis ini juga dilaporkan oleh Mosquera *et al.* (2011) pada tepung borojo dan beras (Talab *et al.*, 2012). Peneliti lain menjelaskan bahwa perubahan tekstur bahan pangan akibat kadar air berhubungan dengan transisi gelas yang mana air berperan sebagai pelunak (Sahu dan Das, 2010; Moraga *et al.*, 2011).

Sebagian senyawa polimer termasuk bahan pangan memiliki bentuk amorfous yang susunan antar molekulnya tidak teratur dan *immobile*. Interaksi susunan antar molekul polimer tersebut membentuk struktur yang memengaruhi nilai viskositasnya. Bentuk amorfous yang memiliki nilai viskositas lebih dari 10¹² Pa.s berada dalam fase gelas, sedangkan nilai viskositas kurang dari 10¹² Pa.s berada dalam fase lunak. Sifat mekanis yang khas dari fase gelas adalah bahan menjadi rapuh, sedangkan pada fase lunak adalah bahan menjadi plastis. Perubahan sifat bahan tersebut dari fase gelas menjadi fase karet atau sebaliknya disebut transisi gelas (Soekarto dan Adawiyah, 2012).



Gambar 4. Hubungan perilaku isoterm sorpsi air kerupuk tapioka mentah dan kekerasannya pada suhu 20, 30, dan 40°C

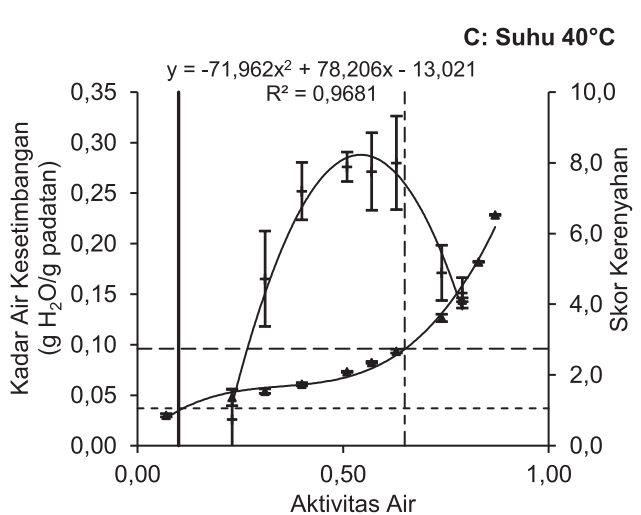
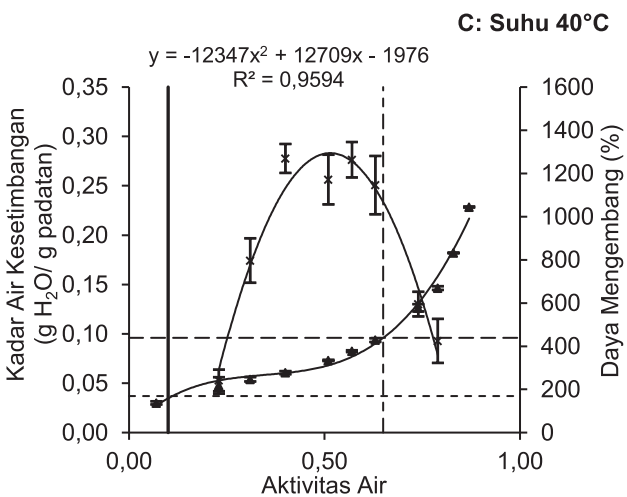
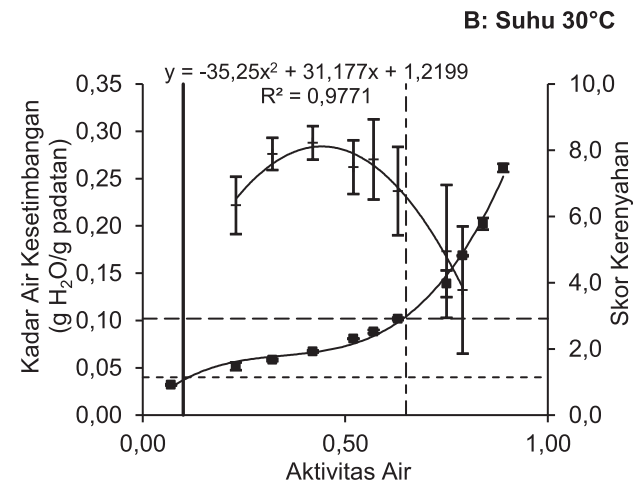
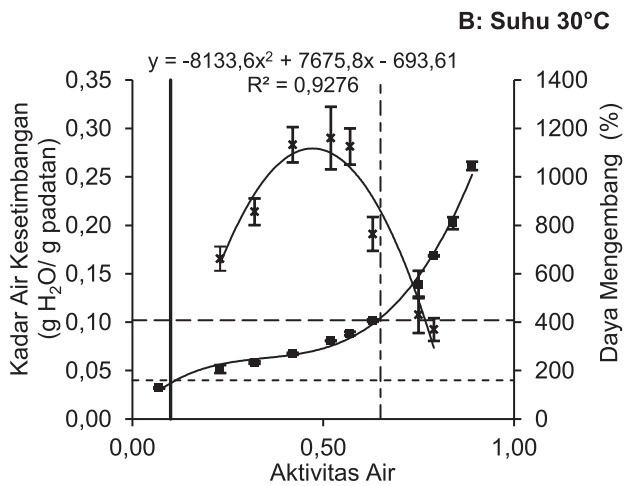
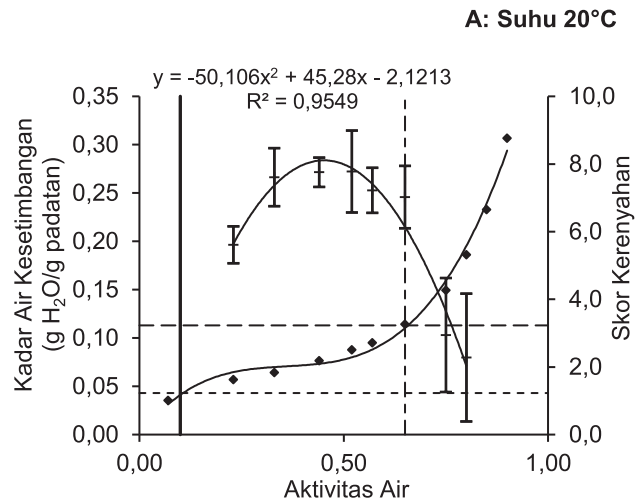
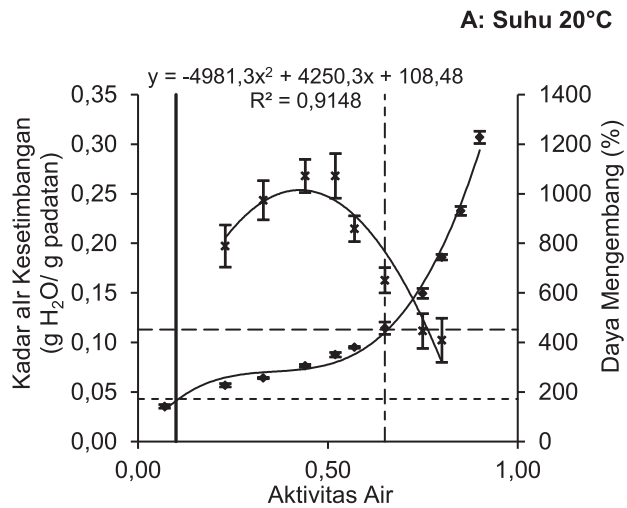
Daya mengembang kerupuk goreng

Plot antara a_w dan daya mengembang kerupuk menunjukkan hubungan polinomial pangkat dua yang berarti peningkatan a_w dapat menyebabkan peningkatan atau penurunan nilai daya mengembang (Gambar 5). Pengamatan pola hubungan tersebut menunjukkan bahwa kerupuk mengalami peningkatan daya mengembang di daerah ATS, kemudian menurun tajam pada kadar air di daerah ATT. Hubungan polinomial tersebut juga menjelaskan bahwa daya mengembang maksimum terjadi pada batas a_w tertentu. Berdasarkan persamaan polinomial tersebut maka daya mengembang maksimum kerupuk mentah yang disimpan pada suhu 20, 30, dan 40°C secara berturut-turut terjadi pada a_w 0,44; 0,47; dan 0,52. Selanjutnya, rentang a_w kerupuk mentah yang memiliki daya mengembang tinggi pada suhu penyimpanan yang sama adalah 0,33-0,53; 0,42-0,57; dan 0,51-0,63. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi pergeseran a_w pengembangan kerupuk akibat kenaikan suhu penyimpanan. Irisan kondisi a_w penyimpanan kerupuk mentah yang ideal dan menghasilkan daya mengembang tinggi pada rentang suhu penyimpanan 20-40°C adalah 0,42-0,57.

Van der Sman dan Broeze (2013) menjelaskan bahwa proses pengembangan produk *snack* ditentukan oleh viskoelastis dan termodinamika perpindahan uap air. Berdasarkan hal tersebut, penurunan daya mengembang kerupuk dapat dikaitkan dengan perubahan sifat fisik kerupuk mentah pada daerah ATT yang memiliki viskoelastis yang rendah. Hal ini dikonfirmasi dari pelunakan tekstur kerupuk mentah pada daerah terikat tersier (Gambar 4). Selanjutnya, itu juga dapat dikaitkan dengan penurunan tajam densitas kerupuk mentah terjadi pada daerah ATT (Gambar 2) yang berarti terjadi perenggangan struktur pati. Hal tersebut mengakibatkan perpindahan uap air yang memungkinkan terjadinya kegagalan pembentukan gelembung udara sehingga daya mengembangnya menurun.

Kerenyahan kerupuk goreng

Plot a_w kerupuk mentah dan kerenyahan kerupuk gorengnya membentuk hubungan polinomial (Gambar 6). Hal ini sama dengan pola hubungan antara a_w kerupuk mentah dan daya mengembang kerupuk. Pengembangan kerupuk memiliki hubungan yang erat terhadap nilai kerenyahan (Nguyen *et al.* (2013); Wang *et al.* (2013). Kerupuk yang renyah didapat dari kerupuk yang memiliki pengembangan tinggi. Pengembangan tinggi menyebabkan ketebalan dinding pori menjadi lebih kecil sehingga kekerasannya menjadi rendah sedangkan nilai kerenyahannya meningkat (Primo-Martin *et al.*, 2008; Saeleaw dan Schleining, 2011b).



▲ Isotermis sorpsi air - - - - - Batas ATP
 - - - - - Batas ATS - - - - - Batas a_w primer
 - - - - - Batas a_w sekunder * daya mengembang

▲ isotermis sorpsi air - - - - - Batas ATP
 - - - - - Batas ATS - - - - - Batas a_w ATP
 - - - - - Batas a_w ATS + kerenyahan

Gambar 5. Hubungan perilaku isoterm sorpsi air kerupuk tapioka mentah dan daya mengembang kerupuk goreng pada suhu 20, 30, dan 40°C

Gambar 6. Hubungan perilaku isoterm sorpsi air kerupuk tapioka mentah dan kerenyahan kerupuk goreng pada suhu 20, 30, dan 40°C

Pengamatan nilai kerenyahan kerupuk menunjukkan bahwa kerupuk mentah yang disimpan pada suhu 20, 30, dan 40°C memiliki rentang a_w yang berbeda untuk menghasilkan kerupuk goreng dengan tingkat kerenyahan tinggi. Rentang a_w untuk kerupuk mentah yang disimpan pada tersebut secara berturut-turut adalah 0,33-0,57; 0,42-0,57; dan 0,40-0,63. Selanjutnya, berdasarkan persamaan polynomial, plot a_w kerupuk mentah dan kerenyahan kerupuk gorengnya, kerenyahan maksimum pada kerupuk mentah yang disimpan pada suhu yang sama berturut-turut didapat pada a_w 0,44; 0,44; dan 0,54. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu penyimpanan menggeser nilai a_w kerupuk mentah lebih besar untuk menghasilkan kerupuk goreng yang memiliki kerenyahan maksimum. Berdasarkan irisan a_w ideal penyimpanan kerupuk mentah yang menghasilkan kerupuk goreng yang renyah pada rentang suhu 20-40°C adalah 0,42-0,57.

KESIMPULAN

Perilaku ISA kerupuk mentah membentuk pola sigmoid yang mendekati persamaan model GAB. Kapasitas air terikat primer dan sekunder menurun dengan peningkatan suhu penyimpanan. Densitas kerupuk mentah dan profil tekstur kerupuk mentah berubah secara mendadak pada batas air terikat sekunder. Batas air terikat sekunder menandai penurunan daya mengembang kerupuk dan kerenyahan yang tajam. Penyimpanan yang ideal untuk menyimpan kerupuk mentah berada pada kisaran a_w 0,42-0,57. Pemilihan kemasan yang tepat diperlukan untuk mempertahankan a_w kerupuk yang ideal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Pendidikan Tinggi yang telah memberikan dana bantuan melalui beasiswa afirmasi 3T PraS2-Sainstek.

DAFTAR PUSTAKA

- [AACC] American Association of Cereal Chemists International. 2012. Approved Methods of Analysis: AACC International, St. Paul, Minnesota.
- Al-Muhtaseb H, McMinn WAM, Magee TRA. 2002. Moisture sorption isotherm characteristics of food product – a review. *Food Bioprod Process* 80: 118–128. DOI: 10.1205/09603080252938753.
- Andrade RD, Lemus R, Pérez CE. 2011. Models of sorption isotherms for food: Uses and limitations – a review. *Revista de la Facultad de Química Farmacéutica* 18: 325–334.
- Balderrama JGP, Cadima SCC. 2012. Water adsorption isotherms of amaranth (*amaranthus caudatus*) flour. *Food Nutr Sci* 5: 153-157. DOI: 10.4236/fns.2014.52020.
- Boukouvalas ChJ, Krokida MK, Maroulis ZB, Marinou-Kouris D. 2006. Effect of material moisture content and temperature on true density of foods. *Int J Food Prop* 9: 109-125. DOI: 10.1080/10942910500473970.
- [BPOM] Badan Pengawas Obat dan Makanan. 2006. Kategori Pangan. Surat Keputusan Nomor HK.00.05.52.4040. Badan Pengawas Obat dan Makanan Republik Indonesia.
- Chang H, Chen H. 2013. Association between textural profiles and surface electromyographic (semg) behaviors of microwavable cassava cuttlefish crackers with various expansion ratios. *Food Res Int* 153: 334-341. DOI: 10.1016/j.foodres.2013.04.015.
- Chuma A, Ogawa T, Kobayashi O, Adachi S. 2012. Moisture sorption isotherm of durum wheat flour. *Food Sci Technol Res* 18: 617-622. DOI: 10.3136/fstr.18.617.
- Dogan H, Kokini JL. 2007. Psychophysical markers for crispness and influence of phase behavior and structure. *J Texture Stud* 38: 324–354. DOI: 10.1111/j.1745-4603.2007.00100.x.
- Guine PFR. 2009. Sorption isotherm pears using different models. *Int J Fruit Sci* 9: 11-22. DOI: 10.1080/15538360902801197.
- Kupfer K. 2005. Electromagnetic Aquametry: Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances. 83-84. Springer, Berlin.
- Kulchan R, Boonsupthip W, Suppakul P. 2010. Shelf life prediction of package cassava-flour-based baked product by using empirical models and activation energy for water vapor permeability of polyolefin films. *J Food Eng* 100: 461-467. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2010.04.031.
- Madrigal L, Sandoval AJ, Müllera AJ. 2011. Effects of corn oil on glass transition temperatures of cassava starch. *Carbohydr Polym* 85: 875–884. DOI: 10.1016/j.carbpol.2011.04.013.
- Moraga G, Talens P, Moraga MJ, Martínez-Navarrete N. 2011. Implication of water activity and glass transition on the mechanical and optical properties of freeze-dried apple and banana slices. *J Food Eng* 106: 212-219. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2011.05.009.
- Mosquera LH, Moraga G, de Cordoba PF, Martínez-Navarrete N. 2011. Water content-water activity-glass transition temperature relationship of

- spray-dried borojo as related to change in color and mechanical properties. *Food Biophys* 6: 397-406. DOI: 10.1007/s11483-011-9215-2.
- Muzilla M, Unklessay N, Unklessay K, Helsel Z. 1990. Effect of moisture content on density, heat capacity and conductivity of restructured pork/soy hull mixture. *J Food Eng* 55: 1491-1493. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1990.tb03551.x.
- Nguyen TT, Le TQ, Songsermpong S. 2013. Shrimp cassava cracker puffed by microwave technique: effect of moisture and oil content on some physical characteristics. *Kasetsart J Nat Sci* 47: 434-446.
- Perdomo J, Cova A, Sandoval AJ, García L, Laredo E, Müller AJ. 2009. Glass transition temperatures and water sorption isotherms of cassava starch. *Carbohydr Polym* 76: 305-313. DOI: 10.1016/j.carbpol.2008.10.023.
- Primo-Martin C, Castro-Prada EM, Meinders MJB, Vereijken PFG, van Vliet. 2008. Effect of structure of the crispness of toasted rusk roll. *Food Res Int* 41: 480-486. DOI: 10.1016/j.foodres.2008.02.004.
- Purohit SR, Rao PS. 2017. Modelling and analysis of moisture sorption isotherm of raw and pregelatinized rice flour and its crystalline status prediction. *Food Anal Method* 10: 1914-1921. DOI: 10.1007/s12161-016-0745-6.
- Saeleaw M, Schleining, G. 2011a. Effect of frying parameters on crispiness and sound emission of cassava crackers. *J Food Eng* 103: 229-236. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2010.10.010.
- Saeleaw M, Schleining, G. 2011b. Crispness in dry foods and quality measurements based on acoustic-mechanical destructive techniques- a review. *J Food Eng* 105: 387-399. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2011.03.012.
- Sahin S, Sumnu SG. 2006. Water Activity and Sorption Properties of Foods, In *Physical Properties of Foods*. 193-226. Springer Science+Business Media, New York.
- Sahu JK, Das H. 2010. Moisture sorption isotherm, properties of sorbed water and heat of sorption of sandesh—an indian milk product. *Food Process Pres* 34: 152-166. DOI: 10.1111/j.1745-4549.2009.00461.x.
- Sant'Anna V, Englert AH, Corrêa APF, Brandelli A, Marczak LGF, Tessaro IC. 2014. Grape marc powder: physicochemical and microbiological stability during storage and moisture sorption isotherm. *Food Bioprocess Tech* 7: 2500-2506. DOI: 10.1007/s11947-013-1198-1.
- Serdyuk VM. 2008. Dielectric study of bound water in grain at radio and microwave frequencies. *Prog Electromag Res* 84: 379-406. DOI: 10.2528/PIER08081103.
- Soekarto ST. 1978. Pengukuran air ikatan dan peranannya pada pengawetan pangan. *Buletin Perhimpunan Ahli Pangan Indonesia* 3: 4-8.
- Soekarto ST, Adawiyah DR. 2012. Keterkaitan berbagai konsep interaksi air dalam produk pangan - ulasan ilmiah. *J Teknol Industri Pangan* 23: 107-116.
- Soekarto ST, Steinberg PM. 1981. Determination of Binding Energy for Three Fraction of Bound Water. In: *Water Activity: Influences on Food Quality*. Ed Rockland and Sterwart. 265-279. Academic Press, New York. DOI: 10.1016/B978-0-12-591350-8.50016-4.
- Talab KT, Ibrahim MN, Spotar S, Talib RA, Muhammad K. 2012. Glass transition temperature, mechanical properties of rice and their relationships with milling quality. *Int J Food Eng* 8: 1-20. DOI: 10.1515/1556-3758.2197.
- Tham TWY, Wang C, Yeoh ATH, Zhou W. 2016. Moisture sorption isotherm and caking properties of infant formulas. *J Food Eng* 175: 117-126. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2015.12.014.
- Tongdang T, Meenun M, Chainui J. 2008. Effect of sago starch addition and steaming time on making cassava cracker (keropok). *Starch/Stärke* 60: 568-576. DOI: 10.1002/star.200800213.
- Taewee TK. 2011. Cracker "keropok": A review on factors influencing expansion. *Int Food Res J* 18: 855-866.
- Ugwuanyi JO. 2008. Moisture sorption isotherm and xerophilic moulds associated with dried cocoyam chips in storage in Nigeria. *Int J Food Sci Technol* 43: 846-852. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2007.01525.x.
- Van der Sman, Broeze. 2013. Structuring of indirectly expanded snacks based on potato ingredients – a review. *J Food Eng* 114: 413-425. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2012.09.001.
- Wang Y, Zhang M, Mujumdar AS. 2013. Effect of cassava starch gel, fish gel and mixed gels and thermal-treatment on structure development and various quality parameters in microwave vacuum-dried gel slices. *Food Hydrocolloid* 3: 26-37. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2013.02.005.
- Zomorodian A, Kavooosi Z, Momenzadeh L. 2011. Determination of EMC isotherm and appropriate mathematical models for canola. *Food Bioprocess* 89: 407-413. DOI: 10.1016/j.fbp.2010.10.006.