

**PEMODELAN MATEMATIKA DAN SIFAT TERMODINAMIKA ISOTERM  
SORPSI AIR TEPUNG SINGKONG TERFERMENTASI ANGKAK**

***MATHEMATICAL MODELS AND THERMODYNAMIC PROPERTIES OF  
MOISTURE SORPTION ISOTHERMS OF FERMENTED CASSAVA FLOUR BY  
RED YEAST RICE***

**Mutiara Nur Alfiah<sup>a\*</sup>, Sri Hartini<sup>a</sup>, Margareta Novian Cahyanti<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>Jurusan Kimia, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Kristen Satya Wacana  
Jl. Diponegoro 52-60 Salatiga, 50711, Jawa Tengah, Indonesia

\* email: [652013004@student.uksw.edu](mailto:652013004@student.uksw.edu)

DOI : 10.20961/alchemy.v13i1.4326

*Received 23 January 2017, Accepted 22 February 2017, Published online 11 March 2017*

**ABSTRAK**

Tujuan penelitian ini untuk menentukan kurva isoterm sorpsi air, pemodelan isoterm sorpsi air dan sifat termodinamika pada tepung singkong terfermentasi angkak. Pemodelan isoterm sorpsi air yang digunakan meliputi GAB (*Guggenheim Anderson deBoer*), BET (*Brunauer Emmet Teller*) dan Caurie. Sedangkan uji ketepatan model dilakukan dengan MRD (*Mean Relative Deviation*) dan RMSE (*Root Mean Square Error*). Sifat termodinamika meliputi entalpi dan entropi dihitung dengan menggunakan persamaan Clausius - Clapeyron. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kurva isoterm sorpsi air pada tepung singkong terfermentasi angkak berbentuk sigmoid (tipe II). Pemodelan isoterm sorpsi air pada tepung singkong terfermentasi angkak yang paling tepat adalah model GAB. Nilai MRD dan RMSE pada suhu 30 °C, 35 °C dan 40 °C berturut-turut sebesar 3,12 %; 2,71 %; 3,81 %; dan 1,01; 0,35; 0,42. Nilai kadar air *monolayer* pada suhu 30 °C, 35 °C dan 40 °C pada model GAB sebesar 6,61 %; 6,27 % dan 6,91 %; model BET sebesar 4,92 %; 4,86 % dan 5,19 %; sedangkan model Caurie sebesar 6,37 %; 6,18 % dan 5,30 %. Entalpi dan entropi dari proses penyerapan air menurun seiring dengan meningkatnya kadar air.

**Kata Kunci:** angkak, isoterm sorpsi air, pemodelan matematika, tepung singkong, termodinamika.

**ABSTRACT**

This research aims to determine moisture sorption isotherm curves, moisture sorption isotherm models and thermodynamic properties of fermented cassava flour by red yeast rice. The moisture sorption isotherm model used are Guggenheim Anderson deBoer (GAB), Brunauer Emmet Teller (BET) and Caurie. Meanwhile, the test of modelling accuracy by Mean Relative Deviation (MRD) and Root Mean Square Error (RMSE). The thermodynamic properties, i.e., enthalpy and entropy were calculated by Clausius - Clapeyron equation. The result shows that the moisture sorption isotherm curve on fermented cassava flour in a sigmoid form (type II). The GAB model is the best model for

moisture sorption isotherm of fermented cassava flour by red yeast rice. The MRD and RMSE values at 30 °C, 35 °C and 40 °C are 3.12 %, 2.71 %, 3.81 %, and 1.01, 0.35, 0.42, respectively. The monolayer moisture content at 30 °C, 35 °C and 40 °C are 6.61 %, 6.27 % and 6.91 %, based on GAB model. Meanwhile, when the BET model was used, the monolayer moisture content are 4.92 %, 4.86 % and 5.19 %, while by Caurie model are 6.37 %, 6.18 % and 5.30 %, at 30 °C, 35 °C and 40 °C, respectively. The enthalpy and entropy of water sorption process were decreased when moisture content increased.

**Keywords:** cassava flour, mathematic model, red yeast rice, water sorption isotherm, thermodynamic.

## PENDAHULUAN

Di Indonesia, singkong merupakan produksi hasil pertanian yang besar dan dapat digunakan sebagai bahan baku untuk produk pangan (Koswara, 2013). Singkong merupakan hasil pertanian yang tidak tahan simpan sehingga diolah menjadi tepung untuk memperpanjang masa simpannya (Marniza *et al.*, 2011). Fermentasi tepung singkong menggunakan kapang *Monascus purpureus* dalam bentuk angkak yang memiliki aktivitas sebagai antimikroba untuk dapat memperpanjang masa simpannya (Susetyo *et al.*, 2016).

Kurva isotherm sorpsi air (ISA) menggambarkan hubungan antara kelembaban relatif (RH) atau aktivitas air ( $a_w$ ) dengan kadar air kesetimbangan (Me) (Sianipar *et al.*, 2008). Menurut Cahyanti (2008) kurva ISA dapat digunakan untuk menentukan sifat-sifat produk, parameter pengeringan, pengemasan dan penyimpanan pangan. Selain itu kurva ini juga dapat digunakan untuk menentukan masa simpan suatu bahan pangan berdasarkan batas kritis yang harus dicapai.

Hubungan antara  $a_w$  dan Me dapat dijelaskan dengan menggunakan model matematika. Model matematika yang digunakan dalam penelitian ini adalah model BET (Brunauer Emmet Teller), model GAB (Guggenheim Anderson deBoer) dan model Caurie yang cocok digunakan pada bahan pangan yang mengandung karbohidrat tinggi, rentang  $a_w$  yang luas, serta kemudahan penggunaannya (Ajisegiri *et al.*, 2007).

Pemodelan matematika juga dapat digunakan untuk mengetahui nilai kadar air *monolayer* dan sifat termodinamikanya. Nilai kadar air *monolayer* digunakan untuk menentukan stabilitas kimia maupun fisika pada bahan pangan kering berdasarkan kurva ISA (Jamaluddin *et al.*, 2014). Penyerapan jumlah air yang melebihi kadar air *monolayer* akan menyebabkan penurunan mutu tekstur, reaksi enzimatis maupun non enzimatis, dan mikrobiologis (Navarrete *et al.*, 2004; Labuza, 1971). Sifat termodinamika meliputi entalpi dan entropi yang digunakan untuk mengetahui proses penyerapan air pada bahan pangan,

interaksi antara komponen makanan dan air, serta dapat memperkirakan ketepatan energi dari proses pengeringan (Telis-Romero *et al.*, 2005).

Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan kurva isoterm sorpsi air, pemodelan isoterm sorpsi air dan sifat termodinamika isoterm sorpsi air pada tepung singkong terfermentasi angkak. Pemodelan isoterm sorpsi air yang digunakan meliputi model GAB (*Guggenheim Anderson deBoer*), BET (*Brunauer Emmet Teller*) dan Caurie serta diuji ketepatan model menggunakan MRD (*Mean Relative Deviation*) dan RMSE (*Root Mean Square Error*).

## **METODE PENELITIAN**

Sampel yang digunakan dalam penelitian ini adalah singkong yang difermentasi dengan angkak (*Monascus purpureus*). Bahan kimia yang digunakan adalah tujuh jenis garam yang digunakan untuk mengatur kelembaban relatif (*relative humidity/RH*), yaitu NaOH, MgCl<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, KI, NaCl, KCl dari PT. Smart Lab Indonesia. Bahan kimia lain yang digunakan adalah akuades. Piranti yang digunakan untuk penelitian ini berupa cawan porselin, *chamber* untuk menentukan isoterm sorpsi, *moisture analyzer* untuk mengukur kadar air, neraca analitik, inkubator, termometer, higrometer, *drying cabinet* dan ayakan mesh 61 untuk pembuatan tepung.

### **Pembuatan Tepung Singkong Terfermentasi Angkak (Lakahina *et al.*, 2015)**

Singkong yang masih segar dibersihkan dari kulitnya kemudian dicuci dengan air mengalir. Singkong dikukus selama kurang lebih 60 menit, selanjutnya ditiriskan dan didinginkan sampai singkong mencapai suhu ruang. Singkong tersebut dipotong dan ditimbang sebanyak 1 kg kemudian diinokulasi dengan angkak dengan konsentrasi 12 %, lalu difermentasi selama 3 hari pada suhu ruang. Hasil fermentasi dikeringkan pada suhu 55 °C sampai kering. Setelah itu hasil fermentasi dihaluskan dan diayak dengan ayakan mesh 61.

### **Pengukuran Kadar Air Awal (Kumalasari, 2012)**

Sampel ditimbang sebanyak 0,5 g dalam cawan *moisture analyzer*. *Moisture analyzer* diset pada suhu 105 °C. *Moisture analyzer* ditutup dan ditunggu hasil kadar airnya. Hasil kadar air dicatat.

### **Pengaturan Kelembaban Relatif (Hayati, 2004)**

Larutan garam jenuh dibuat menggunakan garam NaOH, MgCl<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, KI, NaCl, KCl. Garam ditimbang dengan berat tertentu kemudian dimasukkan ke dalam *beaker glass* yang berisi air hangat suhu kurang lebih 50 °C dan diaduk sampai

larut. Jika garam yang dilarutkan dapat larut sempurna, maka garam ditambahkan sedikit demi sedikit sampai garam tidak larut lagi. Larutan garam jenuh dibuat sebanyak 50 mL dimasukkan dalam sebuah *glass container* yang cukup untuk menampung larutan garam. Larutan didiamkan selama kurang lebih 7 hari untuk memperoleh RH yang konstan.

**Pengukuran Kadar Air Kesetimbangan (Aini *et al.*, 2014)**

Sebanyak 5 g sampel masing-masing disimpan dalam *chamber* yang sudah diatur RH-nya menggunakan larutan-larutan garam jenuh. Larutan garam tersebut kemudian disimpan pada suhu 30 °C, 35 °C dan 40 °C. Penimbangan sampel dilakukan setiap hari selama 7 hari sampai tercapai *steady state*. Bila sampel telah berjamur sebelum 7 hari maka penimbangan dapat dihentikan.

**Pemodelan Matematika**

Model matematika yang digunakan untuk menentukan isoterm sorpsi air meliputi model GAB dengan kisaran  $a_w$  0,05 - 0,95; BET dengan kisaran  $a_w$  0,00 - 0,50 dan Caurie dengan kisaran  $a_w$  0,00 - 0,85 (Wariyah *and* Supriyadi, 2010; Hutasoit, 2009). Persamaan masing-masing model adalah sebagai berikut:

Persamaan GAB (Hutasoit, 2009) :

$$M = \frac{M_m CKa_w}{(1-Ka_w)(1-Ka_w+CKa_w)} \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

- |                       |                                 |
|-----------------------|---------------------------------|
| M = kadar air (%)     | $M_m$ = kadar air monolayer (%) |
| $a_w$ = aktivitas air | C = konstanta energi            |
| K = konstanta         |                                 |

Persamaan BET (Adawiyah dan Soekarto, 2010):

$$\frac{a_w}{(1-a_w)M} = \frac{1}{M_m C} + \frac{C-1}{M_m C} a_w \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

- |                                 |                       |
|---------------------------------|-----------------------|
| M = kadar air (%)               | $a_w$ = aktivitas air |
| $M_m$ = kadar air monolayer (%) | C = konstanta         |

Persamaan Caurie (Caurie, 1981):

$$\ln\left(\frac{1}{M}\right) = -\ln(C.M_m) + \frac{2c}{M_m} \ln\left(\frac{1-a_w}{a_w}\right) \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

- |                      |                                 |
|----------------------|---------------------------------|
| M = kadar air (%)    | $M_m$ = kadar air monolayer (%) |
| C = konstanta Caurie | $a_w$ = aktivitas air           |

**Uji Ketepatan Model (Iglesias and Chirife, 1976)**

Validitas statistik dari tiap-tiap model ditentukan menggunakan parameter statistik MRD (*Mean Relative Deviation*) dan RMSE (*Root Mean Square Error*) dengan persamaan (4) dan (5):

$$MRD = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|M_i - M_{pi}|}{M_i} \dots\dots\dots (4)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - M_{pi})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan:

- |                 |                               |                                    |
|-----------------|-------------------------------|------------------------------------|
| M <sub>i</sub>  | = kadar air hasil percobaan   | MRD < 5 maka model sangat tepat    |
| M <sub>pi</sub> | = kadar air hasil perhitungan | 5 < MRD < 10 maka model agak tepat |
| n               | = jumlah data                 | MRD > 10 maka model tidak tepat    |

**Karakteristik Isoterm Sorpsi Air**

Karakteristik isoterm sorpsi air pada tepung singkong terfermentasi angkak dianalisa meliputi kadar air monolayer menggunakan persamaan GAB, BET dan Caurie, serta entalpi dan entropi proses penyerapan air menggunakan persamaan Clausius-Clapeyron.

Persamaan Clausius - Clapeyron (Togrul and Arslan, 2007):

$$Q_n^{st} = -R \left[ \frac{d(\ln a_w)}{d\left(\frac{1}{T}\right)} \right]_x \dots\dots\dots (6)$$

$$Q^{st} = Q_n^{st} + q_c \dots\dots\dots (7)$$

$$-\ln a_w = \frac{Q^{st}}{RT} - \frac{\Delta S}{R} \dots\dots\dots (8)$$

Keterangan:

- |            |  |            |  |
|------------|--|------------|--|
| $Q_n^{st}$ | = kalor serap bersih (kJ mol <sup>-1</sup> )                 | $a_w$      | = aktivitas air  |
| R          | = konstanta gas (8,314 J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) | T          | = suhu (K)   |
| $q_c$      | = kalor laten (43,53 kJ mol <sup>-1</sup> )                  | $\Delta S$ | = entropi (Jmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> Kg <sup>-1</sup> ) |
| $Q^{st}$   | = entalpi (kJ mol <sup>-1</sup> Kg <sup>-1</sup> )           |            |  |

**Analisa Data (Motulsky and Christopoulos, 2004)**

Pengulangan dilakukan sebanyak 3 kali untuk sampel pada setiap jenis larutan garam, kemudian data dianalisa menggunakan regresi linier dan regresi non-linier.

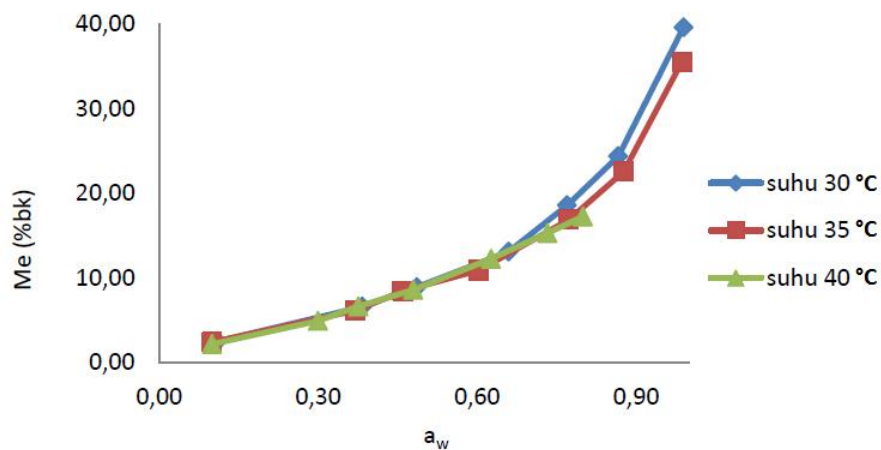
**PEMBAHASAN**

Kelembaban relatif (RH), aktivitas air (a<sub>w</sub>) dan kadar air kesetimbangan (M<sub>e</sub>) pada tepung singkong terfermentasi angkak ditunjukkan pada Tabel 1. Hubungan antara a<sub>w</sub> dan M<sub>e</sub> pada tepung singkong terfermentasi angkak dihubungkan dengan kurva ISA. Kurva

ISA pada tepung singkong terfermentasi angkak suhu 30 °C, 35 °C dan 40 °C dapat dilihat pada Gambar 1. Kurva ISA berbentuk huruf S atau berbentuk sigmoid, sehingga kurva ISA pada tepung singkong terfermentasi angkak mendekati tipe II. Kurva ISA berbentuk sigmoid yang mendekati tipe II kebanyakan terdapat pada bahan makanan kering, kurva berbentuk sigmoid disebabkan oleh kombinasi dari efek koligatif, kapiler dan interaksi antar permukaan (Labuza, 1984).

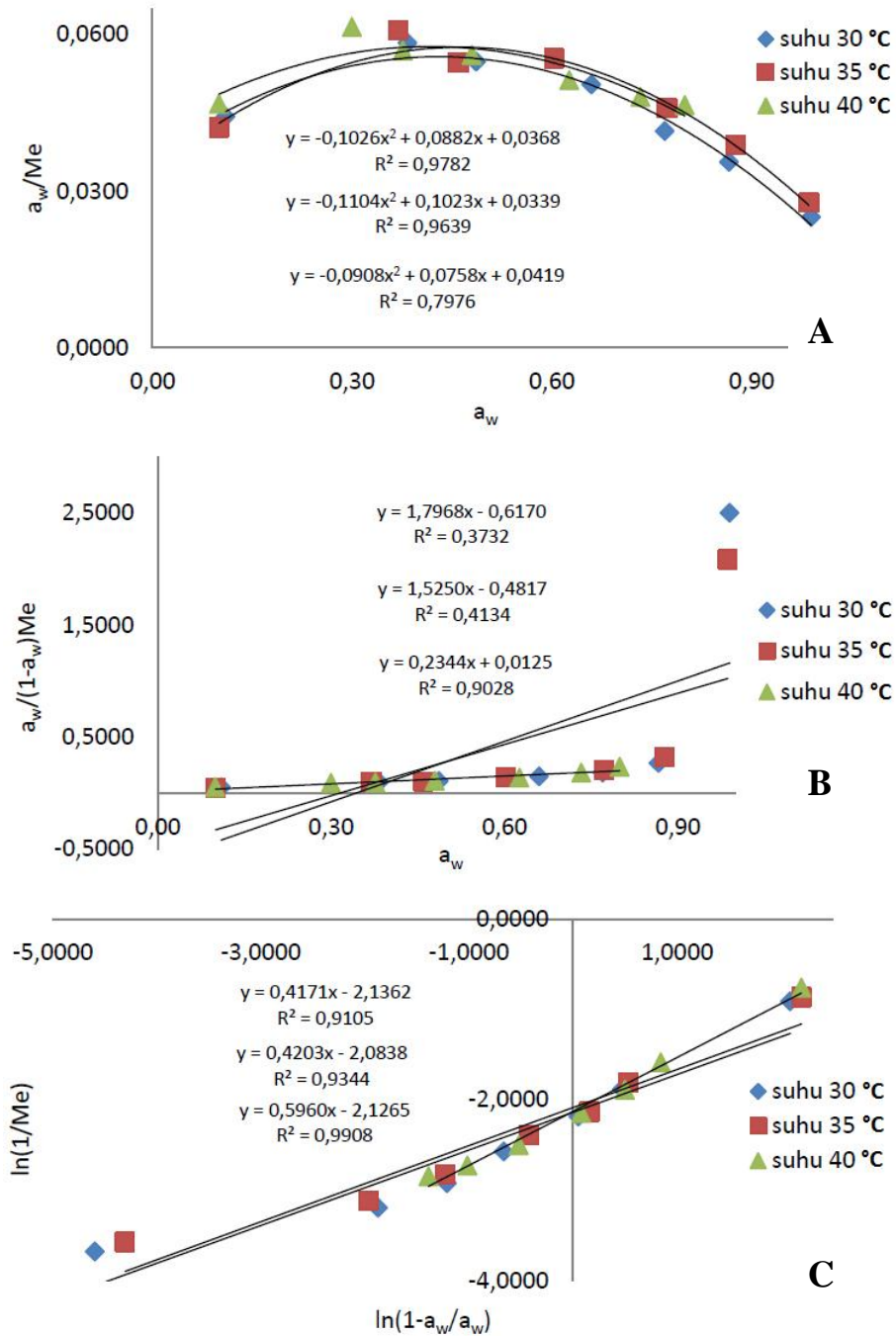
**Tabel 1.** Kelembaban Relatif (RH), Aktivitas Air ( $a_w$ ) dan Kadar Air Kesetimbangan ( $M_e$ ) pada suhu 30 °C, 35 °C dan 40 °C.

Garam	Suhu 30 °C			Suhu 35 °C			Suhu 40 °C		
	RH (%)	$a_w$	$M_e$ (%bk)	RH (%)	$a_w$	$M_e$ (%bk)	RH (%)	$a_w$	$M_e$ (%bk)
NaOH	11	0,11	2,49±0,16	10	0,10	2,37±0,24	10	0,10	2,14±0,24
MgCl <sub>2</sub>	38	0,38	6,57±0,50	37	0,37	6,09±0,86	30	0,30	4,88±0,55
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	49	0,49	8,88±0,62	46	0,46	8,43±0,78	38	0,38	6,62±0,40
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	66	0,66	13,08±1,23	60	0,60	10,88±1,48	48	0,48	8,57±0,70
KI	77	0,77	18,54±1,13	77	0,77	16,85±1,93	63	0,63	12,23±1,46
NaCl	87	0,87	24,35±1,72	88	0,88	22,52±2,57	73	0,73	15,28±1,61
KCl	99	0,99	39,59±2,35	99	0,99	35,49±5,08	80	0,80	17,22±1,68



**Gambar 1.** Kurva isoterm sorpsi air pada tepung singkong terfermentasi angkak suhu 30 °C, 35 °C dan 40 °C.

Model matematika yang digunakan untuk memprediksikan hubungan antara kadar air kesetimbangan dan aktivitas air yaitu GAB (*Guggenheim Anderson deBoer*) dengan  $y = \frac{a_w}{M_e}$  dan  $x = a_w$ , BET (*Brunauer Emmet Teller*) dengan  $y = \frac{a_w}{(1-a_w)M_e}$  dan  $x = a_w$  serta Caurie dengan  $y = \ln(\frac{1}{M_e})$  dan  $x = \ln(\frac{1-a_w}{a_w})$ . Gambar 2 menunjukkan kurva pemodelan isoterm sorpsi air pada tepung singkong terfermentasi angkak dengan suhu 30 °C, 35 °C dan 40 °C pada model GAB (a), BET (b) dan Caurie (c).



**Gambar 2.** Pemodelan isoterm sorpsi air pada tepung singkong terfermentasi angka suhu 30 °C, 35 °C dan 40 °C pada model (a) GAB, (b) BET dan (c) Caurie.

Persamaan regresi linier maupun non-linier dari masing-masing pemodelan digunakan untuk menentukan kadar air kesetimbangan pada hasil perhitungan ( $M_{hit}$ ). Tabel 2 menunjukkan nilai kadar air kesetimbangan hasil percobaan ( $M_e$ ) dan kadar air kesetimbangan hasil perhitungan ( $M_{hit}$ ) dengan model GAB, BET dan Caurie.

**Tabel 2.** Nilai  $M_e$  dan  $M_{hit}$  model GAB, BET dan Caurie.

Garam	Suhu 30 °C				Suhu 35 °C				Suhu 40 °C			
	$M_e$	$M_{hit}$			$M_e$	$M_{hit}$			$M_e$	$M_{hit}$		
		GAB	BET	Caurie		GAB	BET	Caurie		GAB	BET	Caurie
NaOH	2,49	2,43	-0,29	3,54	2,37	2,32	-0,34	3,19	2,14	2,06	3,09	2,26
MgCl <sub>2</sub>	6,57	6,90	8,66	6,94	6,09	6,53	7,11	6,42	4,88	5,31	5,17	5,06
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	8,88	8,78	3,68	8,28	8,43	7,99	3,88	7,51	6,62	6,54	6,00	6,21
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	13,08	13,12	3,41	11,17	10,88	10,88	3,47	9,58	8,57	8,37	7,38	7,99
KI	18,54	17,55	4,37	14,02	16,85	16,46	4,89	13,46	12,23	11,66	10,53	11,42
NaCl	24,35	23,96	6,91	18,48	22,52	22,63	8,31	18,32	15,28	15,07	14,91	15,32
KCl	39,59	42,02	85,21	57,56	35,49	36,06	72,34	49,05	17,22	18,01	20,00	19,16

Perbandingan antara kadar air kesetimbangan hasil perhitungan ( $M_{hit}$ ) dengan kadar air kesetimbangan hasil percobaan ( $M_e$ ) dapat digunakan untuk menghitung nilai MRD dan RMSE. Tabel 3 menunjukkan nilai MRD dan RMSE untuk masing-masing model matematika pada suhu 30 °C, 35 °C dan 40 °C.

**Tabel 3.** Nilai MRD pemodelan pada suhu 30 °C, 35 °C dan 40 °C.

Pemodelan	Nilai MRD (%)			Nilai RMSE		
	30 °C	35 °C	40 °C	30 °C	35 °C	40 °C
GAB	3,12	2,71	3,81	1,01	0,35	0,42
BET	77,07	70,14	15,16	19,71	15,98	1,39
Caurie	23,34	19,95	5,78	7,40	5,56	0,84

Berdasarkan Tabel 3 model yang tepat untuk menggambarkan fenomena isoterm sorpsi air adalah model yang memiliki nilai MRD < 5, yaitu model GAB. Menurut Timmermann *et al.* (2001) model GAB memiliki rentang  $a_w \sim 0,9$  sehingga model ini tepat untuk mendeskripsikan data-data isoterm sorpsi air. Hal ini diperkuat dengan penelitian Menkov *and* Durakova (2007) bahwa model GAB cocok untuk menggambarkan hubungan antara kadar air kesetimbangan, aktivitas air dan suhu pada isoterm sorpsi air tepung wijen. Penelitian Aini *et al.* (2014) menunjukkan bahwa model GAB dapat menggambarkan kurva isoterm sorpsi air tepung jagung instan.

Model GAB, BET dan Caurie digunakan untuk menghitung kadar air *monolayer*. Tabel 4 menunjukkan hasil kadar air *monolayer* ( $M_o$ ) pemodelan pada masing-masing suhu.

**Tabel 4.** Nilai  $M_o$  pemodelan pada suhu 30 °C, 35 °C dan 40 °C.

Pemodelan	$M_o$		
	30 °C	35 °C	40 °C
GAB	6,61	6,27	6,91
BET	4,92	4,86	5,19
Caurie	6,37	6,18	5,30

Ikatan yang kuat terhadap air dapat disebut dengan kadar air *monolayer*. Menurut Aini *et al.* (2014) stabilitas fisik dan kimia bahan yang dikeringkan ditentukan oleh



kandungan air pada lapisan *monolayer* ini. Berdasarkan Tabel 4 dapat dilihat bahwa nilai  $M_o$  pada masing-masing model memiliki nilai yang berbeda pada tiap suhu. Pada model GAB dan BET dari suhu 30 °C ke suhu 35 °C mengalami penurunan nilai kadar air *monolayer*, sedangkan dari suhu 35 °C ke suhu 40 °C mengalami kenaikan nilai kadar air *monolayer*. Nilai  $M_o$  pada model caurie hasilnya menurun dengan naiknya suhu. Hasil penelitian Menkov *and* Durakova (2007) nilai  $M_o$  menggunakan model BET pada tepung wijen menurun dengan meningkatnya suhu. Penelitian Jha *et al.* (2014) nilai  $M_o$  dengan model GAB pada tepung bebas Gluten meningkat seiring dengan meningkatnya suhu. Perbedaan nilai  $M_o$  disebabkan oleh komposisi kimia, struktur dan lingkungan seperti suhu (Rahman, 2009). Menurut Noguchi (1981) ketika suhu dinaikkan maka hidrasi hidrofobik akan turun sehingga jumlah air yang diikat juga akan turun.

**Tabel 5.** Nilai entalpi dan entropi proses penyerapan air pada tepung singkong terfermentasi angkak.

Me (% bk)	$\Delta H$ (kJ mol <sup>-1</sup> Kg <sup>-1</sup> )	$\Delta S$ (J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> Kg <sup>-1</sup> )
4,5	-65540,05	196,92
6	-26639,03	76,32
7,5	-13440,84	36,09
9	-7054,94	17,05
10,5	-3489,60	6,67
12	-1352,44	0,62

Persamaan Clausius - Clapeyron digunakan untuk menghitung nilai entalpi dan entropi proses penyerapan air pada tepung singkong terfermentasi angkak yang dapat dilihat pada Tabel 5. Berdasarkan Tabel 5 nilai entalpi bernilai negatif dan proses penyerapan air menurun dengan meningkatnya kadar air. Hal ini menjelaskan bahwa nilai entalpi yang bernilai negatif menunjukkan reaksi eksoterm yang terjadi pelepasan kalor dari sistem ke lingkungan (Kaleemullah *and* Kailappan, 2007). Pada tingkat kadar air yang tinggi maka kekuatan untuk mengikat air akan menurun sedangkan pada kadar air rendah paling banyak terjadi penyerapan sehingga menimbulkan interaksi energi yang besar (Togrul *and* Arslan, 2007; Villa-Velez *et al.*, 2012). Nilai entropi proses penyerapan air juga menurun seiring dengan meningkatnya kadar air. Hal ini menjelaskan bahwa gerakan molekul akan lebih terbatas jika kadar air menurun (Eim *et al.*, 2011). Hasil Penelitian Ayala - Aponte (2015) pada tepung singkong dan penelitian Owo *et al.* (2016) pada tepung ubi, nilai entalpi dan entropi menurun dengan meningkatnya kadar air.

## KESIMPULAN

Kurva isotherm sorpsi air pada tepung singkong terfermentasi angkak mempunyai bentuk sigmoid yang mendekati tipe II. Model yang tepat untuk menggambarkan fenomena isotherm sorpsi air pada tepung singkong terfermentasi angkak adalah model GAB dengan nilai MRD dan RMSE pada suhu 30 °C, 35 °C dan 40 °C secara berturut-turut sebesar 3,12 %; 2,71 %; 3,81 % dan 1,01; 0,35; 0,42. Nilai kadar air *monolayer* suhu 30 °C, 35 °C dan 40 °C berturut-turut pada model GAB sebesar 6,61 %; 6,27 % dan 6,91 %; model BET sebesar 4,92 %; 4,86 % dan 5,19 %; sedangkan model Caurie sebesar 6,37 %; 6,18 % dan 5,30 %. Entalpi dan entropi proses penyerapan air menurun seiring dengan meningkatnya kadar air.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adawiyah, D. R., and Soekarto, S. T., 2010. Pemodelan Isothermis Sorpsi Air pada Model Pangan. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan* 21 (1), 33-39.
- Aini, N., Prihananto, V., and Wijonarko, G., 2014. Karakteristik Kurva Isotherm Sorpsi Air Tepung Jagung Instan. *Agritech* 34 (1), 50-55.
- Ajisehiri, E. S. A., Chukwu, O., and Sopade, P. A., 2007. Moisture-Sorption Study of Locally-Parboiled Rice. *AU Journal of Technology* 11 (2), 86-90.
- Ayala-Aponte, A. A., 2015. Thermodynamic Properties of Moisture Sorption in Cassava Flour. *Dyna* 83 (197), 138-144.
- Cahyanti, M. N., 2008. *Pendugaan Masa Simpan Biskuit Coklat dengan Metode ASLT Berdasarkan Kadar Air*. Skripsi tidak diterbitkan, Universitas Kristen Satya Wacana, Salatiga.
- Caurie, M., 1981. *Derivation of Full Range Moisture Sorption Isotherms*. Dalam Rockland, L. B. dan Stewart, G. F. (eds). *Water Activity: Influence on Food Quality*. Academic Press, New York.
- Eim, V. S., Rossello, C., Femenia, A., and Simal, S., 2011. Moisture Sorption Isotherms and Thermodynamic Properties of Carrot. *International Journal of Food Engineering* 7 (3), 1-16.
- Hayati, R., Abdullah, A., Ayob, M. K., and Soekarto, S. T., 2004. Isothermi Sorpsi Air dan Analisis Umur Simpan Ikan Kayu Tongkol (*Euthynnus affinis*) dari Aceh. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan* 15 (3), 207-213.
- Hutasoit, N., 2009. *Penentuan Umur Simpan Fish Snack (Produk Ekstrusi) Menggunakan Metode Akselerasi dengan Pendekatan Kadar Air Kritis dan Metode Konvensional*. Skripsi, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Iglesias, H. A. and Chirife, J., 1976. A Model for Describing The Water Sorption Behaviour of Foods. *Journal of Food Science* 41 (5), 984-992.

- Jamaluddin., Molenaar, R., and Tooy, D., 2014. Kajian Isoterm Sorpsi Air dan Fraksi Air Terikat Kue Pia Kacang Hijau Asal Kota Gorontalo. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Pangan* 2 (1), 27-37.
- Jha, E., Dahiya, V. S., and Singh, A. K., 2014. Moisture Sorption Characteristics of Gluten-Free Flour. *International Journal of Agriculture and Food Science Technology* 5 (2), 27-34.
- Kaleemullah, S. and Kailappan, R., 2007. Monolayer Moisture, Free Energy Change and Fractionation of Bound Water of Red Chillies. *Journal of Stored Products Research* 43, 104-110.
- Koswara, S., 2013. *Teknologi Pengolahan Umbi-Umbian*. Modul, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Kumalasari, H., 2012. *Validasi Metoda Pengukuran Kadar Air Bubuk Perisa Menggunakan Moisture Analyzer Halogen HB43-S, sebagai Alternatif Metoda Oven dan Karl Fischer*. Skripsi, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Labuza, T. P. 1971. Kinetics of Lipid Oxidation in Foods. *Critical Reviews in Food Technology* 2 (3), 355-405.
- Labuza, T. P., 1984. *Moisture Sorption: Practical Aseptics of Isotherm Measurement and Use*. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota.
- Lakahina, O., Saputri, Y. L. I. D., and Hartanto, B. D., 2015. *Mocaf Merah – Pangan Kaya Antioksidan Berbasis Kearifan Lokal*. Program Kreativitas Mahasiswa, Universitas Kristen Satya Wacana, Salatiga.
- Marniza., Medikasari., and Nurlaili., 2011. Produksi Tepung Ubi Kayu Berprotein: Kajian Pemanfaatan Tepung Kacang Benguk sebagai Sumber Nitrogen Ragi Tempe. *Jurnal Teknologi dan Industri Hasil Pertanian* 16 (1), 73-81.
- Menkov, N. D., and Durakova, A. G., 2007. Moisture Sorption Isotherms of Sesame Flour at Several Temperatures. *Food Technol. Biotechnol* 45 (1), 96-100.
- Motulsky, H., and Christopoulos, A., 2004. *Fitting Models to Biological Data Using Linear and Nonlinear Regression: A Practical Guide to Curve Fitting*. Oxford University Press Inc., New York.
- Navarette, N. M., Moraga, G., Talens, P., and Chiralt, A., 2004. Water Sorption and The Plasticization Effect in Wafers. *International Journal of Food Science & Technology* 39 (5), 555-562.
- Noguchi, H., 1981. *Hydration Around Hydrophobic Groups*. Dalam Rocland, L. B. and Stewart, G. F. (Eds). *Water Activity: Influences on Food Quality*. Academic Press Inc., New York.
- Owo, H. O., Adebawale, A. A., Sobukola, O. P., Obadina, A. O., Kajihansa, O. E., Adegunwa, M. O., Sanni, L. O., and Tomlins, K., 2016. Adsorption Isotherms and Thermodynamics Properties of Water Yam Flour. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 1-8.
- Rahman, M. S., 2009. Food Stability Beyond Water Activity and Glass Transition: Macro-Micro Region Concept in the State Diagram. *International Journal of Food Properties* 12 (4), 726-740.
- Sianipar, D., Sugiyono., and Syarief, R., 2008. Kajian Formulasi Bumbu Instan Binthe Biluhuta, Karakteristik Hidratasi dan Pendugaan Umur Simpannya dengan

Menggunakan Metode Pendekatan Kadar Air Kritis. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan* 19 (1), 32-39.

- Susetyo, Y. A., Hartini, S., and Cahyanti, M. N., 2016. Optimasi Kandungan Gizi Tepung Ubi Jalar (*Ipomoea batatas* L.) Terfermentasi Ditinjau dari Dosis Penambahan Inokulum Angkak serta Aplikasinya dalam Pembuatan Mie Basah. *Jurnal Aplikasi Teknologi Pangan* 5 (2), 44-51.
- Telis-Romero, J., Kohayakawa, M. N., Silveira, J. R. V., Pedro, M. A. M., and Gabas, A. L., 2005. Enthalpy-Entropy Compensation based on Isotherms of Mango. *Cienc. Tecnol. Aliment., Campinas* 25 (2), 297-303.
- Timmermann, E. O., Chirife, J., and Iglesias, H. A., 2001. Water Sorption Isotherms of Foods and Foodstuffs: BET or GAB Parameters. *Journal of Food Engineering* 48, 19-31.
- Togrul, H., and Arslan, N., 2007. Moisture Sorption Isotherms and Thermodynamic Properties of Walnut Kernels. *Journal of Stored Products Research* 43, 252-264.
- Villa-Velez, H. A., Vaquiro, H. A., Bon, J., and Telis-Romero, J., 2012. Modelling Thermodynamic Properties of Banana Waste by Analytical Derivation of Desorption Isotherms. *International Journal of Food Engineering* 8 (1), 1-19.
- Wariyah, C., and Supriyadi, 2010. Isoterm Sorpsi Lembab Beras Berkalsium. *Agritech* 30 (4), 199-203.