



วิทยานิพนธ์

การหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของ
ฟิล์มพลาสติกและการประยุกต์ในการบรรจุอาหารที่ไวต่อความชื้น

**DETERMINATION OF ACTIVATION ENERGY FOR WATER
VAPOR PERMEABILITY OF PLASTIC FILMS AND
APPLICATIONS IN MOISTURE SENSITIVE FOOD
PACKAGING**

นางรัชนีวรรณ กุลจันทร์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

ปริญญา

เทคโนโลยีการบรรจุ

เทคโนโลยีการบรรจุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มพลาสติกและการประยุกต์ในการบรรจุอาหารที่ไวต่อความชื้น

Determination of Activation Energy for Water Vapor Permeability of Plastic Films and Applications in Moisture Sensitive Food Packaging

นางผู้วิจัย นางรัชนีวรรณ กุลจันทร์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภาณุวัฒน์ สรรพกุล, Ph.D)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์, Ph.D)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์วาณี ชนเห็นชอบ, Ph.D)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์สำหรับสภาพให้ซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพลาสติกและการประยุกต์ในการบรรจุอาหารที่ไวต่อความชื้น

Determination of Activation Energy for Water Vapor Permeability of Plastic Films and Applications in Moisture Sensitive Food Packaging

โดย

นางรัชนีวรรณ กุลจันทร์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

พ.ศ. 2551

รัชนิวรรณ กุลจันทร์ 2551: การหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มพลาสติกและการประยุกต์ในการบรรจุอาหารที่ไวต่อความชื้น ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ) สาขาเทคโนโลยีการบรรจุ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภาณุวัฒน์ สรรพกุล, Ph.D 130 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจข้อมูลเบื้องต้นของฟิล์มพลาสติกสำหรับการบรรจุอาหารที่ไวต่อความชื้น เพื่อศึกษาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (พก.) สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์ม และเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการใช้ค่า พก. ในการทำนายอายุการเก็บของอาหารที่ไวต่อความชื้น จากการสำรวจพบว่าฟิล์มประเภทเป็นวัสดุทางการบรรจุหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารที่ไวต่อความชื้น การศึกษาค่า พก. สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มพลาสติกจำนวน 25 ชนิด พบว่าฟิล์มดังกล่าวสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มคือ ก) ฟิล์มที่มีค่า พก. ต่ำ (4.05-7.47 กิโลจูลต่อ โมล) ข) ฟิล์มที่มีค่า พก. ปานกลาง (11.20-15.40 กิโลจูลต่อ โมล) และ ค) ฟิล์มที่มีค่า พก. สูง (18.13-24.63 กิโลจูลต่อ โมล) สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพในการทำนายอายุการเก็บขนมฝิงโดยใช้ค่า พก. เป็นตัวปรับค่านั้น ขั้นแรกต้องศึกษาลักษณะเฉพาะของการดูดความชื้นก่อนจากการศึกษาจลนศาสตร์การดูดความชื้นพบว่าขนมมีการดูดความชื้นอย่างรวดเร็วในระยะแรก และจะช้าลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ความชื้นสัมพัทธ์ยังสูง ยังมีอิทธิพลต่อการดูดความชื้น เส้นโค้งการดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ของขนมฝิงมีลักษณะแบบซิกมอยด์ (แบบที่ 2) โดยปริมาณความชื้นสมดุลของขนมเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนที่วอเตอร์แอกติวิตี (วอ.) มากกว่า 0.73 GAB Peleg และ Lewicki เป็นรูปแบบเชิงประจักษ์ที่สามารถใช้ปรับเส้นโค้งได้ดีกว่า การศึกษาอิทธิพลของความชื้นต่อคุณภาพของขนมฝิง ได้แก่ การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ สมบัติเชิงเคมีกายภาพ (ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นวิกฤติ) สมบัติเชิงกายภาพ (ความแข็ง) สมบัติเชิงอุณหภาพ (อุณหภูมิคล้ายแก้ว) และสมบัติทางประสาทสัมผัส (เนื้อสัมผัส) พบว่าขนมฝิงที่ทำเสร็จใหม่จะมีลักษณะแข็งกรอบ มีค่า วอ. ความชื้น และอุณหภูมิคล้ายแก้วเท่ากับ 0.38 ร้อยละ 3.9 และ 148 องศาเซลเซียสตามลำดับ การทดสอบทางประสาทสัมผัสบ่งชี้ว่าขนมมีความกรอบมาก (คะแนน = 7.8) เมื่อขนมฝิงมีค่า วอ. ต่ำกว่า 0.54 (ความชื้นร้อยละ 6) ขนมยังคงมีความกรอบในระดับที่ผู้บริโภคยอมรับ (คะแนน ≥ 5) นอกจากนี้ยังพบสิ่งที่น่าสนใจอีกว่า ความแข็ง และงานของขนมเมื่อถึงระดับสูงสุด และค่า วอ. เริ่มลดลง (ค่า วอ. ≈ 0.54 ความชื้นร้อยละ 6) จะส่งผลให้เนื้อสัมผัสของขนมเริ่มนิ่ม และไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (คะแนน = 5) ดังนั้นจึงกำหนดให้ความชื้นร้อยละ 6 (ค่า วอ. ≈ 0.54) เป็นความชื้นวิกฤติของขนมฝิง สำหรับการทำนายอายุการเก็บโดยใช้ค่า พก. พบว่าอายุการเก็บของขนมฝิงที่บรรจุในถุง LDPE (ค่า พก. = 21.32 กิโลจูลต่อ โมล) และ OPP (ค่า พก. = 21.39 กิโลจูลต่อ โมล) เป็นเวลา 37 และ 122 วัน ตามลำดับ อายุการเก็บดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับอายุการเก็บจริง (35 และ 119 วัน ตามลำดับ) ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ดังนั้นการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการใช้ค่า พก. สำหรับการทำนายอายุการเก็บ

Ratchaneewan Kulchan 2008: Determination of Activation Energy for Water Vapor Permeability of Plastic Films and Applications in Moisture Sensitive Food Packaging. Master of Science (Packaging Technology), Major Field: Packaging Technology, Department of Packaging Technology. Thesis Advisor: Assistant Professor Panuwat Suppakul, Ph.D. 130 pages.

The purposes of this research were to survey the preliminary data of plastic films for moisture sensitive food packaging, to determine activation energy for water vapor permeability of the films and to study the efficiency of the use of activation energy (E_a) in order to predict the shelf life of moisture sensitive food. From the survey; it was found that laminated film was used as a major packaging material in moisture sensitive food industry. Activation energies for water vapor permeability of selected 25 packaging films were determined. They can be classified into 3 groups: a) film with low E_a (4.05-7.47 kJ mol⁻¹), b) film with medium E_a (11.20-15.40 kJ mol⁻¹) and c) film with high E_a (18.13-24.63 kJ mol⁻¹). In order to study the efficiency in shelf life prediction of Khanom Phing by using E_a as a correction factor, moisture sorption characteristics was firstly required to investigate. For moisture sorption kinetic, it was more rapid in the initial stages and a lesser amount of moisture was adsorbed as adsorption time increased. The higher the relative humidity used, the more pronounced effect. Its moisture sorption isotherm curve can be classified as type II sigmoidal isotherm. The equilibrium moisture content of Khanom Phing dramatically soared above $A_w = 0.73$. GAB, Peleg and Lewicki models were found to be the better-fitted model for Khanom Phing. It was also investigated effect of relative humidity on Khanom Phing's quality (i.e. proximate analysis, physicochemical properties (initial and critical moisture contents), physical property (hardness), thermal property (glass transition temperature) and sensorial property (texture)). It was initially in a glassy stage with A_w , moisture content and glass transition temperature (T_g) of 0.38, 3.9% and 148 °C, respectively. A sensory test indicated that the product was highly crispy (score = 7.8). As having A_w lower than 0.54 (6% MC), the product crispness was preserved in satisfactory degrees (score ≥ 5). Interestingly, it was noticed that once the product hardness or work reached the maximum and began to reduce at $A_w \approx 0.54$ (6% MC), the product texture became detected as slightly soft (score = 5, unacceptable texture). Consequently, 6% MC ($A_w \approx 0.54$) of Khanom Phing was defined as critical moisture content. Estimated by employing activation energy, the shelf lives of Khanom Phing packed in LDPE ($E_a = 21.32$ kJ mol⁻¹) and OPP ($E_a = 21.39$ kJ mol⁻¹) pouches were found to be 37 and 122 days, respectively. These predicted shelf lives were closed to the experimental shelf lives of Khanom Phing (35 and 119 days, respectively), stored at 30°C and 50% relative humidity. Therefore, this study demonstrated the efficiency of the use of E_a for shelf life prediction.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ สรรพกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
ร่วม ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานการวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และให้คำปรึกษาแนะนำทาง
วิชาการต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ยิ่ง อีกทั้งตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้
ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณศักดิ์ แสนสุภา ผู้อำนวยการศูนย์การบรรจุมหัทธไทย สถาบันวิจัย
วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และสถานที่ในการทำ
วิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ และขอบคุณพนักงาน ศูนย์การบรรจุมหัทธ
ไทยทุกคนที่ให้ความร่วมมือในการทดสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณชารทิพย์ เจริญภักดี คุณจีระพงษ์ เกตุเลขา เจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีการ
บรรจุมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ และการทดสอบ
ต่างๆ ขอขอบคุณ คุณธัญญารัตน์ คำดี และคุณอิสริย์ ศรีอนันต์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ
คณะอุตสาหกรรมเกษตร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการสอนการใช้เครื่องมือต่างๆ ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณบริษัท พรินมาสเตอร์ จำกัด บริษัท ไทยฟิล์ม จำกัด (มหาชน) บริษัท ทีพีเอ็น
แพ็คเกจจิ้ง จำกัด และบริษัท เอสที ดีไซน์ จำกัด ที่อนุเคราะห์วัสดุบรรจุมหัทธในการทำ
วิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณ คุณแม่ผู้มีพระคุณ สามิและบุตรของข้าพเจ้าที่เข้าใจและให้การ
สนับสนุนด้วยดีมาโดยตลอด

ประโยชน์อันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน และหากมี
ข้อผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

รัชนิวรรณ กุลจันทร์

เมษายน 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	39
อุปกรณ์	39
วิธีการ	40
ผลและวิจารณ์	50
สรุปและข้อเสนอแนะ	89
สรุป	89
ข้อเสนอแนะ	92
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	93
ภาคผนวก	107
ภาคผนวก ก การเตรียมสารละลายลิเทียมคลอไรด์	108
ภาคผนวก ข การวัดอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพลาสติก	111
ภาคผนวก ค สูตรและวิธีการทำขนมปัง	114
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ความชื้น	116
ภาคผนวก จ การทำนายอายุการเก็บ	118
ภาคผนวก ฉ ความดันไอน้ำอิ่มตัว	126
ภาคผนวก ช แบบสอบถามการทดสอบทางประสาทสัมผัส	128
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	130

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ชนิดพลาสติกชั้นเดียวที่ใช้ในปัจจุบัน	50
2	ชนิดฟิล์มที่ใช้กับอุตสาหกรรมอาหาร	51
3	สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มพลาสติก	54
4	พลังงานก่อกัมมันต์ของฟิล์มชนิดต่างๆ ที่มีการจัดกลุ่มโดยใช้วิธีการจัดกลุ่มแบบคลัสเตอร์	60
5	ค่าคงที่ของรูปแบบเชิงประจักษ์ที่ใช้ปรับเส้นโค้งของการศึกษาจลนศาสตร์การดูดความชื้นของขนมฝิง ที่อุณหภูมิ 30 ± 1 องศาเซลเซียส และ R^2 ที่ระดับความชื้นต่างๆ	64
6	ตัวแปรของรูปแบบเชิงประจักษ์ต่างๆ ที่นำมาใช้ปรับเส้นโค้งของกราฟ R^2 และ % RMS ของขนมฝิง	66
7	องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของขนมฝิง	68
8	ความแข็งและงานของขนมฝิงที่ระดับความชื้นและวอเตอร์แอกติวิตีต่างๆ	69
9	อุณหภูมิคล้ายแก้วของขนมฝิงที่ระดับความชื้นและวอเตอร์แอกติวิตีต่างๆ	70
10	ความกรอบของขนมฝิงที่ระดับความชื้นและวอเตอร์แอกติวิตีต่างๆ	77
11	ข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษาอายุการเก็บขนมฝิง	82
12	ความชื้นและวอเตอร์แอกติวิตีของขนมฝิงในถุงพลาสติก LDPE และ OPP ในระยะเวลาการเก็บต่างๆ	84
13	อายุการเก็บของขนมฝิงในถุง LDPE และ OPP ที่ได้จากวิธีการต่างๆ	87
ตารางผนวกที่		
ก1	วอเตอร์แอกติวิตีของสารละลายลิเทียมคลอไรด์ ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ถึง 45 องศาเซลเซียส	110
ฉ1	ความดันไอน้ำอิ่มตัว	127

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะการเกิดพลังงานก่อกัมมันต์	29
2	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(k)$ กับ ค่า $1/T$ ตามสมการของอาร์เรเนียส	30
3	สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ	56
4	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(P)$ กับ $1/T$ ของฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ	61
5	ลักษณะการดูดความชื้นของขนมฝักรูปที่เก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 11.3 32.4 51.5 75.1 และ 92.3 ที่อุณหภูมิ 30 ± 1 องศาเซลเซียส	63
6	การดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ของขนมฝักรูป ที่อุณหภูมิ 30 ± 1 องศาเซลเซียส	65
7	การเปรียบเทียบปริมาณความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลองกับการทำนาย	67
8	การกระจายตัวของความคลาดเคลื่อน ที่เกิดจากการประเมินความเหมาะสมในแต่ละรูปแบบเชิงประจักษ์ที่ใช้ในการปรับเส้นโค้งการดูดความชื้น	68
9	เทอร์โมแกรมของอุณหภูมิกลายแก้วของขนมฝักรูปที่มีความชื้นร้อยละ 0.058 ± 0.016	71
10	อนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของอุณหภูมิกลายแก้วของขนมฝักรูปที่มีความชื้นร้อยละ 0.058 ± 0.016	71
11	เทอร์โมแกรมของอุณหภูมิกลายแก้วของขนมฝักรูปที่มีความชื้นร้อยละ 2.447 ± 0.039	72
12	อนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของอุณหภูมิกลายแก้วของขนมฝักรูปที่มีความชื้นร้อยละ 2.447 ± 0.039	72
13	เทอร์โมแกรมของอุณหภูมิกลายแก้วของขนมฝักรูปที่มีความชื้นร้อยละ 2.809 ± 0.052	73
14	อนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของอุณหภูมิกลายแก้วของขนมฝักรูปที่มีความชื้นร้อยละ 2.809 ± 0.052	73
15	เทอร์โมแกรมของอุณหภูมิกลายแก้วของขนมฝักรูปที่มีความชื้นร้อยละ 6.262 ± 0.051	74
16	อนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของอุณหภูมิกลายแก้วของขนมฝักรูปที่มีความชื้นร้อยละ 6.262 ± 0.051	74
17	เทอร์โมแกรมของอุณหภูมิกลายแก้วของขนมฝักรูปที่มีความชื้นร้อยละ 12.649 ± 0.150	75

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
18	อนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของอนุกรมคัลายแก้วของขนมฝิงที่มีความชื้นร้อยละ 12.649±0.150	75
19	เทอร์โมแกรมของอนุกรมคัลายแก้วของขนมฝิงที่มีความชื้นร้อยละ 36.046±0.314	76
20	อนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของอนุกรมคัลายแก้วของขนมฝิงที่มีความชื้นร้อยละ 36.046±0.314	76
21	ความสัมพันธ์ระหว่างวอเตอร์แอกติวิตี คุณลักษณะเนื้อสัมผัส และอนุกรมคัลาย แก้วของขนมฝิง	78
22	ความสัมพันธ์ระหว่างความกรอบและความแข็งของขนมฝิง ที่มีวอเตอร์แอกติวิตี ตั้งแต่ 0.234-0.670	80
23	ความสัมพันธ์ระหว่างความกรอบและความแข็งของขนมฝิงที่มีคะแนนต่ำกว่า 4	81
24	ความสัมพันธ์ระหว่างความกรอบและความแข็งของขนมฝิงที่มีคะแนนสูงกว่า 5	81
25	ความสัมพันธ์ระหว่างวอเตอร์แอกติวิตี คุณลักษณะเนื้อสัมผัส และการยอมรับของ ขนมฝิงที่เก็บในถุง LDPE	85
26	ความสัมพันธ์ระหว่างวอเตอร์แอกติวิตี คุณลักษณะเนื้อสัมผัส และการยอมรับของ ขนมฝิงที่เก็บในถุง OPP	85

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ALU	=	aluminium foil
A_w	=	water activity
APET	=	amorphous polyethylene terephthalate
BET	=	Brunauer-Emmett-Teller
CH_2COOK	=	potassium acetate
CPET	=	crystallized polyethylene terephthalate
D	=	diffusion coefficient
DSC	=	differencetial scanning calorimetry
E_a	=	activation energy
Ej	=	environmental factors
EVA	=	ethylene vinyl acetate
EVOH	=	ethylene vinyl alcohol
GAB	=	Guggenheim-Anderson-de Boer
GPPS	=	general purpose polystyrene
HDPE	=	high density polyethylene
HIPS	=	high impact polystyrene
HPLC	=	high - performance liquid chromatography
KCl	=	potassium chloride
K_2CO_3	=	potassium carbonate
K_2NO_3	=	potassium nitrate
KI	=	potassium iodide
LDPE	=	low density polyethylene
LiCl	=	lithium chloride
LLDPE	=	linear low density polyethylene
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	=	magnesium nitrate
MgCl_2	=	magnesium chloride

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

MPET	=	metallized polyethylene terephthalate
MCPP	=	metallized cast polypropylene
MOPP	=	metallized oriented polypropylene
NaCl	=	sodium chloride
OPP	=	oriented polypropylene
P	=	permeability coefficient
PE	=	polyethylene
PEN	=	polyethylene naphthalate
PET	=	polyethylene terephthalate
PETG	=	glycol modified polyethylene terephthalate
PP	=	polypropylene
PS	=	polystyrene
PVC	=	polyvinyl chloride
PVDC	=	polyvinylidene chloride
R^2	=	coefficient of determination
RH	=	relative humidity
%RMS	=	root mean square percent error
S	=	solubility coefficient
T_g	=	glass transition temperature
WVTR	=	water vapor transmission rate

การหาพลังงานก่อกัมมันต์สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มพลาสติก และการประยุกต์ในการบรรจุอาหารที่ไวต่อความชื้น

Determination of Activation Energy for Water Vapor Permeability of Plastic Films and Applications in Moisture Sensitive Food Packaging

คำนำ

อาหารแห้งหรืออาหารที่ไวต่อความชื้นเป็นอาหารที่ผ่านการแปรรูปโดยการขจัดเอาน้ำในอาหารออกเพื่อลดระดับความชื้น หรือลดปริมาณน้ำที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโต อันเป็นการลดการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ เอ็นไซม์ และกลไกการเสื่อมเสียที่เกิดจากชีวเคมีของอาหารลง โดยที่อาหารนั้นยังคงคุณค่าทางโภชนาการ (Paine and Paine, 1992) จากการลดปริมาณน้ำของอาหารทำให้อาหารมีน้ำหนักน้อยลงและมีปริมาตรลดลง จึงส่งผลให้ราคาค่าขนส่งต่ำลง ไม่ต้องสิ้นเปลืองพลังงานและค่าใช้จ่ายในเก็บรักษาในตู้เย็น

อาหารที่ไวต่อความชื้นมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีคุณลักษณะเฉพาะ ซึ่งต้องการบรรจุภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติในการปกป้องที่แตกต่างกัน โดยส่วนใหญ่อาหารเหล่านี้จะเกิดการสูญเสียคุณภาพจากความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป ถึงแม้จะมีการเสื่อมเสียจากสาเหตุอื่นด้วยแต่ความเสียหายที่เกิดจากความชื้นจะแสดงผลให้เห็นได้เด่นชัดเป็นอันดับแรกๆ และบรรจุภัณฑ์ที่ใช้กับอาหารเหล่านี้จะใช้พลาสติกเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งพลาสติกเป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จึงมีพลาสติกหลากหลายชนิดให้เลือกใช้หลากหลายองค์ประกอบ และแต่ละชนิดก็มีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน ดังนั้นในการนำพลาสติกต่างชนิดเหล่านี้มาบรรจุอาหาร จะทำให้อายุการเก็บของอาหารก็จะแตกต่างกันด้วย การทำนายอายุการเก็บของอาหารเหล่านี้จะเกี่ยวข้องกับ ความชื้นที่ซึมผ่านบรรจุภัณฑ์เข้าไปจนมีผลทำให้อาหารที่บรรจุอยู่ภายในมีความชื้นเพิ่มขึ้นจนไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคในที่สุด ซึ่งการทดสอบหรือการวัดอัตราการซึมผ่านไอน้ำของบรรจุภัณฑ์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันเป็นค่าที่วัดตามสภาวะมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งเป็นค่าที่อุณหภูมิหนึ่งตามมาตรฐานเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงแล้วปริมาณการซึมผ่านของไอน้ำจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ทำให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำที่นำมาพิจารณาคาดเคลื่อนไปได้หากอุณหภูมิการเก็บรักษาอาหารนั้นๆ ไม่ตรงกับอุณหภูมิค่าการซึมผ่านไอน้ำที่ทดสอบมา ส่งผลให้การทำนายอายุการเก็บของอาหารนั้นผิดพลาดเช่นกัน

พลังงานก่อกัมมันต์ (activation energy, E_a) สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ (water vapor permeability) ของฟิล์มพลาสติก สามารถใช้ในการคำนวณหาค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มที่อุณหภูมิการเก็บจริงได้ ทำให้การทำนายอายุการเก็บที่ได้แม่นยำและใกล้เคียงกับความเป็นจริง (Hernandez *et al.*, 2000) ดังนั้นการหาค่า E_a สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มพลาสติกจึงเป็นทางออกสำคัญในการหาค่าการซึมผ่านไอน้ำที่อุณหภูมิใดๆ ที่สอดคล้องกับอุณหภูมิตามที่ทำการเก็บรักษาจริงๆ ของแต่ละชนิดอาหาร ทำให้ผู้ผลิตสินค้าและผู้ผลิตฟิล์มมีโอกาสเลือกที่จะกำหนดอายุการเก็บของสินค้าตามความต้องการเพื่อให้สอดคล้องกับการวางขายหรือการใช้งานได้และที่สำคัญยังสามารถควบคุมค่าใช้จ่ายได้อีก

วัตถุประสงค์

1. เพื่อสำรวจข้อมูลเบื้องต้นของฟิล์มพลาสติกสำหรับการบรรจุอาหารที่ไวต่อความชื้น
2. เพื่อศึกษาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มพลาสติก สำหรับการบรรจุอาหารที่ไวต่อความชื้น
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการทำนายอายุการเก็บของอาหารที่ไวต่อความชื้น โดยใช้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ กรณีศึกษา: ขนมหึง

การตรวจเอกสาร

อาหารที่ไวต่อความชื้นจัดเป็นอาหารแห่งที่เสื่อมคุณภาพเป็นอันดับแรกจากความชื้น โดยทั่วไปลักษณะธรรมชาติของอาหารในกลุ่มนี้จึงแห้งและมีความชื้นต่ำ ต้องการเนื้อสัมผัสที่กรอบในการรับประทาน อาหารที่ผลิตและจำหน่ายในปัจจุบันมีมากมายที่สามารถจัดอยู่ในกลุ่มอาหารที่ไวต่อความชื้นนี้

1. ประเภทอาหารที่ไวต่อความชื้น

อาหารแห่งสามารถแบ่งตามระดับหรือปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอาหารได้ดังนี้

กลุ่มที่ 1 เครื่องดื่มสำเร็จรูป (instant beverages) เช่น ชา และกาแฟ ซึ่งอาหารกลุ่มนี้จะมี ความชื้นต่ำมาก ประมาณร้อยละ 1-3

กลุ่มที่ 2 ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ทำจาก ผัก สมุนไพร เครื่องเทศ เนื้อสัตว์ ปลา นม ไข่ อาหาร เช้าธัญชาติ (breakfast cereals) ชุปผง บิสกิต และขนมขบเคี้ยวเป็นต้น อาหารเหล่านี้มีความชื้นอยู่ ประมาณร้อยละ 2-8

กลุ่มที่ 3 ผลไม้แห้งต่างๆ เช่น ธัญชาติ ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากธัญชาติ ถั่ว และแป้ง มีความชื้น ประมาณร้อยละ 6-30

กลุ่มที่ 4 เป็นพวกที่มีความชื้นสูง มีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่างร้อยละ 25- 40 ได้แก่ เยลลี่ ขนมที่ทำจากน้ำตาล (sugar confectionary) ผลไม้อบแห้ง ซาลามิ (salami) และปลาเค็ม เป็นต้น (Paine and Paine, 1992)

2. ความต้องการและบรรจุภัณฑ์ที่ใช้กับอาหารที่ไวต่อความชื้น

บรรจุภัณฑ์ที่ใช้สำหรับบรรจุอาหารที่ไวต่อความชื้นต้องมีคุณสมบัติที่สามารถกั้นไอน้ำ หรือความชื้นที่เข้าไปทำลายคุณภาพของอาหาร จนไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ปัจจุบันวัสดุ บรรจุภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติการปกป้องดังกล่าว ได้แก่ พลาสติก และ กระดาษ เป็นต้น แต่พลาสติก นิยมนำมาใช้มากกว่า และมีให้เลือกใช้หลากหลาย Paine and Paine (1992) ได้อธิบายถึงความ ต้องการบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารที่ไวต่อความชื้นตามปริมาณความชื้นไว้ดังนี้

กลุ่มที่ 1 มีปริมาณความชื้นอยู่น้อยมากประมาณร้อยละ 1-3 ดังนั้นอาหารจะดูดเอาไอน้ำในอากาศที่อยู่รอบตัวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เสื่อมเสียจากความชื้น และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันตามมาด้วย ดังนั้นในการบรรจุจะบรรจุในห้องปรับสภาวะให้มีความชื้นต่ำ และบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ต้องป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจนได้ดีมากๆ พลาสติกที่ใช้จะเป็นพลาสติกลามิเนตกับอะลูมิเนียมฟอยล์ เป็นต้น

กลุ่มที่ 2 พวกที่มีความชื้นร้อยละ 2-8 บรรจุภัณฑ์ที่ใช้สำหรับกลุ่มนี้จะมีข้อจำกัดไม่สูงเท่ากับกลุ่มที่ 1 อาจใช้เป็นอะลูมิเนียมฟอยล์และกระดาษลามิเนตกับพอลิเอทิลีน หรือใช้พลาสติกที่มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor transmission rate, WVTR) ต่ำ สำหรับอาหารประเภทเนื้อแห้งที่จะมีการเปลี่ยนแปลงกลิ่นจากไขมัน บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ต้องป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนได้ดีด้วยเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ผักแห้งต่างๆ ปกติจะบรรจุในถุงลามิเนต หรือถุงพอลิเอทิลีน ซึ่งเพียงพอในการกันความชื้นเข้าไปแต่กันออกซิเจนได้ไม่ดี ซึ่งอาหารพวกนี้มีความต้องการเพื่อไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากนี้สินค้าเหล่านี้จะมีซิลเวอร์ไดออกไซด์อยู่ประมาณ 500 และ 2000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังนั้นบรรจุภัณฑ์ที่ใช้จึงต้องป้องกันการซึมออกของสารนี้ด้วย

สมุนไพรและเครื่องเทศ ซึ่งเป็นสินค้าที่ต้องการเก็บกลิ่นไว้ บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ต้องกันไอน้ำและออกซิเจนได้ดี อาจบรรจุในถุงพลาสติกหลายชั้น เช่น พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต ที่มีความใสและกันการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจนได้ดีแล้วมาลามิเนตกับพอลิเอทิลีนเพื่อเก็บกลิ่น

ซูพแห้ง ต้องการการกันความชื้น ออกซิเจน และเก็บกลิ่น บรรจุภัณฑ์ที่ใช้อาจเป็นถุงลามิเนตกับอะลูมิเนียมฟอยล์

นมผง บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ต้องกันความชื้น ออกซิเจน และแบคทีเรีย โดยเฉพาะ *Streptococcus thermophilus* และนมผงยังมีการเกิดขบวนการเผาผลาญพลังงาน (metabolism) เช่น กรดแลกติก ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่สามารถทำลายได้ เมื่อมีความชื้นเข้ามาจุลินทรีย์ที่มีอยู่จะเจริญเติบโต อีกทั้งยังเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นอย่างช้าๆ อีกด้วย

อาหารเข้ารัฐชาติ ผลิตภัณฑ์นี้จะมีน้ำมันอยู่ และแตกหักเสียหายง่าย โดยทั่วไปจะใช้ถุงพลาสติกชนิดต่างๆ ที่มีการป้องกันการซึมผ่านของไขมันและไอน้ำได้ดีบรรจุ และใช้กล่องกระดาษเป็นบรรจุภัณฑ์ชั้นนอกเพื่อกันกระแทก

บิสกิต ต้องการบรรจุภัณฑ์ที่ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้อย่างดี เนื่องจากความกรอบของบิสกิตจะสูญเสียได้ง่ายเมื่อถูกความชื้น นอกจากนี้ยังมีไขมัน และกลิ่นที่เสื่อมเสียได้จากออกซิเจนด้วย พลาสติกที่ใช้อาจเป็นฟิล์มออบไอ โลหะ (metallized film) อะลูมิเนียมฟอล์ย แล้วบรรจุลงกล่องกระดาษป้องกันการเสียหายในระหว่างการขนส่ง

ขนมขบเคี้ยว หลายชนิดมีไขมัน และสูญเสียได้จากความชื้นและปฏิกิริยาออกซิเดชัน ความชื้นที่เปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อเนื้อสัมผัส และจะส่งผลกระทบต่อเอ็นไซม์และการเจริญของจุลินทรีย์ด้วย บรรจุภัณฑ์ต้องมีคุณสมบัติที่จะปกป้องความเสียหายเหล่านี้ ซึ่งอาจใช้ถุงลามิเนตที่มีอะลูมิเนียมฟอล์ยกับกระดาษ หรือฟิล์มออบไอ โลหะ เป็นต้น

กลุ่มที่ 3 เมล็ดธัญชาติ เช่น ข้าวสาลี ข้าว ข้าวบาเลย์ ข้าว ไร้ต และแป้งที่ทำจากธัญชาติดังกล่าว โดยมากจะบรรจุในปริมาณมาก และเก็บรักษาไว้เป็นเวลานานๆ และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้น สินค้าพวกนี้ก็จะเปลี่ยนแปลงความชื้นตามจนกว่าจะสมดุล ดังนั้นความชื้นจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญ บรรจุภัณฑ์ที่ใช้จึงต้องพิจารณาในจุดนี้ นอกจากนี้ต้องคำนึงถึงเชื้อรา แบคทีเรีย และแมลงที่จะเข้าไปทำลาย รวมทั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วย

Dried extruded products เช่น พาสต้า และโปรตีนจากพืช ซึ่งเสียหายจากความชื้นที่เปลี่ยนแปลงเช่นกัน บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ก็ต้องป้องกันความชื้นได้ดี เช่นอาจบรรจุในถุงพลาสติกและกล่องกระดาษอีกชั้น หรือหากสินค้าต้องการกันกลิ่นออกก็อาจใช้ถุงลามิเนต

ผลไม้แห้ง มักมีความชื้นประมาณร้อยละ 17-20 มีปริมาณน้ำตาลสูง บางทีมีการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เพื่อกันจุลินทรีย์เจริญ รักษาสี และกันการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่ได้เกิดจากเอ็นไซม์ แต่เป็นผลมาจากการลดกรดอะมิโน (amino acids) ดังนั้นบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ต้องกันการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำได้ดี

กลุ่มที่ 4 เป็นกลุ่มที่มีความชื้นสูง เช่น ลูกพรุน จะบรรจุในถุงพลาสติกที่ต้องรักษาความชื้นของอาหารไว้ โดยต้องป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนได้ดีเพื่อไม่ให้จุลินทรีย์เจริญ

3. ข้อมูลการเติบโตทางการตลาดของอาหารที่ไวต่อความชื้น

สำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะกลุ่มที่มีความชื้นต่ำ หรือกลุ่มที่ 1 และ 2 ซึ่งการเสื่อมคุณภาพของอาหารกลุ่มนี้เกิดจากความชื้นเป็นสาเหตุหลัก อาหารที่ไวต่อความชื้นเป็นสินค้าที่มีศักยภาพทางการตลาดสูง โดยในปี 2005 ได้มีการสำรวจข้อมูลการตลาดของขนมขบเคี้ยวในตลาดทั่วโลกพบว่ามียอดการเติบโตสูงถึงร้อยละ 4-8 คิดเป็นมูลค่าประมาณ 2.88 ล้านล้านบาท และสำหรับตลาดขนมขบเคี้ยวในประเทศไทย มีมูลค่าสูงถึง 14,000 ล้านบาท จึงนับเป็นตลาดใหญ่และมีการแข่งขันสูง และมีการปริมาณการใช้บรรจุภัณฑ์สูงด้วย (Dissayanun, 2006)

4. ความสำคัญของความชื้นและวอเตอร์แอกติวิตี

น้ำเป็นส่วนประกอบหลักของอาหารทุกชนิดโดยอยู่ในรูปอิสระ (free water) และเกาะเกี่ยวกับสารอื่น (bound water) น้ำอิสระเป็นน้ำที่แทรกอยู่ในช่องว่างของอาหารอาจมีการเกาะตัวกับองค์ประกอบของอาหารบ้างด้วยแรงที่ไม่แข็งแรงมากนัก มีคุณสมบัติเหมือนน้ำปกติ สามารถเป็นตัวทำละลายได้ มีส่วนเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี และจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการดำรงชีวิตได้ แต่น้ำส่วนนี้ก็มีคุณสมบัติไม่เหมือนกับน้ำอิสระในธรรมชาติอย่างแท้จริงจึงมักเรียกน้ำอิสระนี้ว่า แอคติฟ ซึ่งหมายถึงน้ำที่ยังคงรักษาคุณสมบัติของน้ำอิสระไว้ได้ ส่วนน้ำที่เกาะเกี่ยวกับสารอื่นเป็นน้ำที่เกาะติดกับอาหารด้วยพันธะที่แข็งแรงมาก อาจเป็นพันธะโควาเลนต์หรือพันธะอื่นๆ ไม่มีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายและไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีและจุลินทรีย์ไม่สามารถนำไปใช้ในการดำรงชีวิตได้

น้ำในอาหารแสดงในรูปของวอเตอร์แอกติวิตี (water activity, A_w) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญมากต่ออายุการเก็บของอาหาร โดยจะเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการควบคุมการเสี้ยวของอาหาร ตัวอย่าง เช่น แผลที่เรียกเก็บทุกชนิดไม่สามารถเติบโตได้ที่ A_w ต่ำกว่า 0.91 ในขณะที่ราส่วนมากหยุดการเจริญเติบโตเมื่อ A_w ต่ำกว่า 0.80 เราสามารถทำนายได้จากการวัดค่า A_w ว่าจุลินทรีย์ชนิดใดเป็นหรือไม่เป็นสาเหตุที่ทำให้อาหารเสีย ค่า A_w เป็นปัจจัยชี้ระดับปริมาณน้ำต่ำสุดที่มีอยู่เพื่อการ

เจริญของจุลินทรีย์ นอกจากนั้นค่า A_w ยังมีผลกระทบต่อการทำงานของเอนไซม์ และวิตามินในอาหารซึ่งเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงสี รส และกลิ่นของอาหาร อย่างชัดเจน

ค่า A_w มีผลกระทบต่ออาหารทั้งทางเคมี ชีวภาพ และกายภาพ ได้แก่

4.1 ผลของค่า A_w ต่อปฏิกิริยาเคมีในอาหาร

อาหารมักมีโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตที่มีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากเอนไซม์ การเกิดสีน้ำตาลนี้มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อค่า A_w สูงขึ้น โดยจะเกิดได้สูงที่สุดในช่วง A_w ตั้งแต่ 0.6 ถึง 0.7 แต่ในผลิตภัณฑ์บางชนิดเมื่อเพิ่มค่า A_w ก็จะขัดขวางการเกิดสีน้ำตาลจากปฏิกิริยามิลลาร์ด (millard reaction) ได้ ดังนั้นการตรวจวัด และควบคุมค่า A_w ในผลิตภัณฑ์จึงเป็นวิธีที่ดีในการควบคุมปัญหาการเกิดสีน้ำตาลได้

ค่า A_w มีผลกระทบต่อความคงตัวในด้านคุณสมบัติตามธรรมชาติของโปรตีนและเอนไซม์อย่างชัดเจน เอนไซม์และโปรตีนเกือบทุกชนิดต้องรักษาสภาพตามธรรมชาติไว้เพื่อให้สามารถทำหน้าที่ได้ตามปกติ ดังนั้นการรักษาระดับของ A_w เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงสภาพของสารเหล่านี้จึงมีความสำคัญต่อคุณภาพของอาหารอย่างมาก ปฏิกิริยาจากเอนไซม์ส่วนมากจะช้าลงที่ระดับ A_w เท่ากับ 0.8 อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาเหล่านี้บางปฏิกิริยาก็สามารถเกิดได้แม้ที่ระดับค่า A_w ต่ำมาก การเสื่อมเสียประเภทนี้จะมีผลให้เกิดกลิ่นและรสที่รุนแรงจนผู้บริโภคไม่ยอมรับได้ โดยทั่วไปการเสื่อมเสียเนื่องจากปฏิกิริยาของเอนไซม์มักไม่เกิดกับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการใช้อุณหภูมิในการผลิต

4.2 ผลของค่า A_w ต่อการเสื่อมเสียของอาหาร

เนื่องจากยีสต์ รา และแบคทีเรียจำเป็นต้องใช้น้ำอิสระในการเจริญเติบโต การผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีค่า A_w ต่ำกว่า 0.6 จะช่วยควบคุมการเสียเนื่องจากจุลินทรีย์เหล่านี้ได้ วิธีที่ง่ายที่สุดในการลดค่า A_w ในอาหารคือการกำจัดน้ำในอาหาร เช่น การทำให้แห้ง การอบ หรือการทำให้แห้งโดยกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูง

4.3 ผลของความชื้นและค่า A_w ต่อลักษณะเนื้อสัมผัส

โดยเฉพาะอาหารที่ต้องการลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็งกรอบ ความชื้นมีผลกระทบโดยตรงกับความกรอบที่ต้องการของอาหาร ตัวอย่างอาหาร เช่น อาหารเข้ารัชชาติ ซึ่งมีส่วนผสมของแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก ความกรอบของอาหารเป็นตัวแปรที่จะบอกถึงคุณภาพของอาหาร ซึ่งมีผลมาจากความชื้น จากผลการวิจัยระบุว่ารัชชาติส่วนใหญ่จะสูญเสียความกรอบไปเมื่อมีค่า A_w เท่ากับ 0.45 เป็นต้นไป (Xiong, 2002)

ดังนั้นการควบคุมปริมาณน้ำหรือการเอาน้ำออกจากอาหาร จะทำให้อาหารลดความเสี่ยงต่อการเสื่อมเสียทั้งจากจุลินทรีย์และทางเคมี น้ำเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่เคลื่อนตัวเร็วมากสำหรับอาหารที่มีส่วนผสมที่ไวความชื้น (mobility enhancer) น้ำมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะเกิดการเคลื่อนที่ได้ดี และจะไปเพิ่มช่องว่าง (free volume) ในอาหารมากขึ้นซึ่งเป็นช่องว่างของตัวเนื้ออาหารและพลาสติกไซเซอร์ที่ไม่ได้ถูกแทนที่ด้วยโมเลกุล และช่องว่างนี้จะลดลงเมื่ออาหารมีความเหนียว (Slade and Levine, 1991)

ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและค่า A_w เป็นเรื่องที่ซับซ้อน ค่า A_w มักเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นแต่เป็นการเพิ่มแบบไม่เป็นเส้นตรง ความสัมพันธ์ระหว่างค่า A_w กับความชื้นที่อุณหภูมิที่กำหนดเรียกว่า การดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ (moisture sorption isotherm) โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์อาหารจะดูดความชื้นในอากาศที่อยู่โดยรอบ การดูดซึมน้ำเกิดที่ผิวของอาหาร ซึ่งอาจเกิดเพียงหนึ่งหรือหลายชั้นผิวของอาหาร กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า A_w กับความชื้นดังกล่าวนี้สร้างได้จากการทำการทดลองเท่านั้น การดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่สำหรับอาหารแทบทุกชนิดจะมีรูปร่างแบบซิกมอยด์ (sigmoidal) แต่อาหารที่มีปริมาณน้ำตาลมากหรือมีโมเลกุลที่ละลายได้น้อย จะได้กราฟรูปคล้ายตัว J กราฟการทดลองเพื่อศึกษาการดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่เริ่มต้นจากผลิตภัณฑ์ที่แห้งแล้วเพิ่มความชื้นมากขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งเข้าสู่สมดุล

การศึกษาการดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ของอาหารเป็นสิ่งสำคัญในการรักษาคุณภาพและการยอมรับในระหว่างการเก็บรักษา รวมทั้งเพื่อประโยชน์ด้านต่างๆ ได้แก่ การออกแบบกระบวนการผลิต การประเมินปัญหาที่เกิดกับบรรจุภัณฑ์ การศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชื้นซึ่งเกิดระหว่างการเก็บ การทำนายอายุการเก็บและประเมินส่วนผสมของอาหาร การออกแบบอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่เหมาะสม (Jamali *et al.*, 2006; Ngoddy and Bakker-

Arkema, 1975; Ertugay and Certel, 2000; Kumar, 2000; Aviara and Ajibola, 2002; Viswanathan *et al.*, 2003; Akanbi *et al.*, 2006; Samapundo *et al.*, 2007)

การวัดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ใช้ศึกษาลักษณะโครงสร้างของอาหาร เช่น พื้นที่ว
ขนาดช่องว่าง และความเป็นผลึก (crystallinity) ข้อมูลนี้สามารถใช้เลือกสภาวะการเก็บและ
บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะสามารถช่วยรักษาคุณภาพ เช่น กลิ่นรส สี ลักษณะเนื้อ
สัมผัส คุณค่าทางโภชนาการ และลักษณะทางชีววิทยาอื่นๆ (Perez-Alonso *et al.*, 2006)

4.4 วิธีการวัดการวัดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่และการเลือกใช้

Gal (1987) อธิบายวิธีการวัดค่าการวัดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ของอาหารทำได้
3 วิธี ดังนี้

4.4.1 กราวิเมตริก (gravimetric) เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักทั้ง
แบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องในระบบไดนามิกหรือสแตติก (อากาศเคลื่อนที่โดยรอบหรือแบบอยู่
นิ่ง) ซึ่งการวัดแบบต่อเนื่องจะใช้เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์หรือ ควอทซ์สปริง ส่วนในระบบไม่
ต่อเนื่องอาหารถูกวางในบรรยากาศที่มีสารละลายเกลือหรือกรดซัลฟูริก เป็นตัวปรับสภาวะเพื่อให้
อาหารเข้าสู่สมดุล

4.4.2 มาโนเมตริก (manometric) เป็นการวัดแรงดันไอน้ำของน้ำที่อยู่รอบๆ ตัว
อาหาร โดยระบบจะรักษาระดับของของเหลวในมาโนมิเตอร์ ตัวอย่างอาหารจะสูญเสียน้ำเพื่อเข้าสู่
สมดุล ซึ่งจะไปแสดงเป็นระดับความแตกต่างของของเหลวที่เครื่องมาโนมิเตอร์

4.4.3 ไฮโกรเมตริก (hygrometric) จะวัดความชื้นสมดุลของอากาศที่สัมผัสอาหาร
โดยใช้เครื่องไฮโกรมิเตอร์

การเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับ เวลาหรือความเร็ว ค่าใช้จ่าย ความยากง่าย และชนิด
ของอาหารที่จะศึกษา วิธีกราวิเมตริกเป็นวิธีที่นิยมมากและใช้กันอย่างกว้างขวางในการหาการวัด
ความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ วิธีนี้จะวางตัวอย่างอาหารที่ทราบน้ำหนักเริ่มต้นประมาณ 2-3 กรัม ใน
ภาชนะปิดสนิท ทิ้งไว้จนกระทั่งตัวอย่างอาหารมีความชื้นเข้าสู่สมดุลกับสิ่งแวดล้อมภายในภาชนะ

นั้นที่บรรจุงูสารละลายเกลืออ้อมตัวเพื่อปรับความชื้น นับเป็นวิธีที่ง่ายไม่ต้องใช้ความชำนาญก็ทำได้ ค่าใช้จ่ายไม่แพง สามารถทำได้หลายตัวอย่างในครั้งเดียว แต่ใช้เวลานานในการเข้าสู่สมดุล ปกติใช้เวลาประมาณ 3-6 สัปดาห์ หรือมากกว่าขึ้นกับผลิตภัณฑ์ (Rahman and Al-Belushi, 2006)

วิธีการวิเมตริกแบบสแตติก (static gravimetric technique) ถูกพัฒนาขึ้นและเป็นวิธีมาตรฐานในกลุ่มของ European COST 90 (Wolf *et al.*, 1985) ซึ่งมีหลายงานวิจัยที่ใช้วิธีนี้ (Wang and Brennan, 1991; Kaymak-Ertekin and Sultanoglu, 2001; McMinn and Magee, 1999; McMinn *et al.*, 2007; Simal *et al.*, 2007; Goula *et al.*, 2008) ส่วนวิธีการอื่นนิยมใช้น้อย

รูปแบบเชิงประจักษ์ (empirical model) ที่ใช้อธิบายเกี่ยวกับการดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ มีหลายรูปแบบ แต่ไม่มีรูปแบบใดที่ให้ผลถูกต้องแม่นยำกับทุกๆระดับของค่า A_w (Iglesias and Chirife, 1976) และ Labuza (1975) ระบุว่าไม่มีรูปแบบใดที่สามารถใช้กับค่า A_w ที่มีช่วงกว้างได้เพราะน้ำมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างแบบเมทริกซ์ (matrix) ในอาหาร และความแตกต่างทางกลศาสตร์ของอาหารเมื่ออยู่ในสภาวะ A_w ที่ต่างกัน Al-Muhtaseb *et al.* (2002) ได้ อธิบายการใช้งานของรูปแบบเชิงประจักษ์ได้แก่ Brunauer-Emmett-Teller (BET) ใช้อธิบายการดูดความชื้นแบบมัลติเลเยอร์ (multilayer sorption isotherms) และสามารถให้ค่าของน้ำของอาหารที่ระดับมอนอเลเยอร์ (monolayer) ได้ Halsey เป็นรูปแบบที่ใช้อธิบายการดูดความชื้นแบบมัลติเลเยอร์ ที่อยู่ห่างจากผิวอาหาร Henderson ใช้หาปริมาณน้ำที่ดูดซึมเข้าไป Oswin ถูกพัฒนาจากการทดลองซึ่งใช้สำหรับอาหารที่มีลักษณะการดูดความชื้นแบบซิกโมดอล และ Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) เป็นรูปแบบที่เพิ่มเติมจาก BET โดย GAB จะใช้ได้ดีที่ระดับ A_w ประมาณ 0.9 ซึ่งสูงกว่า BET ที่ใช้ได้ดีกับ A_w ตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 นอกจากนี้ Van den Berg (1981) ได้รวบรวมและจัดกลุ่มรูปแบบเชิงประจักษ์ 77 รูปแบบ รูปแบบเหล่านั้นสามารถจัดได้หลายกลุ่ม เช่น รูปแบบ BET อธิบายลักษณะการดูดความชื้นที่ระดับมอนอเลเยอร์ รูปแบบ GAB ใช้กับการดูดความชื้นระดับมัลติเลเยอร์ และรูปแบบที่ใช้กับการดูดความชื้นที่ได้จากการทดลองและกึ่งการทดลอง เช่น Peleg Oswin และ Ferro-Fontan McLaughlin and Magee (1998) กล่าวถึงรูปแบบที่นักวิจัยนิยมใช้กับอาหาร แม้ว่า BET และ GAB จะคล้ายกัน แต่ที่ผ่านมา GAB ถูกใช้มากกว่า BET อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยหลายงานวิจัยที่ใช้ทั้งสองรูปแบบ (Ayranci *et al.*, 1990; Iguedjal *et al.*, 2008; Goula *et al.*, 2008; Cervenka *et al.*, 2008; Garcia-Perez *et al.*, 2007; Simal *et al.*, 2007)

5. การศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความชื้นส่วนมากจะมีหลากหลายองค์ประกอบ แต่สินค้าที่ผลิตเพื่อจำหน่ายส่วนใหญ่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ สำหรับกรณีศึกษาที่เลือกมาใช้ในการศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ขนมฝงเป็นสินค้าตัวอย่าง ขนมฝงเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความกรอบขมเคี้ยว ด้วยลักษณะ โครงสร้างและส่วนประกอบที่ใช้ผลิตสามารถดูดซึมความชื้นได้ง่ายและทำให้เสียคุณภาพที่สำคัญนี้ไป

เนื่องจากขนมฝงใช้แป้งมันเป็นองค์ประกอบหลัก (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2548) ซึ่งแป้งมันเป็นผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลังที่เป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่ไม่เพียงแต่ผลิตได้มากในประเทศไทย แต่เป็นพืชที่มีการปลูกมากในหลายๆ ประเทศ ซึ่งส่งผลให้ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะสามารถประยุกต์ได้หลากหลายยิ่งขึ้น

แป้งมันถูกใช้เป็นส่วนผสมหลักในผลิตภัณฑ์ขนมกรุบกรอบหลายชนิด นอกจากนี้ในเอเชียและลาตินอเมริกามีความสนใจที่จะใช้เป็นส่วนประกอบหนึ่งในแป้งสาลี (Hudson and Ogunsua, 1976; Holt *et al.*, 1992; Pachico, 1997; Afolabi *et al.*, 2001; Lopez *et al.*, 2004; Mohamed *et al.*, 2006) สำหรับผู้บริโภคความกรอบของผลิตภัณฑ์ไม่ได้เป็นตัวบ่งชี้เฉพาะคุณภาพเพียงอย่างเดียวแต่บ่งบอกถึงความสดใหม่ของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ด้วย (Szczesniak and Kleyn, 1963; Szczesniak and Kleyn, 1971; Rohm, 1990) สำหรับความรู้เกี่ยวกับการรักษาความกรอบสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ทำจากแป้งมันสำปะหลังยังมีการวิจัยกันน้อย (Van den Berg *et al.*, 1975; Chang *et al.*, 2000; Chang *et al.*, 2006) โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมหลายอย่างมาประกอบกัน

ในการศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสหรือความกรอบของผลิตภัณฑ์เป็นที่เข้าใจว่าความกรอบเกิดจากองค์ประกอบของเสียงที่เกิดขึ้นเมื่อผลิตภัณฑ์แตกเมื่อถูกกัดอย่างสมบูรณ์ (Duizer *et al.*, 1998) เครื่องมือต่างๆและการยอมรับของผู้บริโภคได้ถูกใช้เพื่อศึกษาคุณสมบัตินี้ ซึ่งการนำไปใช้ในหลายๆงานวิจัย (Roudaut *et al.*, 2002) แต่ไม่วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างผลที่วิเคราะห์จากเครื่องมือและผลที่ได้จากการชิมของผู้บริโภค นั่นคือข้อเท็จจริงที่มีหลายคำจำกัดความที่ใช้กำหนดความหมายของคำว่า “ กรอบ ” (Roudaut *et al.*, 2002) และมีเพียง 2-3 งานวิจัยที่ศึกษาโดยใช้ข้อมูลการทดสอบโดยผู้บริโภคนั้นๆ (Mohamed *et al.*, 1993; Hecke *et al.*, 1995; Ferriola and Stone, 1998; Roudaut *et al.*, 2002; Thakur and Saxena, 2000)

ความกรอบของผลิตภัณฑ์ถูกควบคุมด้วยองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์และโครงสร้าง (Roudaut *et al.*, 2002) สำหรับสภาวะการผลิตนั้นีผลต่อความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ (Roudaut *et al.*, 2002) ระหว่างการเก็บรักษา น้ำจะถูกดูดซึมจากบรรยากาศเข้าสู่ตัวผลิตภัณฑ์ หรือโดยการแพร่จากองค์ประกอบใกล้เคียง ซึ่งล้วนมีผลต่อการสูญเสียความกรอบ (Nicholls *et al.*, 1995)

องค์ประกอบต่างๆที่ใช้ในการผลิตต้องแห้ง เพราะน้ำเป็นตัวพลาสติกไซเซอร์ที่ดีเยี่ยม (Van den berg *et al.*, 1975; Fontanet *et al.*, 1997) ที่ทำให้ความกรอบและอุณหภูมิคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ของผลิตภัณฑ์ลดลง องค์ประกอบที่มีโมเลกุลใหญ่และมีกิ่งก้านมาก เช่น สตาร์ช เส้นใย และโปรตีนจะมี T_g สูง ขณะที่องค์ประกอบที่มีโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาล เกลือ และเกลือแร่จะมีค่าต่ำ (Slade and Levine, 1995) ผลกระทบของทุกๆองค์ประกอบที่เป็นส่วนผสมที่มีต่อความกรอบและ T_g นั้นซับซ้อน โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีหลายองค์ประกอบเป็นส่วนผสม

6. พลาสติกที่ใช้บรรจุอาหาร

พลาสติกที่ใช้มากในอุตสาหกรรมอาหารส่วนใหญ่เป็นพวกเทอร์โมพลาสติก (thermoplastics) ได้แก่

6.1 พอลิเอทิลีน (polyethylene, PE)

PE เป็นพลาสติกในตระกูลพอลิโอเลฟินส์ (polyolefins) ผลิตจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนมอนอเมอร์ ที่สามารถควบคุมให้มีโครงสร้างแบบกิ่ง (branched chain) หรือเชิงเส้น (linear chain) ได้ และสามารถผลิตได้ทั้งโฮโมพอลิเมอร์ และโคพอลิเมอร์ สูตรโครงสร้างพื้นฐานของ PE เป็นการจัดเรียงตัวของ $(-CH_2)_n$ PE ที่มีโครงสร้างเชิงเส้นจะมีโครงสร้างเป็นผลึกมากกว่า PE ที่มีโครงสร้างแบบกิ่ง โครงสร้างผลึกทำให้ค่าความหนาแน่นสูงขึ้น จุดหลอมเหลวสูงขึ้น ความแข็งเชิงกลส่วนใหญ่สูงขึ้น และป้องกันการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำดีขึ้น PE มีความเฉื่อยต่อสารเคมีค่อนข้างสูง มีความเป็นขั้วต่ำ (non polar) ทำให้ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี แต่ยอมให้ออกซิเจนซึมผ่านได้ง่าย ป้องกันการซึมผ่านของไขมันได้ดี และการพิมพ์บน PE ทำได้ยาก นอกจากจะมีการปรับสภาพผิวก่อน ปิดผนึกด้วยความร้อนได้ง่าย มี T_g ต่ำ (ประมาณ -120 องศาเซลเซียส) ทำให้มีความยืดหยุ่นสูงที่อุณหภูมิห้อง และทนต่ออุณหภูมิต่างๆ ได้ดี फिल्म PE ที่ใช้งานในอุตสาหกรรมอาหาร ได้แก่

6.1.1 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) มีความเป็นผลึกระหว่างร้อยละ 50-70 คุณสมบัติทั่วไป ได้แก่ มีความเหนียว โปร่งแสง ทนสารเคมีได้ดี ทนต่อแรงดึงขาดได้ดี ป้องกันการซึมผ่านของน้ำและไอน้ำได้ดี แต่ป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนไม่ดี ด้านทานการซึมผ่านของไขมันไม่ดี ไม่สามารถทนทานต่ออุณหภูมิสูงได้เนื่องจากจุดอ่อนตัว (softening point) ต่ำ (80-130 องศาเซลเซียส) แต่ทนอุณหภูมิต่ำได้ดี ปิดผนึกด้วยความร้อนได้ง่าย โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 106-112 องศาเซลเซียส (Soroka, 2002)

6.1.2 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) มีโครงสร้างโมเลกุลเชิงเส้น ทำให้ HDPE เกิดผลึกได้ง่าย (ความเป็นผลึกร้อยละ 65-90) มีสีขาวขุ่นจนถึงทึบแสง มีความหนาแน่นสูง ทำให้มีความแข็งแรงสูง ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซ ไอน้ำ กลิ่น ไขมันดีกว่า LDPE สามารถทนทานการใช้งานที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 100-121 องศาเซลเซียส) จึงใช้บรรจุอาหารร้อน ฟิล์ม HDPE สามารถขึ้นรูปได้ทั้งแบบเป่า และแบบหล่อ นิยมใช้ห่ออาหาร ถุงร้อนที่ใช้ใส่อาหารทั่วไป ถุงบรรจุอาหารเพื่อการขนส่ง และใช้เป็นโครงสร้างของถุงทนความร้อนสูง (retortable pouches) ฟิล์ม HDPE ไม่นิยมใช้เป็นชั้นปิดผนึกด้วยความร้อน เนื่องจากมีจุดอ่อนตัวสูง

6.1.3 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (linear low density polyethylene, LLDPE) เป็นโคพอลิเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนกับ โคมอนอเมอร์ประเภทอัลคีน ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง LLDPE มีโครงสร้างเป็นเชิงเส้น มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า LDPE ประมาณ 10 – 15 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับ LDPE LLDPE จะมีคุณสมบัติเหนือกว่า คือ ทนสารเคมี ทนแรงดึง แรงทิ่มทะลุ ทนการฉีกขาด ยืดตัวดี และปิดผนึกด้วยความร้อนได้ดีกว่า LDPE แต่ความใสและความมันวาวจะด้อยกว่า (Robertson, 2006)

6.2 พอลิพรอพิลีน (polypropylene, PP)

PP เป็นพอลิโอเลฟินส์เช่นเดียวกับ PE มีใช้มากในอุตสาหกรรมการบรรจุ ผลิตจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์พอลิพรอพิลีน มีทั้งโฮโมพอลิเมอร์และโคพอลิเมอร์ สูตรโครงสร้างโมเลกุลของโฮโมพอลิเมอร์เป็นการจัดเรียงตัวของ $(-CH_2-CH(CH_3)-)$ ในโครงสร้าง 3 มิติของโฮโมเลกุล PP ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการบรรจุส่วนใหญ่มีการจัดเรียงตัวแบบไอโซแทคติก (isotactic) ที่ $-CH_3$ เรียงตัวอย่างมีระเบียบ ตำแหน่งของ $-CH_3$ เกาะที่กับอะตอมคาร์บอนจะอยู่ด้านเดียวกันของ

โซโม่เลกุล ทำให้เกิดผลึกได้ง่าย ทนสารเคมี และความร้อนได้ดี แต่มีข้อด้อยเรื่องความใส PP อีกชนิดหนึ่งที่ใช้กันในการบรรจุจะมีจัดเรียงตัวแบบซินดิโอแทคติก (syndiotactic) ที่-CH₃ มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ แต่ตำแหน่งของ-CH₃ ที่เกาะกับอะตอมคาร์บอนจะอยู่สลับด้านกันของโซโม่เลกุล จะเกิดผลึกได้บ้าง และมีคุณสมบัติทางการบรรจุดีกว่าแบบไอโซแทคติก (Robertson, 2006)

PP มีความหนาแน่นต่ำกว่า และ มีจุดอ่อนตัว (140-150 องศาเซลเซียส) สูงกว่า PE มีความทนต่อการขีดสีได้ดี มีความคงตัวที่อุณหภูมิสูง ใส แฉวาว

โดยทั่วไปฟิล์ม PP ที่ไม่ได้มีการจัดระเบียบโมเลกุล (oriented film) จะหมายถึงฟิล์มชนิดหล่อ (cast film) หรือ CPP ด้วยคุณสมบัติที่ทนความร้อนสูงจึงมักใช้เป็นชั้นสำหรับการปิดผนึกสำหรับภาชนะที่ต้องใช้ความร้อนในการใช้งาน เช่น ถุงทนความร้อนสูง บรรจุภัณฑ์ที่ใช้กับไมโครเวฟ เป็นต้น แต่ CPP มีข้อจำกัดในการใช้บรรจุอาหารแช่แข็ง เพราะจะแข็งเปราะ (Robertson, 2006)

ฟิล์ม OPP เป็นชนิดที่มีการจัดระเบียบโมเลกุล (oriented polypropylene, OPP) ซึ่งจะเพิ่มคุณสมบัติด้านความใส ความแข็งแรง และการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซ ไอน้ำ และไขมัน อีกทั้งเหมาะสำหรับการพิมพ์อีกด้วย จึงนิยมใช้เป็นวัสดุหลักในการทำเป็นซองบรรจุอาหารแห้ง ขนมอบบี้ และใช้เป็นฟิล์มหดรูปได้ด้วย การผลิตฟิล์ม PP ที่ต้องการความใสมาก ๆ และแข็งแรงขึ้น อาจใช้วิธีการเติมสารก่อผลึก (nucleating agent) ในระหว่างการผลิต สารนี้จะช่วยให้ผลึกมีขนาดเล็ก ทำให้ฟิล์มใสและแข็งแรงขึ้น หรืออีกวิธีหนึ่งอาจทำฟิล์มให้เย็นอย่างรวดเร็ว จะทำให้ผลึกมีขนาดเล็ก ฟิล์มที่ได้จึงมีความใสสูงมาก แต่ปิดผนึกด้วยความร้อนได้ยาก จึงนิยมลามาเนตกับ LDPE หรือ LLDPE (งามทิพย์, 2550)

ฟิล์ม PP มีการนำมาผลิตเป็น ฟิล์มพอลิพรอพิลีนชนิดจัดเรียงโมเลกุลอบไอโลหะ (metallized oriented polypropylene, MOPP) เพื่อเพิ่มการป้องกันการซึมผ่านไอน้ำและก๊าซ ป้องกันแสง และเพิ่มความสวยงาม นิยมใช้มากในการบรรจุอาหารแห้ง ขนมอบบี้ ขนมอบบี้กรอบ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการนำ CPP มาผลิตเป็นฟิล์มอบไอโลหะด้วย (metallized cast polyethylene, MCPP)

โคพอลิเมอร์ PP ที่นิยมใช้ในทางการบรรจุผลิตจากปฏิกิริยาระหว่างมอนอเมอร์พรอพิลีนกับเอทิลีน โดยเอทิลีนจะเรียงตัวแบบสุ่มในโซโม่เลกุลหลักซึ่งมีการเรียงตัวเหมือนไอโซแทกติก โคพอลิเมอร์แบบสุ่มนี้จะเกิดผลึกน้อยลง จึงมีความใสสูงขึ้น มีจุดหลอมเหลวต่ำลง มีความหนาแน่นต่ำลง มีความเหนียว ชืดหยุ่น และนุ่มดีขึ้น ค่าความต้านทานแรงกระแทกสูงขึ้นแม้ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ พลาสติกโคพอลิเมอร์ PP สามารถปิดผนึกด้วยความร้อนได้ง่าย จึงนิยมใช้เป็นถุงบรรจุอาหารที่ต้องการทั้งความใสและปิดผนึกด้วยความร้อน เช่น ผลิตภัณฑ์ขนมอบ ขนมขบเคี้ยว เป็นต้น หรือใช้เป็นชั้นปิดผนึกของวัสดุหลายชั้นหากนำ โคพอลิเมอร์ PP มาจัดระเบียบโมเลกุล จะมีความใสและความแข็งแรงสูงขึ้น นิยมใช้เป็นฟิล์มหดรัดสินค้า เช่น กล่องขนมหรือกล่องช็อกโกแลต กล่องแผ่น CD เป็นต้น

6.3 พอลิสไตรีน (polystyrene, PS)

PS โดยทั่วไปจะจัดเรียงตัวแบบอะแทกติก (atactic) และมีลักษณะเป็นอสัณฐาน (amorphous) อย่างสมบูรณ์เนื่องจากมีหมู่เบนซีนใน โซโม่เลกุล ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดพิเศษ ประกอบกับเทคนิคพอลิเมอไรเซชัน เพื่อให้เกิดการจัดเรียงตัวแบบไอโซแทกติก อย่างไรก็ตามจะ PS ที่มีการจัดเรียงตัวแบบไอโซแทกติกจะกลับไปเป็นแบบอะแทกติกอีกในขั้นตอนการหลอม

PS มีการจัดเรียงตัวแบบอะแทกติก จึงมีความใสมาก ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซ และไอน้ำได้น้อย และทนทานการซึมผ่านของไขมันได้น้อย นอกจากนี้หมู่เบนซีน ยังทำให้ PS มีความแข็งตึงสูง กรอบ มี T_g สูง (74-105 องศาเซลเซียส) จุดอ่อนตัว (90-95 องศาเซลเซียส)

PS ที่ใช้ในอุตสาหกรรมมี 4 ชนิด คือ

6.3.1 GPPS (general purpose polystyrene) ผลิตจาก PS ที่เป็นโฮโมพอลิเมอร์ มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน มีความใสสูงและมันวาว แต่กรอบเปราะ นิยมใช้ในรูปของฟิล์ม ภาชนะคงรูป และกึ่งคงรูป เนื่องจากขึ้นรูปง่าย รูปแบบภาชนะที่พบบ่อย ได้แก่ ถ้วยหรือแก้วใสประเภทใช้ครั้งเดียว

6.3.2 OPS เป็นฟิล์มชนิดจัดระเบียบโมเลกุล ทำให้มีความใสและแข็งแรงกว่าฟิล์ม PS ธรรมดา ใช้ห่อผักและผลไม้สด และดอกไม้สด ฟิล์มปิดช่องหน้าต่างกล่องอาหาร เป็นต้น

6.3.3 HIPS (high impact polystyrene) ที่ผลิตโดยการเติมโมเลกุลของยาง ทำให้มีความทนทานต่อแรงกระแทกสูงขึ้น

6.3.4 ใช้ในรูปของโฟม PS

6.4 พอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride, PVC)

PVC ผลิตได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ นิยมใช้ในการบรรจุอาหารทั้งรูปแบบภาชนะคงรูปและภาชนะอ่อนตัว คุณสมบัติเด่นของ PVC คือ ความใส และสามารถป้องกันการซึมผ่านของไขมันได้ดีมาก

PVC จัดเป็นพลาสติกที่มีความเป็นผลึกต่ำ เนื่องจากการจัดเรียงตัวของมอนอเมอร์ส่วนใหญ่เป็นแบบอะแทคติก มีส่วนที่เรียงตัวแบบไอโซแทคติกบ้างเล็กน้อย การมีพันธะ C-Cl ซึ่งมีขั้วทำให้สามารถเกิดแรงดึงดูดภายในโมเลกุลสูง ทำให้ PVC มีความหนาแน่นสูง มี T_g สูง (75-105 องศาเซลเซียส) จึงมีลักษณะแข็งที่อุณหภูมิห้อง มีคุณสมบัติป้องกันการซึมผ่านของไขมันได้ดีมาก ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดี แต่ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ปานกลาง (งามทิพย์, 2550)

6.5 พอลิไวนิลิดีนคลอไรด์ (polyvinylidene chloride, PVDC)

โพลิเมอร์ PVDC ผลิตได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์ไวนิลิดีนคลอไรด์ มีโครงสร้างโมเลกุลใกล้เคียงกับ PVC มาก แต่การมี CL 2 อะตอมบนคาร์บอนเดียวกัน ทำให้ PVDC มีคุณสมบัติต่างจาก PVC

โมเลกุลของ PVDC มีสมมาตรสูง ทำให้เกิดผลึกได้ง่าย จึงมีความหนาแน่นสูง มีจุดหลอมเหลวสูง (388-401 องศาเซลเซียส) และสูงกว่าจุดสลายตัว (205 องศาเซลเซียส) ทำให้ไม่สามารถแปรรูปด้วยความร้อนได้ จึงต้องผลิตเป็นโคพอลิเมอร์กับมอนอเมอร์ พวกไวนิลคลอไรด์ อะคริเลต เมทิลอะคริเลต และไวนิลไนไตรด์ ทำให้จุดหลอมเหลวลดลงเหลือ 140-175 องศาเซลเซียส ดังนั้น PVDC ที่ใช้ทางการบรรจุจึงเป็นโคพอลิเมอร์ทั้งสิ้น และต้องเติมสารเพิ่มความ

เสถียรและพลาสติกไซเซออร์ประมาณร้อยละ 2-10 เช่น di-butyl sebacate di-isobutyl adipate เป็นต้น เนื่องจาก PVDC สลายตัวได้ง่าย และให้ HCl เหมือนกับ PVC

บริษัท Dow Chemical ผู้ผลิตโคพอลิเมอร์ PVDC เพื่อการค้าเป็นแห่งแรก โดยใช้ชื่อทางการค้าว่า “Saran[®]” และได้กลายเป็นชื่อที่ใช้เรียก PVDC โดยทั่วไป

คุณสมบัติของโคพอลิเมอร์ PVDC มีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซ ไออน้ำ กลิ่น ไขมัน และแอลกอฮอล์ได้ดีมาก ทนความร้อนขณะบรรจุและขณะนำเชื้อด้วยความร้อน PVDC สามารถปิดผนึกด้วยความร้อนได้ (Robertson, 2006) PVDC จะต่างจาก EVOH ที่ PVDC จะยังคงรักษาคุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านได้ดีมากแม้จะอยู่ในสภาพที่มีความชื้นสูง (งามทิพย์, 2550)

PVDC นิยมใช้กับวัสดุหลายชั้นด้วยการเคลือบหรือการลามิเนตกับวัสดุบรรจุที่ต้องการเพิ่มสมบัติการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซ ไออน้ำ และกลิ่น พลาสติกที่ผ่านการเคลือบด้วย PVDC จะเติมอักษร K หน้าชื่อพลาสติกนั้น เช่น K-OPP K-OPET เป็นต้น (งามทิพย์, 2550)

6.6 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate, PET)

PET เป็นพลาสติกประเภทพอลิเอสเทอร์ชนิดหนึ่ง ผลิตจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (condensation polymerization) ระหว่างกรดเทอเรฟทาลิก (terephthalic acid) หรือไดเมทิล เทอเรฟทาเลต (dimethyl terephthalate) กับเอทิลีน ไกลคอล (ethylene glycol) PET เป็นฟิล์มอีกชนิดที่ใช้มากในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดี ป้องกันการซึมผ่านของไออน้ำได้ปานกลาง ต้านทานการซึมผ่านของไขมันได้ดี มีความแข็งแรงสูง ทนทานต่ออุณหภูมิสูงได้ดี PET ที่ใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์นี้

6.6.1 PET ที่มีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (amorphous polyethylene terephthalate, APET) มีโมเลกุลขนาดใหญ่ทำให้โครงสร้างเป็นอสัณฐาน มีผลึกน้อยและมีขนาดเล็ก ทำให้มีความใสมาก นิยมนำมาใช้บรรจุเครื่องดื่มมากที่สุด สำหรับฟิล์ม APET ที่ใช้ในการบรรจุมักผ่านการจัดระเบียบโมเลกุลทั้ง 2 ทิศทาง (biaxial orientation) เพื่อความใส และเพิ่มคุณสมบัติป้องกันการซึมผ่านของก๊าซ และหากต้องการให้มีคุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซและกลิ่นให้ดียิ่งขึ้น

จะเคลือบด้วย PVDC หรือ ออบไอโลหะ หรือ ไอซิลิกาออกไซด์ (SiO_x coating) ปกติ PET จะลามิเนต (laminated) หรือการเคลือบแบบอัดรีด (extrusion coated) กับ LDPE เพื่อให้งานต่อการปิดผนึกและเหนียว

MPET (metallized polyethylene terephthalate) เป็นฟิล์มอีกชนิดที่นิยมนำมา ออบไอโลหะ เนื่องจากมีความเสถียร เคลือบง่าย ผิวเรียบ ใช้ปริมาณโลหะน้อยก็สามารถเสริมคุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านได้ ความหนาที่นิยมใช้คือ 12 ไมครอน (Fowle, 2005)

6.6.2 PET ที่มีโครงสร้างเป็นผลึก (crystallized polyethylene terephthalate, CPET) การที่ CPET เกิดผลึกมาก เนื่องจากการเติมสารก่อผลึก และควบคุมปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ผลึกที่ได้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ทำให้ CPET มีสีขาวขุ่น และกรอบเปราะที่อุณหภูมิต่ำ แต่คงรูปได้ดีที่อุณหภูมิสูงนิยมผลิตเป็นส่วนคอของขวดเครื่องดื่ม หรือผลิตเป็นถาดบรรจุอาหารแช่แข็งที่นำไปอุ่นในตู้ไมโครเวฟ

6.6.3 PET ที่ถูกปรับโครงสร้าง (glycol modified polyethylene terephthalate, PETG) เป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างไซโคลเฮกเซน ไดเมทิลานอล (cyclohexene dimethanol) กับเอทิลีน ไกลคอล และ กรดเทเรพทาติก (terephthalic acid) ทำให้เกิดผลึกน้อย ความใสสูงขึ้น ไม่มีสี มันทนทาน มีความแข็งแรงและความเหนียวสูงกว่า PET ธรรมดา แม้ที่อุณหภูมิสูง ทำให้ PETG สามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้นด้วยวิธีการเป่า การฉีด และการอัดรีดเป็นฟิล์ม นิยมใช้ผลิตขวดบรรจุแชมพู สบู่เหลว ผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม

6.7 พอลิเอทิลีนเนฟทาเลต (polyethylene naphthalate, PEN)

PEN เป็นพอลิเอสเทอร์อีกชนิดหนึ่งที่ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นระหว่าง เอทิลีนไกลคอล กับเนฟทาเลต ไดคาร์บอกซิเลต (naphthalate dicarboxylate) โครงสร้างดังกล่าวทำให้ PEN มีคุณสมบัติดีกว่า PET หลายประการ ได้แก่

- การป้องกันการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำดีกว่า
- ความต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่า
- ความทนทานต่อสารเคมีดีกว่า

- ความต้านทานต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสดีกว่า
- ความต้านทานต่อการสลายตัวด้วยแสงยูวีดีกว่า
- ความทนทานต่ออุณหภูมิสูงกว่า สามารถใช้บรรจุร้อนได้
- ระยะเวลาที่ใช้ขึ้นรูปน้อยกว่า

PEN แม้มีคุณสมบัติดีกว่า PET แต่ราคาสูงกว่า 3-4 เท่า ทำให้การใช้งานยังน้อย จึงนิยมใช้ผสมกับ PET (PET/PEN blend) และเมื่อนำฟิล์มนี้ไปแปรรูปจะเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเตอริฟิเคชัน (transesterification) ระหว่างการขึ้นรูปได้เป็นโคพอลิเมอร์ PET/PEN ซึ่งอยู่ระหว่างการพิจารณาของ US-FDA ให้ใช้โคพอลิเมอร์นี้สัมผัสกับอาหารโดยตรง

6.8 พอลิเอไมด์ หรือ ไนลอน (polyamide or nylon)

Nylon หมายถึงพลาสติกที่มีหมู่เอไมด์ (-OCNH-) ในโมเลกุล ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นระหว่างมอนอเมอร์ที่เป็นไดเอมีน (di-amine) กับมอนอเมอร์ที่เป็นกรดไดคาร์บอกซิลิก (di-carboxylic acid) หรือได้จากปฏิกิริยาแบบควบแน่นกันเอง (self condensation) ของกรดอะมิโนที่มีทั้งกรด และหมู่เอมีนในโมเลกุลเดียวกัน

การเรียกชื่อ Nylon จะมีตัวเลขกำกับอยู่ด้วยเสมอ ถ้าเป็น Nylon ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างไดเอมีน กับกรดไดคาร์บอกซิลิก จะใช้ตัวเลขที่แสดงจำนวนคาร์บอนอะตอมในไดเอมีนตามด้วยตัวเลขที่แสดงจำนวนคาร์บอนอะตอมในกรดไดคาร์บอกซิลิก เช่น Nylon 66 ได้จากปฏิกิริยาระหว่างเฮกซะเมทิลีนไดเอมีน (hexamethylene diamine) และ กรดอะดิปีก (adipic acid)

ถ้าเป็น Nylon ที่ได้จากปฏิกิริยาแบบควบแน่นกันเอง ของกรดอะมิโนที่มีทั้งกรดและเอมีนในโมเลกุลเดียวกัน จะใช้ตัวเลขที่แสดงจำนวนคาร์บอนอะตอมในกรดเอมีนเขียนต่อท้าย Nylon เช่น Nylon 6 Nylon 11 เป็นต้น

ฟิล์ม Nylon ที่ใช้ในการบรรจุผลิตได้ทั้งขบวนการเป่าและการหล่อ เมื่อควบคุมอัตราการทำความเย็นให้สูงๆ จะได้ฟิล์มที่มีผลึกต่ำ ฟิล์มที่ได้จึงใสและเหมาะกับการขึ้นรูปด้วยความร้อน (thermoforming) ฟิล์ม Nylon ที่ใช้ทางการบรรจุมักเป็นฟิล์มที่ผ่านการจัดระเบียบโมเลกุลทั้ง 2 ด้าน (นิยมใช้อักษรย่อ ON หรือ ONY หรือ BON) มีความใส และการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดี

ขึ้น ใช้เป็นวัสดุสำหรับการพิมพ์ที่ดีมาก และใช้มากในรูปฟิล์มหลายชั้นที่ผลิตโดยการเคลือบ การลามิเนต และการอัดรีดร่วม เช่น KON/PE BON/LDPE BON/Ionomer BON/AL/EVA เป็นต้น

Nylon เป็นพลาสติกอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เพราะคุณสมบัติด้านความแข็งแรง ทนทานต่อความร้อนสูง ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซ กลิ่นและไขมันได้ดี แต่ดูความชื้นได้ง่ายและทำให้สมบัติด้านการบรรจุลดลง แต่เมื่อทำให้แห้งก็จะกลับมามีคุณสมบัติดั้งเดิม การใช้งานของฟิล์ม Nylon คล้ายกับฟิล์ม PET และต้องลามิเนตกับชั้นของ PE เพื่อให้ปิดผนึกด้วยความร้อนได้ นิยมใช้ทำถุงบรรจุอาหารภายใต้สุญญากาศ ถุงบรรจุอาหารที่ต้องผ่านการฆ่าเชื้อ นอกจากนี้ Nylon ยังสามารถนำไปผ่านการฆ่าเชื้อด้วยสารเคมีประเภทเอทิลีนออกไซด์ (ethylene oxide) หรือน้ำ หรือรังสีได้ จึงใช้บรรจุเวชภัณฑ์ทางการแพทย์

6.9 เอทิลีนไวนิลแอซีเตต (ethylene vinyl acetate, EVA)

EVA เป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม (random copolymer) ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือ เอทิลีนกับไวนิลแอซีเตต โครงสร้างโมเลกุลของ EVA มีความหลากหลายตามปริมาณของไวนิลแอซีเตต EVA โดยทั่วไปมีปริมาณของไวนิลแอซีเตตร้อยละ 5-50 ชนิดที่ผลิตเป็นฟิล์มมีปริมาณของไวนิลแอซีเตตไม่เกินร้อยละ 5 ถ้าต้องการความเหนียวมากขึ้นจะต้องใช้ชนิดที่มีปริมาณของไวนิลแอซีเตตมากขึ้น เช่น EVA ที่ใช้เป็นชั้นปิดผนึกด้วยความร้อนและขึ้นรูปแบบอัดรีดร่วมจะใช้ EVA ชนิดที่มีปริมาณของไวนิลแอซีเตตร้อยละ 15-18

ไวนิลแอซีเตตเป็น โมเลกุลที่มีขั้วและอยู่ในตำแหน่งโซ่กิ่งใน โครงสร้างโมเลกุลของ EVA ทำให้ความหนาแน่นสูงขึ้น การเกิดผลึกต่ำลง ความยืดหยุ่นสูงขึ้น การป้องกันการซึมผ่านดีขึ้น ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ปิดผนึกกว้างขึ้น แรงยึดเกาะ (adhesion strength) สูงขึ้น ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะสูงขึ้นตามปริมาณของไวนิลแอซีเตตที่เพิ่มขึ้น EVA นิยมใช้กับงานเคลือบแบบอัดรีด (extrusion coating) ใช้ผลิตฟิล์มหลายชั้นเป็นชั้นปิดผนึกด้วยความร้อน (co-extruded heat sealant) หรือใช้กับงานลามิเนต โดยเป็นชั้นเชื่อม (tie layer) ของฟิล์มหลายชั้น เนื่องจากมี T_m และจุดอ่อนตัวต่ำ จึงปิดผนึกได้ง่ายและรวดเร็ว นอกจากนี้ยังนิยมใช้เป็นสารยึดติด (adhesive)

6.10 เอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ (ethylene vinyl alcohol, EVOH)

EVOH เป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนกับไวนิลแอลกอฮอล์ ผลิตจากการไฮโดรไลซ์ EVA ภายใต้สภาวะควบคุม ไวนิลเอซีเทตจะถูกไฮโดรไลซ์เป็นไวนิลแอลกอฮอล์ การมี -OH ในโครงสร้างโมเลกุลทำให้ EVOH ไวต่อความชื้นและน้ำแต่ไม่ละลายน้ำ จึงเกิดแรงดึงดูดภายในโมเลกุลสูง ทำให้มี T_g สูง (55-70 องศาเซลเซียส) EVOH สามารถเกิดผลึกได้แม้จะเป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม เนื่องจากหมู่ -OH เป็นไอโซมอร์ฟัส (isomorphous) เอทิลีนมอนอเมอร์จะทำให้ EVOH มีความยืดหยุ่นและความไวต่อความชื้นและน้ำลดลง EVOH ที่ใช้ทางการบรรจุปัจจุบันจะมีเอทิลีนประมาณ 27-48 เปอร์เซ็นต์ โมล

EVOH มีคุณสมบัติด้านการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซ กลิ่น ไอของสารอินทรีย์ รวมทั้งไขมันได้ดีมากในสภาพแห้ง แต่คุณสมบัติเหล่านี้จะลดลงเมื่อมีความชื้น EVOH ที่มีปริมาณเอทิลีนต่ำจะมีสมบัติด้านการป้องกันการซึมผ่านสูงแต่จะไวความชื้นมากกว่า EVOH ที่มีเอทิลีนสูง การใช้งาน EVOH นิยมใช้ในรูปวัสดุหลายชั้นด้วยการเคลือบหรือการลามิเนต โดยมี EVOH เป็นชั้นใน ส่วนชั้นนอกจะเป็นฟิล์มที่มีคุณสมบัติป้องกันความชื้นได้ดี เช่น PET/EVOH/LDPE เป็นต้น นิยมใช้ EVOH ในผลิตภัณฑ์ที่เสื่อมเสียได้ง่ายด้วยออกซิเจน หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการป้องกันการสูญเสียกลิ่น หรือป้องกันการปนเปื้อนของกลิ่น

EVOH สามารถขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์แบบคงตัว กึ่งคงตัว ทั้งในรูปฟิล์ม กล่อง กระดาษหลายชั้นสำหรับบรรจุเครื่องดื่ม ที่มี EVOH เป็นชั้นป้องกันการซึมผ่าน วิธีการขึ้นรูป และการใช้งานของ EVOH ได้แก่

- การหล่อแบบอัครีคร่วม (cast co-extrusion) เช่น PET/EVOH/EVA ใช้บรรจุผลิตภัณฑ์เนื้อ เนยแข็ง
- การเป่าแบบอัครีคร่วม (blow co-extrusion) เช่น LLDPE/EVOH/LLPE ใช้บรรจุเนื้อสด
- การลามิเนต OPP/EVOH/LDPE ใช้บรรจุเครื่องดื่ม
- การเคลือบแบบอัครีคร่วม (co-extrusion coating) เช่น LDPE/Paperboard/EVOH/Ionomer ใช้กับการบรรจุระบบปลอดเชื้อ
- การขึ้นรูปด้วยความร้อน เช่น PP/EVOH/PP ใช้บรรจุนมเปรี้ยวหรือโยเกิร์ต

- การเป่าขึ้นรูปแบบอครีคร่วม (co-extrusion blow moulding) เช่น PET/EVOH/PET ใช้ผลิตขวดซอสมะเขือเทศ

7. พลาสติกใช้ในการบรรจุอาหาร

พลาสติกที่ใช้สำหรับการบรรจุอาหารอาจแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม ตามองค์ประกอบของพลาสติกที่ผลิต ดังนี้

7.1 พลาสติกที่มีอะลูมิเนียมฟอล์ย เป็นองค์ประกอบ ซึ่งมีการใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ และก๊าซได้ดี อีกทั้งป้องกันแสงอุลตราไวโอเลตได้ดีอีกด้วย ความหนาที่นิยมใช้กันอยู่ระหว่าง 7-12 ไมครอน การผลิตเพื่อใช้งานต้องลามิเนตกับพลาสติกอื่น ที่ผิวทั้งสองด้านเพื่อป้องกันการฉีกขาดของอะลูมิเนียมฟอล์ย ในการใช้งานนิยมใช้กับอาหารที่ไวต่อความชื้นประเภทกาแฟ (Fowle, 2005) หรืออาหารที่เป็นผงต่างๆที่จับเป็นก้อนได้ง่ายหากสัมผัสกับความชื้น สำหรับการลามิเนตพลาสติกที่ผิวชั้นนอกซึ่งเป็นด้านที่ต้องพิมพ์จะนิยมใช้เป็นพลาสติก PET และ OPP โดยพลาสติก PET เป็นพลาสติกค่อนข้างเสถียร รับหมักได้ดี พิมพ์ได้สวยงามใสแวววาว (Massey, 2002) และเหมาะสำหรับการลามิเนตกับวัสดุอื่น อีกทั้งมีความแข็งแรงทางกลสูง (high mechanical strength) มีความอ่อนตัวดี ผิวเรียบ ขนาดไม่เปลี่ยนแปลง รักษาคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมีได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง ทนอุณหภูมิได้สูงถึง 150 องศาเซลเซียส (MacDonald *et al.*, 2002) ส่วนผิวด้านในที่สัมผัสกับอาหารจะนิยมใช้ LDPE หรือ LLDPE ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมที่ดี เหนียว ปิดผนึกได้แน่น (Robertson, 2006)

7.2 พลาสติกที่มีฟิล์มออบไอโกละเป็นส่วนประกอบ พลาสติกที่นิยมนำมาออบไอโกละนั้นมี 2 ชนิด คือ PET และ CPP ซึ่งพลาสติก PET เป็นพลาสติกที่นิยมนำมาออบไอโกละเนื่องจากมีความเสถียร เคลือบง่าย ผิวเรียบ ใช้ปริมาณโกละน้อย (Fowle, 2005) การผลิตจะลามิเนตพลาสติกที่ผิวทั้งสองด้านเช่นเดียวเพื่อป้องกันการหลุดลอกของไอโกละ ชนิดพลาสติกที่เลือกมาลามิเนตที่ผิวฟิล์มจะใช้พลาสติก PET หรือ OPP ลามิเนตที่ผิวด้านนอกที่ต้องผ่านการพิมพ์เพื่อให้เกิดความมันวาวของสีพิมพ์ และใช้พลาสติก PE หรือ CPP ที่มีคุณสมบัติปิดผนึกด้วยความร้อนได้มาลามิเนตที่ผิวด้านใน ส่วนพลาสติก CPP มีการนำมาใช้ออบไอโกละ ได้เช่นกัน และการนำ CPP มาใช้อาจเป็นการลดต้นทุน เนื่องจาก CPP มีคุณสมบัติที่สามารถปิดผนึกด้วยความร้อนได้ จึงไม่ต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายค่าฟิล์มที่จะต้อง

ลามิเนตที่ผิวด้านใน สำหรับการใช้งานของฟิล์มในกลุ่มนี้สามารถนำไปใช้ได้กับสินค้าหลากหลายไม่ว่าจะเป็นกาแฟบด ขนมะขบเคี้ยว ช็อกโกแลต ถุงบรรจุในกล่อง (bag in box) และใช้เป็นฝาปิด (lidding) เป็นต้น (Fowle, 2005)

7.3 ฟิล์มลามิเนตหลายชั้น เป็นการลามิเนตกันของฟิล์มตั้งแต่สองชั้นขึ้นไป โดยไม่มีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมหรือไอโพลี มีเพียงส่วนประกอบของฟิล์มเดี่ยวต่างชนิดกันมาลามิเนตกันเพื่อเสริมคุณสมบัติให้เหมาะสมกับการใช้งาน ตัวอย่างฟิล์มที่มีใช้ปัจจุบันได้แก่ ฟิล์ม OPP ลามิเนตกับ CPP หรือ LLDPE เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการปิดผนึกด้วยความร้อน เป็นต้น ซึ่งฟิล์มกลุ่มนี้มีคุณสมบัติการป้องกันไอน้ำและก๊าซต่ำกว่าสองกลุ่มแรกที่มีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมฟอล์ยและไอโพลี แต่ฟิล์มในกลุ่มนี้ก็มีต้นทุนต่ำกว่าวัสดุต่ำกว่า การใช้งานเหมาะสำหรับบรรจุอาหารที่ไม่ต้องการการปกป้องมากนัก หรืออาหารที่มีอายุการจำหน่ายสั้น

7.4 ฟิล์มชั้นเดียว เหมาะสำหรับการผลิตสินค้าที่มีการผลิตไม่มากหรือเป็นการผลิตในระดับครอบครัว มีอายุการวางขายสั้น เนื่องจากคุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านของฟิล์มชั้นเดียวยังไม่เพียงพอในการที่จะรักษาคุณภาพของอาหารไว้เป็นเวลานานๆ

8. การศึกษาสภาพให้ซึมผ่านได้สำหรับไอน้ำของฟิล์มพลาสติก

สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของวัสดุบรรจุภัณฑ์ เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของอาหาร สภาพให้ซึมผ่านได้ของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับการแพร่และการละลายได้ สัมประสิทธิ์สภาพให้ซึมผ่านได้ (permeability coefficient, P) เป็นตัวแปรเสริมที่เกิดจากสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient, D) และสัมประสิทธิ์การละลาย (solubility coefficient, S) ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์อย่างง่าย ดังสมการ (1)

$$P = DS \quad (1)$$

เมื่อ

P = สัมประสิทธิ์สภาพให้ซึมผ่านได้

D = สัมประสิทธิ์การแพร่

S = สัมประสิทธิ์การละลาย

โดยที่ D ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารที่แพร่ผ่านพอลิเมอร์ และสารที่แพร่ผ่านพอลิเมอร์ จะละลายในพอลิเมอร์ตามกฎการละลายของเฮนรี หรือในกรณีที่มีความซับซ้อน เช่น กรณีการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลต จะสอดคล้องกับกฎของดิงมัวร์-เฮนรี (Langmuir-Henry) ดังสมการ (2) และสมการความสัมพันธ์ของ P ตามสมการ

$$P = kD_D + \frac{C'_H bD_H}{1 + b_p} \quad (2)$$

เมื่อ

P = สัมประสิทธิ์สภาพให้ซึมผ่านได้

k = ค่าคงที่ของเฮนรี

D_D = สัมประสิทธิ์การแพร่ที่ใช้สำหรับกฎของเฮนรี

D_H = สัมประสิทธิ์การแพร่ที่ใช้สำหรับกฎของดิงมัวร์

C'_H = ค่าคงที่ความจุของดิงมัวร์

b_p = ค่าคงที่สัมพรรคของดิงมัวร์

ในระบบการบรรจุใดๆ กลไกการซึมผ่าน (permeation) จะเกี่ยวข้องกับขั้นตอนต่อไปนี้

- 1) สารเกิดการละลายเข้าไปในพอลิเมอร์ที่ผิวร่วม
- 2) สารแพร่ภายในพอลิเมอร์จากด้านที่มีความเข้มข้นสูง ไปยังด้านที่มีความเข้มข้นต่ำ
- 3) สารแพร่ออกจากพอลิเมอร์ที่ด้านตรงข้ามของผิวร่วม

เนื่องจากค่า P ของวัสดุบรรจุขึ้นกับทั้ง D และ S ของวัสดุบรรจุ วัสดุบรรจุที่สามารถป้องกันการซึมผ่านได้ดีจะมีผลคูณของ D และ S ต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อวัสดุบรรจุมี D และ S ต่ำทั้งสองค่าจะทำให้มีค่า P ต่ำ ทำให้สามารถป้องกันการซึมผ่านได้ดี (Hernandez *et al.*, 2000)

8.1 หลักการวัดสภาพให้ซึมผ่านได้

หลักการวัดสภาพให้ซึมผ่านได้ และอัตราการซึมผ่านที่สำคัญและนิยมใช้ในปัจจุบัน อาจแบ่งได้ดังนี้

8.1.1 วิธีไอโซสแตติก (isostatic method)

การวัดวิธีนี้จะทำให้เกิดการไหลอย่างต่อเนื่อง โดยให้ด้านหนึ่งของวัสดุบรรจุหรือภาชนะบรรจุที่ต้องการทดสอบสัมผัสกับสถานะที่มีความเข้มข้นของสารที่ต้องการให้ซึมผ่าน ในขณะที่อีกด้านหนึ่งมีความเข้มข้นของสารเท่ากับศูนย์ ปล่อยให้ก๊าซ (carrier gas) นำสารที่จะให้ซึมผ่านซึมผ่านวัสดุผ่านไปยังเครื่องวัด (detector)

ทำการวัดค่าจนการซึมผ่านเข้าสู่สถานะคงตัว จากปริมาณของสารที่ซึมผ่าน ณ สถานะคงตัว เมื่อทราบพื้นที่ ความหนา เวลา ความแตกต่างของความดัน ทำให้สามารถหาสภาพให้ซึมผ่านได้ของวัสดุได้ การซึมผ่านของสาร ณ สถานะไม่คงตัว สามารถนำไปใช้ประมาณ ค่า D ซึ่งจะนำไปใช้ในการประมาณค่า S จาก ค่า P

การคำนวณค่า P และค่า D จากสถานะไม่คงตัว โดยการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านกับเวลา

หาค่า P จากสมการ (3)

$$P = R_{ss} \frac{l}{A\Delta p} \quad (3)$$

เมื่อ

$$P = \text{สัมประสิทธิ์สภาพให้ซึมผ่านได้}$$

$$R_{ss} = \text{อัตราการซึมผ่าน ณ สถานะคงตัว}$$

หาค่า D ได้จากสมการ (4)

$$D = \frac{l^2}{7.2t_{1/2}} \quad (4)$$

เมื่อ

D = สัมประสิทธิ์การแพร่

l = ความหนาของวัสดุ

$t_{1/2}$ = เวลาที่ใช้เมื่อสารที่ซึมผ่านวัสดุมีปริมาณเป็นครึ่งหนึ่งของสารเมื่อเข้าสู่สมดุล (Hernandez *et al.*, 2000)

8.1.2 วิธีควอซีไอโซสแตติก (quasi isostatic method)

การวัดการซึมผ่านด้วยวิธีวิธีควอซีไอโซสแตติก จะให้ด้านหนึ่งของวัสดุหรือภาชนะบรรจุที่ต้องการทดสอบสัมผัสกับสภาวะที่มีความเข้มข้นของสารที่ซึมผ่านสูง ส่วนอีกด้านหนึ่งมีความเข้มข้นของสารเท่าศูนย์ ปล่อยให้เกิดการสะสมของสารที่ด้านบริเวณด้านที่มีความเข้มข้นต่ำ วัดความเข้มข้นของสารที่ซึมผ่านวัสดุในช่วงเวลาต่างๆ ในด้านที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำ ซึ่งจะถูกส่งผ่านไปยังเครื่องตรวจหา

การคำนวณหาอัตราการซึมผ่านจากอัตราของความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น ณ สถานะคงตัว การวัดวิธีนี้ความแตกต่างของความดัน (Δp) เปลี่ยนแปลงตามเวลา ถ้าการสะสมสารมีความเข้มข้นต่ำๆ ถือได้ว่าความแตกต่างของความดันน้อยคงที่

การคำนวณค่า P และ D โดยการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ซึมผ่านกับเวลา

ค่า P หาได้จากสมการ (6)

ค่า D หาได้จากสมการ (5)

$$D = \frac{l^2}{6\theta} \quad (5)$$

เมื่อ

θ = ช่วงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สถานะคงตัว (Hernandez *et al.*, 2000)

8.2 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ

โดยทั่วไปไม่นิยมรายงานเป็นค่า P แต่นิยมรายงานเป็นค่า WVTR ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะความแตกต่างของความดันย่อยที่ทำการทดสอบ โดยจะรายงานเป็นความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity, RH) เนื่องจากการทดสอบด้านหนึ่งของวัสดุเป็นอากาศแห้ง หรือสารดูดความชื้น (desiccant) ในขณะที่อีกด้านหนึ่งทำการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ รายงานปริมาณไอน้ำที่ผ่านวัสดุในหน่วยกรัม สามารถแปลงค่า WVTR เป็นค่า P จากสมการ (6)

$$P = WVTR \frac{l}{\Delta p} \quad (6)$$

เมื่อ

P = สัมประสิทธิ์สภาพซึมผ่านได้ของไอน้ำ

WVTR = อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

l = ความหนา

Δp = ความแตกต่างของความดันย่อย (Hernandez *et al.*, 2000)

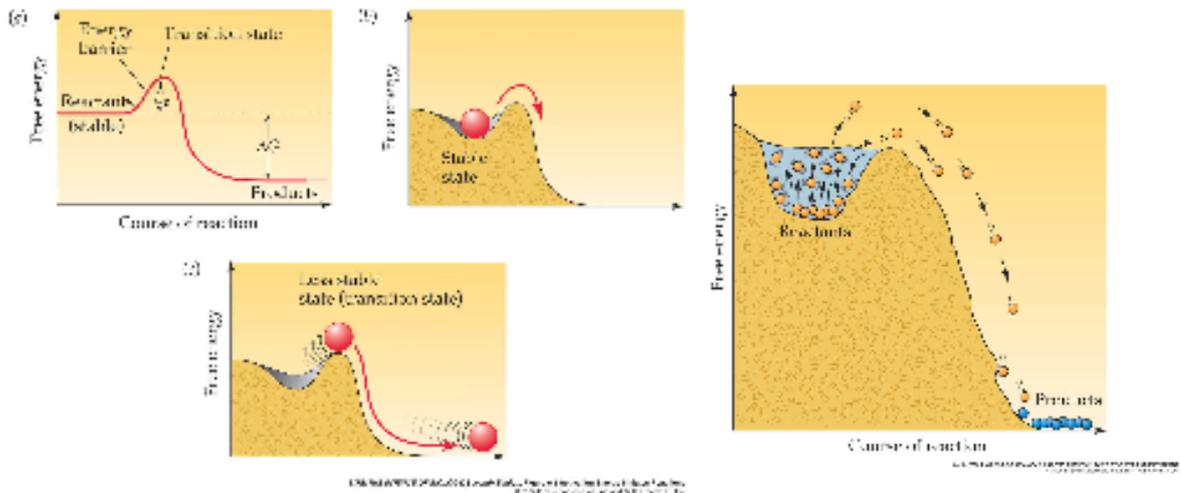
การวัด WVTR สามารถหาได้หลายวิธีโดยอ้างอิงได้จากมาตรฐาน เช่น ASTM E 96-00 เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการหาการซึมผ่านไอน้ำของวัสดุ ได้แก่ กระดาษ พลาสติก วัสดุอื่นๆ ที่มีลักษณะเป็นแผ่น ที่มีความไม่เกิน 32 มิลลิเมตร (ASTM, 2000) ASTM D 3079-94 (Reapproved 2003) ใช้วัดการซึมผ่านไอน้ำของซองพลาสติกสำหรับอาหารแห้ง (ASTM, 2003a) ASTM E 398-03 ใช้วัดการซึมผ่านไอน้ำของแผ่นวัสดุ โดยใช้การวัดแบบไดนามิก (ASTM, 2003b)

9. การทำนายอายุการเก็บของอาหาร

9.1 การทำนายโดยใช้ E_a

9.1.1 ความหมายของ E_a

ความหมายทางด้านเคมีและชีวเคมี E_a หมายถึงพลังงานที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่หรือเกิดปฏิกิริยาได้เป็นผลิตภัณฑ์ออกมา หรือหมายถึงพลังงานที่น้อยที่สุดที่จะทำให้สารเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้นั่นเอง ดังแสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ลักษณะการเกิดพลังงานก่อกัมมันต์

ที่มา: Chasin and Mowshowitz (2006)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โมเลกุลเกิดการเคลื่อนที่เร็วขึ้น โมเลกุลเกิดการชนมากขึ้น มีพลังงานมากขึ้น และพลังงานที่น้อยที่สุดที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยานั้นคือ E_a ปฏิกิริยาต่างๆ ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ สามารถใช้สมการของอาร์เรเนียสอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ โดยกำหนดให้อัตราการเกิดเป็นอัตราคงที่ (Anonymous, n.d.) รายละเอียดดังสมการ (7)-(10)

$$k = k_0 - E_a / RT \quad (7)$$

เมื่อ

k = อัตราคงที่ (มีผลกระทบจากอุณหภูมิ)

E_a = พลังงานก่อกัมมันต์ (จุดต่อโมล)

k_0 = เลขชี้กำลังของสัมประสิทธิ์สภาพให้ซึมผ่านได้ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน

R = ค่าคงที่ของก๊าซ (จุดต่อ โมล เคลวิน)

T = อุณหภูมิ (เคลวิน)

เมื่อใส่ค่าลอการิทึมในสมการจะได้เป็น

$$\ln k = \ln k_0 - E_a / RT \quad (8)$$

หรือ

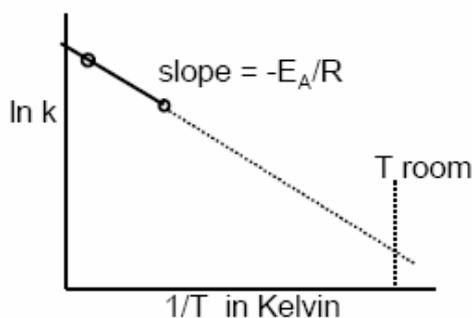
$$\ln k = -E_a / RT + \text{constant} \quad (9)$$

หรือ

$$\ln k = -(E_a / R)(1/T) + \text{constant} \quad (10)$$

9.1.2 การหาค่า E_a

การหาค่า E_a ทำได้โดยการพล็อตกราฟระหว่างค่า $\ln(k)$ กับค่า $1/T$ จะได้กราฟเส้นตรง ค่าความชันของกราฟเส้นตรงสามารถใช้ในการบอกอัตราการเกิดปฏิกิริยา ค่าความชันนี้เป็นค่า $-E_a/R$ ดังแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(k)$ กับค่า $1/T$ ตามสมการของอาร์เรเนียส

จากสมการกราฟเส้นตรงสามารถนำมาเทียบกับสมการของอาร์เรเนียส จะมีความสอดคล้องกันดังสมการ (11)

$$\ln(k) = -E_a / (R)(1/T) + \ln k_0 \quad (11)$$

$$\begin{array}{ccccccc} \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ y & = & m & & x & + & b \end{array}$$

การศึกษา E_a สำหรับปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ มีการศึกษากันมาก ในหลายสาขาวิชา สำหรับในอุตสาหกรรมอาหารการศึกษาด้านพลศาสตร์ของปฏิกิริยาซึ่งมีผลกระทบจากอุณหภูมิเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องศึกษาเนื่องจากสามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารระหว่างการผลิตและระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งได้มีการนำเอาสมการของอาร์เรเนียสมาใช้อธิบายปฏิกิริยาเหล่านั้น และหาค่า E_a ของปฏิกิริยาซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ในการอธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยา ถ้า E_a มีค่ามากแสดงถึงปฏิกิริยานั้นมีความไวต่ออุณหภูมิมาก กล่าวคือปฏิกิริยาจะเกิดช้ามากที่อุณหภูมิต่ำ แต่เกิดเร็วมากที่อุณหภูมิสูง (Van Boekel and Tijssens, 2001) สำหรับในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ ได้มีการนำสมการอาร์เรเนียสมาใช้ในการอธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ได้แก่ สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ (Xianda *et al.*, 1987; Jenekhe and Lin, 1983; Aggarwal *et al.*, 1988; Yilgor and Yilgor, 1999; Bertuzzi *et al.*, 2007) สภาพให้ซึมผ่านได้ของก๊าซต่างๆ (Semenova *et al.*, 1992; Compan *et al.*, 1993; Wang and Mattes, 1999; Kapanin and Lemanik, 2003)

9.1.3 การคำนวณหาอายุการเก็บโดยใช้ค่า E_a

ขั้นแรกในการทำนายอายุการเก็บคือ การหาตัวแปรควบคุมที่บ่งบอกถึงการเสื่อมเสียคุณภาพของอาหาร อายุการเก็บอาจสั้นสุดลงเมื่อมีความชื้นเข้าไป การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน การเจริญของจุลินทรีย์ หรือหลายๆ ปัจจัยที่เกิดขึ้น ดังนั้นต้องกำหนดปัจจัยที่จะใช้เป็นเหตุผลของการเสื่อมเสียเพื่อที่จะนำไปใช้คำนวณหาอายุการเก็บที่เกิดขึ้นในบรรจุภัณฑ์

Hernandez *et al.* (2000) กล่าวว่าสมการของอาร์เรเนียส สามารถใช้กับ P ของไอน้ำได้ตามสมการ (12) เนื่องจากอุณหภูมิมิผลต่อสภาพให้ซึมผ่านได้ โดยที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อการละลายของไอน้ำในพอลิเมอร์

$$P = P_0 e^{(E_p / RT)} \quad (2)$$

เมื่อ

P = สัมประสิทธิ์สภาพให้ซึมผ่านได้

P_0 = เลขชี้กำลังของสัมประสิทธิ์สภาพให้ซึมผ่านได้ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน

E_p = พลังงานก่อกัมมันต์ (จุดต่อ โมล)

R = ค่าคงที่ของก๊าซ (จุดต่อ โมล เคลวิน)

T = อุณหภูมิ (เคลวิน)

เมื่อทราบค่า P ของบรรจุภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่างๆ จะสามารถหา E_p โดยพล็อตกราฟระหว่าง $\ln(P)$ กับ $1/T$ จะได้กราฟเส้นตรง ค่าความชันของเส้นตรงเท่ากับ E_p/R และเมื่อทราบค่าการซึมผ่านของพลาสติกที่อุณหภูมิหนึ่ง สามารถหาค่าการซึมผ่านของพลาสติกอีกอุณหภูมิหนึ่งได้ตามสมการ (13) ดังนี้

$$P_2 = P_1 e^{-E_p/R(1/T_2 - 1/T_1)} = P_1 e^{E_p/R(1/T_1 - 1/T_2)} \quad (13)$$

เมื่อ

P_1 = สัมประสิทธิ์สภาพให้ซึมผ่านได้ ที่อุณหภูมิที่หนึ่ง

P_2 = สัมประสิทธิ์สภาพให้ซึมผ่านได้ ที่อุณหภูมิที่สอง

E_p = พลังงานก่อกัมมันต์ (จุดต่อ โมล)

R = ค่าคงที่ของก๊าซ (จุดต่อ โมล เคลวิน)

T = อุณหภูมิ (เคลวิน)

หาค่าความชื้นวิกฤติของอาหารจากการหาการดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ แล้วนำมาคำนวณหาอายุการเก็บได้จากสมการ (14)

$$t = \frac{ql}{AP\Delta p} \quad (14)$$

เมื่อ

t = อายุการเก็บ (วัน)

q = น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (กรัม)

= น้ำหนักตัวอย่าง (น้ำหนักแห้ง x (ความชื้นวิกฤติ- ความชื้น

เริ่มต้น))

l = ความหนา (มิล)

A = พื้นที่ (ตารางเมตร)

P = สัมประสิทธิ์สภาพให้ซึมผ่านได้

 Δp = ความแตกต่างของความดันไอ ระหว่างภายนอกและภายใน

บรรจุภัณฑ์

การที่จะทราบว่ามีการดูดซึม หรือมีการสูญเสียองค์ประกอบของสารระเหย โดยปกติจะใช้การทำนายจากค่าการซึมผ่านผนังของบรรจุภัณฑ์ ซึ่งการประมาณการนี้จะเที่ยงตรงเพียงใดขึ้นอยู่กับอาหารและบรรจุภัณฑ์ ถ้าอาหารเป็นพวกที่มีการเสื่อมเสียจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน ถือว่าการประมาณการนี้ไม่เหมาะสม และถ้าอาหารมีความชื้นหรือน้ำมาก ค่าที่ทำนายก็จะไม่ถูกต้องด้วย เพราะฉะนั้นการทำนายอายุการเก็บของอาหารด้วยวิธีนี้จึงเหมาะสมสำหรับอาหารที่มีการเสื่อมเสียจากความชื้นเป็นหลัก

ในกรณีของอาหารที่มีการเสียจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน วิธีที่ใช้ในการทำนายอายุการเก็บบางวิธีต้องใช้การวัดเพื่อหาปริมาณการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนเมื่อเวลาเปลี่ยนไป เช่น วัดค่าเปอร์ออกไซด์ (peroxide) สำหรับอาหารที่มีน้ำมัน หรือวัดค่าเฮกซานอล (hexanal) สำหรับอาหารที่มี เฮกซานอล ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่เกิดจากการออกซิเดชัน แต่สำหรับการทำนายการดูดซึมความชื้นของอาหาร จะทำได้เพียงเก็บอาหารไว้ในสภาวะที่มีสารละลายเกลืออิ่มตัวทิ้งไว้ จนกระทั่งอาหารดูดความชื้นจนเข้าสู่ภาวะสมดุล จากนั้นทดสอบโดยการชั่ง หรือวัดเนื้อสัมผัส ซึ่งสามารถบอกได้ว่าอาหารนั้นหมดอายุหรือไม่ ซึ่งการทำนายการดูดน้ำเข้าไป หรือการเอาน้ำออก สามารถวัดได้ด้วยปริมาณความชื้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์สัมพัทธ์หรือค่า A_w และการหาการดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่

สำหรับงานวิจัยที่มีการทำนายอายุการเก็บ โดยใช้ E_u สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ มาเป็นตัวปรับค่า P นั้นยังมีอยู่น้อย มีงานวิจัยของ Xiong (2002) ที่ได้ทำการทำนาย

อายุการเก็บของแผ่นธัญชาติอบกรอบของ Post® Shredded Wheat Cereal โดยใช้ E_u ของฟิล์มที่ใช้มา คำนวณหา P ของไอน้ำของฟิล์มที่สภาวะการเก็บจริง แล้วนำไปคำนวณเพื่อทำนายอายุการเก็บของอาหารที่นำมาทดสอบ โดยใช้ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกัน พบว่าได้อายุการเก็บที่ใกล้เคียงกับการทดลองเก็บจริง

งานวิจัยอื่นที่มีการใช้ E_u ส่วนใหญ่เป็นการหาค่า E_u ของปฏิกิริยาอื่น เช่น Marino *et al.* (2005) ได้ศึกษาอายุการเก็บของกล้วยอบแห้งที่บรรจุในถุงพลาสติก PVC และ MOPP โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 แล้วนำมาหาความชื้น หาค่า A_w วัดปริมาณจุลินทรีย์ และทดสอบทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค ซึ่งจะได้อายุการเก็บจริงจากการใช้ตัววัดต่างๆ ที่ทดสอบ และนำอัตราการเสื่อมเสียที่เกิดขึ้นมาศึกษา จลนพลศาสตร์ (kinetic) ของแต่ละค่าที่ทำการทดสอบ โดยใช้สมการของอาร์เรเนียส หาค่า E_u จากอายุการเก็บที่ได้จากการทดสอบทางประสาทสัมผัส และอัตราการเสื่อมเสียของอาหาร ได้เป็นสมการสำหรับการทำนายอายุการเก็บ Wang *et al.* (2004) หา E_u ของการเปลี่ยนแปลงช่องว่างในพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เป็นต้น

10. การทำนายอายุการเก็บอาหารด้วยวิธีอื่นๆ

10.1 รูปแบบสำหรับการทำนายอายุการเก็บ

การเลือกรูปแบบที่ใช้วัดการเสื่อมเสียคุณภาพของอาหารเป็นสิ่งสำคัญเป็นอันดับแรกในการทำนายอายุการเก็บ ซึ่งการทำนายอายุการเก็บจะมีพื้นฐานเกี่ยวข้องกับการเสื่อมเสียคุณภาพของอาหารเป็นหลัก ซึ่งกลไกการเสื่อมเสียจะมีจลนพลศาสตร์ที่แตกต่างกัน และสมการที่ใช้อธิบายการสูญเสียคุณภาพได้แก่ $rQ = \phi(C_i, E_j)$ โดยที่ rQ คือ อัตราการเสื่อมเสียคุณภาพซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนของปัจจัยประกอบต่างๆ (composition factors) เช่น ความเข้มข้นของสารที่จะทำปฏิกิริยา ปริมาณจุลินทรีย์ ปริมาณสารกระตุ้น สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา pH และค่า A_w และปัจจัยแวดล้อม (environmental factors, E_j) เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และความเค้นทางกล (mechanical stress) และความดันทั้งหมด รูปแบบต่างๆ ที่ใช้อาจจะเหมาะสมหรือไม่เหมาะสม นั้นสามารถวัดได้ด้วยวิธีทางเคมี ฟิสิกส์ จุลินทรีย์ หรือวัดด้วยวิธีทางประสาทสัมผัส

ปัจจัยแวดล้อมเป็นสิ่งสำคัญที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา และเป็นตัวกำหนดและควบคุมการเกิดจลนพลศาสตร์ โดยที่รูปแบบจลนพลศาสตร์ มิได้เป็นตัวการสำคัญเพียงอย่างเดียวที่จะใช้ศึกษาในเรื่องการเสื่อมเสียคุณภาพ แต่ยังเกี่ยวข้องกับสถานะแวดล้อมในการทดลอง รวมทั้งความสามารถในป้องกันการซึมผ่านของวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่มีผลด้วย ซึ่งสิ่งต่างๆ เหล่านี้นำไปสู่การสร้างรูปแบบที่ประกอบด้วยตัวแปร ปัจจัยแวดล้อมต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเสื่อมเสียคุณภาพของอาหารในระหว่างการเก็บ บางปัจจัยสามารถอธิบายได้ เช่น อุณหภูมิ มีความสำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยทั่วไปอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดมาก เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น รูปแบบที่ใช้ในการอธิบาย คือ อาร์เรเนียส เป็นสมการที่ได้มาจาก กฎของอุณหพลศาสตร์ (thermodynamic law) ที่มีพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ใช้อธิบายปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นต่างๆ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น ความหนืด การแพร่ และการดูดซึม เป็นต้น

10.2 การใช้ Q_{10} ทำนายอายุการเก็บ

เป็นทางเลือกหนึ่งในอุตสาหกรรมอาหารที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นกับอุณหภูมิ Q_{10} เท่ากับอัตราส่วนของค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยาที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน 10 องศาเซลเซียส รูปแบบนี้ใช้อธิบายว่าปฏิกิริยามีอัตราเร็วเพียงไร เมื่ออาหารอยู่ที่อุณหภูมิคงที่ และใช้อธิบายปฏิกิริยาที่มีอุณหภูมิเป็นตัวเร่ง จากนั้นนำไปทำนาย ที่อุณหภูมิต่ำกว่า และสามารถนำมาใช้ในการทำนายอายุการเก็บได้

10.3 การทำนายอายุการเก็บในสถานะเร่ง (accelerated shelf life testing)

เป็นการศึกษาโดยใช้อุณหภูมิสูง และทำนายการสูญเสียคุณภาพจากสถานะการเก็บ โดยใช้สมการของอาร์เรเนียส ซึ่งวิธีนี้จะลดเวลาการทดสอบให้สั้นลงกว่าเวลาจริง จะเร่งเวลาได้เร็วขึ้น 9-13 เท่า ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิ แต่ต้องระวังในการประมวลผลและข้อมูลการทำนายที่สถานะอื่นที่ไม่ได้ทำการทดลอง ตัวอย่างเช่น เมื่อทดสอบอาหาร และบรรจุภัณฑ์ บรรจุภัณฑ์จะเป็นตัวควบคุมอายุการเก็บจริงของอาหาร ดังนั้นถ้าใช้บรรจุภัณฑ์ที่มีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนไอน้ำ หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แตกต่างจากที่ทำการทดสอบในครั้งแรก ผลที่ได้จากการทดสอบที่ได้ก่อนหน้าจะไม่สามารถใช้ได้ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ก็ยังมีปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้คือ ความผิดพลาดที่เกิดจากการวิเคราะห์ข้อมูลหรือวิเคราะห์ผลทางประสาธสัมพันธ์ โดยปกติการวิเคราะห์จะให้ความแปรปรวนได้น้อยกว่าร้อยละ ± 10 เพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด

นอกจากนี้ การเพิ่มอุณหภูมิอาจจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะขององค์ประกอบของอาหารได้ เช่น ไขมันเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว ดังนั้นอายุการเก็บที่ทำนายจะมากกว่าอายุการเก็บจริงที่เก็บที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าสภาวะเร่งที่ทดสอบ (Labuza, 2000)

ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีผลกระทบโดยตรงกับปริมาณความชื้นและค่า A_w ของอาหาร เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่กระทบกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเสื่อมเสียคุณภาพของอาหาร ค่า A_w อธิบายคุณสมบัติของพลังงานอุณหพลศาสตร์ (thermodynamic energy) ของน้ำในอาหาร และเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีของอาหารด้วย ถึงแม้ว่าค่า A_w จะสูงก็ไม่ได้หมายความว่า จะเกิดปฏิกิริยาเร็ว แต่ค่า A_w วิกฤติจะมีความสำคัญต่อการเสื่อมเสีย ที่เกิดจากการเจริญของจุลินทรีย์หรือการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของอาหารที่ไวต่อความชื้น (Taoukis *et al.*, 1988) ผลก็คือ ปฏิกิริยาการเสื่อมเสียหลายชนิดที่มีการเพิ่มขึ้นอย่างทวีคูณเมื่อมีค่า A_w สูงเหนือค่าวิกฤติ โดยทั่วไปค่า A_w มากกว่า 0.6-0.8 จะเป็นช่วงที่มีอัตราการเกิดการเสื่อมเสียสูงมาก

รูปแบบเชิงประจักษ์เป็นการเอาผลของค่า A_w ไปเป็นตัวแปรด้วย ซึ่งสามารถใช้ในการทำนายอายุการเก็บของอาหารที่ไวต่อความชื้นได้ เช่นการทำนายอายุการเก็บในสภาวะเร่งที่ใช้ทำนายอายุการเก็บที่สภาวะปกติโดยข้อมูลการทดสอบในสภาวะเร่งที่มีอุณหภูมิและความชื้นสูง

Azanza and Faria (2005) ได้ศึกษาการทำนายอายุการเก็บของแผ่นข้าวโพดอบกรอบ (cornflakes) ในบรรจุภัณฑ์พลาสติกชนิดอ่อนตัว โดยใช้ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ สมการเชิงเส้น (linear) การวิเคราะห์จุดกึ่งกลาง (middle point) และลอการิทึม (logarithm interval) และใช้ค่าความชื้นวิกฤติที่ได้จากการหาค่าความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ของแผ่นข้าวโพดอบกรอบ และผลการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคเป็นตัวชี้วัดความเสียหายของอาหาร

Nielsen *et al.* (1997) ได้ศึกษาการทำนายอายุการเก็บของนมผงโดยใช้ สมการถดถอย พหุคูณ (multiple regression) และ การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (principal component analysis) การหาอายุการเก็บจะใช้ข้อมูลทางประสาทสัมผัสที่มีค่าเฉลี่ยของกลิ่นรสของนมผง (ที่มีคะแนนเฉลี่ย 8 และ 6 จากคะแนน 15 ถึง 0) มาหาความสัมพันธ์กับอายุการเก็บและคุณภาพของนมผงเริ่มต้น เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป โดยใช้สมการถดถอยพหุคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (coefficient of determination, R^2)

11. ตัวชี้วัดคุณภาพที่ใช้บ่งชี้ในการทดสอบอายุการเก็บ

อายุการเก็บหมายถึงระยะเวลาการเก็บจนกระทั่งอาหารนั้นไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ภายใต้สภาวะการเก็บที่กำหนด ตัวชี้วัดว่าอาหารนั้นเสื่อมเสียหรือไม่นั้นมีหลายวิธีรวมทั้งการทดสอบทางประสาทสัมผัส ทางเคมี จุลินทรีย์ และการทดสอบลักษณะทางกายภาพ ซึ่งทดสอบผ่านเครื่องมือหรือวิธีการพื้นฐาน (Labuza, 2000) วิธีการที่ใช้ในปัจจุบันได้แก่

11.1 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

โดยให้ผู้ชิมที่ผ่านการอบรมชิมอาหารที่ต้องการทดสอบ ซึ่งเป็นการประมาณการที่ดีที่บอกคุณภาพโดยรวมของอาหาร จุดสำคัญอย่างหนึ่งในการทดสอบด้วยวิธีนี้คือพยายามหาระดับความเหมาะสมเมื่ออาหารมีการเปลี่ยนแปลง หากจุดสุดท้าย ที่ไม่สามารถแยกแยะได้ด้วยรูปแบบที่ใช้ในการทำนายการเสื่อมคุณภาพกับเวลา การทดสอบทางประสาทสัมผัสจะทดสอบเทียบกันระหว่างเวลาที่ 0 ซึ่งมีคุณภาพร้อยละ 100 และอายุการเก็บสุดท้ายที่มีค่าคุณภาพร้อยละ 0 มีระดับคะแนนเป็นตัววัด

11.2 การใช้ Weibull Hazard Method

เป็นวิธีการที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาและเคมีภัณฑ์ที่ให้ผลดีเหมือนกับการทดสอบทางประสาทสัมผัส เป็นวิธีที่ง่ายเพียงแต่ตอบคำถามว่า “ยอมรับผลิตภัณฑ์นี้หรือไม่” และจะทดสอบมากขึ้นเมื่อเข้าใกล้เวลาสิ้นสุดอายุการเก็บ ดังนั้นก็จะทราบอายุการเก็บที่แท้จริง การวิเคราะห์ข้อมูลจะพล็อตกราฟค่าการยอมรับกับเวลา อายุการเก็บคือเวลาที่ผู้บริโภคร้อยละ 50 ไม่ยอมรับ

11.3 การใช้เครื่องมือวัด (instrument measurement)

การทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยผู้บริโภคเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างการเก็บแต่ยุ่งยากในการเตรียมและต้องใช้ช่วงเวลาที่ทดสอบที่ยาวนาน จึงยากที่จะควบคุมมาตรฐานการวัดของผู้ชิมในแต่ละคนได้ การทดสอบโดยใช้เครื่องมือวัดจะได้ค่าที่แน่นอนกว่า (Kilcast *et al.*, 2000) ซึ่งการทดสอบทางเคมี จุลินทรีย์ และลักษณะทางกายภาพเป็นที่นิยมใช้มากในการศึกษาคุณภาพของอาหาร ลักษณะที่วัดได้แก่ กลิ่นรส สี เนื้อสัมผัสที่สามารถวัดได้ด้วย

เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ เป็นการวัดปฏิกิริยาทางเคมีและชีวเคมีและทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไป หลังการผลิตและระหว่างการเก็บ ค่าที่วัดได้จะสัมพันธ์กับค่าที่วัดทางประสาทสัมผัส

11.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี (chemical and physical property tests)

วิธีการและเครื่องมือหลายอย่างที่ใช้วัดซึ่งสามารถบอกอายุการเก็บ ใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถทดสอบทางประสาทสัมผัสได้ เช่น วัดอายุการเก็บของเมล็ดธัญชาติ ข้าว อาจวัดปริมาณเฮ็กซานอล บริเวณช่องว่างเหนืออาหาร (headspace) การใช้เครื่องโครมาโตกราฟีแบบของเหลวสมรรถนะสูง (high - performance liquid chromatography, HPLC) วัดการสูญเสียของวิตามินซีและวิตามินเอ การใช้เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ (electronic nose) วัดองค์ประกอบบริเวณช่องว่างเหนืออาหาร ซึ่งสามารถใช้ในอาหารที่มีค่า A_w ต่ำๆ เป็นต้น

11.5 การทดสอบทางจุลินทรีย์ (microbiological test)

เป็นวิธีหาจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคหรือเชื้อราต่างๆที่สร้างสารพิษที่เกิดจากการปนเปื้อนในอาหารซึ่งสามารถใช้ในการทำนายอายุการเก็บของอาหารได้ ซึ่งนักวิจัยจะทำการประเมินจากผลที่ได้จากการตรวจนับจำนวนแบคทีเรียทั้งหมด (standard plate count) เพื่อวัดระดับความสดของอาหาร

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ตัวอย่างฟิล์มและตัวอย่างอาหาร

- 1.1 ฟิล์มตัวอย่างจากผู้ผลิตพลาสติก
- 1.2 ขนมหึง

2. วัสดุอุปกรณ์

- 2.1 ถ้วยอะลูมิเนียมสำหรับหาค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม
- 2.2 พาราฟิน
- 2.3 ขวดแก้วมีฝาปิดแน่นสนิท
- 2.4 ถ้วยพลาสติกสำหรับบรรจุอาหาร
- 2.5 กระป๋องทดสอบหาความชื้น (moisture can)
- 2.6 โถดูดความชื้น (desiccator)
- 2.7 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบทางประสาทสัมผัส

3. สารเคมี

- 3.1 ลิเทียมคลอไรด์ (lithium chloride, LiCl)
- 3.2 โพแทสเซียมอะซิเตท (potassium acetate, CH_3COOK)
- 3.3 แมกนีเซียมคลอไรด์ (magnesium chloride, MgCl_2)
- 3.4 โพแทสเซียมคาร์บอเนต (potassium carbonate, K_2CO_3)
- 3.5 แมกนีเซียมไนเตรท (magnesium nitrate, $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$)
- 3.6 โพแทสเซียมไอโอไดด์ (potassium iodide, KI)
- 3.7 โซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride, NaCl)
- 3.8 โพแทสเซียมคลอไรด์ (potassium chloride, KCl)
- 3.9 โพแทสเซียมไนเตรท (potassium nitrate, K_2NO_3)
- 3.10 สารดูดความชื้น (desiccant)

4. เครื่องมือ

- 4.1 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดสูง (Sartorius CP 2245, Germany)
- 4.2 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (WTW TS 1006-1, Green Banyan Co Ltd., Thailand)
- 4.3 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (SUNDEN INTERCOOL SRC-680 SAD, บริษัท ชันเด็นอินเตอร์คูล (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน))
- 4.4 เครื่องผสม (Kenwood KM 410, Kenwood Ltd., UK)
- 4.5 เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Lloyd TM LRX S/N 10313, Lloyd Instruments Ltd., UK)
- 4.6 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริเมทรี (NETZSCH DSC 204 F1, LMS Instruments Company Co. Ltd., Germany)
- 4.7 เครื่องวัดค่า A_w (TESTO 650, Germany)
- 4.8 ตู้อบลมร้อน (BINDER FD 115, Korea)
- 4.9 ตู้อบสูญญากาศ (EYELA VOS 450 SD, Tokyo Rikakikai Co, Japan)
- 4.10 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น (TESTO 608-H1, Germany)

วิธีการ

1. การสำรวจข้อมูลเบื้องต้นของฟิล์มพลาสติกสำหรับการบรรจุอาหารที่ไวต่อความชื้น

ศึกษาข้อมูลชนิดฟิล์มพลาสติกที่ใช้บรรจุอาหารจากผู้ประกอบการและแหล่งข้อมูลต่างๆ เช่น วารสาร เอกสารวิชาการต่างๆ และข้อมูลสารสนเทศอื่นๆ แล้วจัดแบ่งกลุ่มโดยใช้องค์ประกอบของวัสดุและอัตราการซึมผ่านของไอน้ำเป็นเกณฑ์

2. การศึกษาค่าพลังงานก่อกัมมันต์สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มพลาสติกสำหรับการบรรจุอาหารที่ไวต่อความชื้น

2.1 การหาค่า WVTR

ทดสอบหาค่า WVTR ของฟิล์ม ตามมาตรฐาน ASTM E 96 (ASTM, 2005) ที่ อุณหภูมิ 20±1 25±1 30±1 35±1 และ 38±1 องศาเซลเซียส โดยเตรียมสารละลายเกลือ ลิเทียมคลอไรด์ ให้มีความชื้นสัมพัทธ์ภายในโถคู่ความชื้นให้ได้เท่ากับร้อยละ 90±2 รายละเอียด ภาคผนวก ก (ภาณุวัฒน์, 2539) เตรียมตัวอย่างฟิล์มและวัดค่า WVTR ตามรายละเอียดใน ภาคผนวก ข

2.2 การหาค่า P

หาค่า P ของไอน้ำของฟิล์มที่อุณหภูมิต่างๆ นำค่า WVTR ของฟิล์มที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ ศึกษาไว้ในข้อ 2.1 มาคำนวณเป็นค่า P ของไอน้ำของฟิล์มในแต่ละอุณหภูมิโดยใช้สมการที่ (6)

$$P = WVTR \frac{l}{\Delta p}$$

โดยที่ l คือความหนา และ Δp คือความแตกต่างของความดันย่อย (Hernandez *et al.*, 2000)

วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติโดยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และ ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Rang Test

2.3 การหาค่า E_a

E_a สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำทำได้โดยพล็อตกราฟระหว่าง $\ln(P)$ กับ $1/T$ จะได้กราฟเส้นตรง และคำนวณหาค่า E_a สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ จากความชันของ กราฟ (slope) = E_a/R โดยค่า R คือค่าคงที่ของแก๊ส คำนวณหาค่า E_a ออกมา (Hernandez *et al.*, 2000) จากนั้นนำมาจัดกลุ่มโดยใช้วิธี cluster analysis

3. การศึกษาประสิทธิภาพในการทำนายอายุการเก็บของอาหารที่ไวต่อความชื้น โดยใช้ค่า พลังงานก่อกัมมันต์ กรณีศึกษา: ขนมหึง

3.1 ลักษณะการดูความชื้นของขนมหึง

3.1.1 จลนพลศาสตร์การดูความชื้นของขนมหึง

ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดความชื้น (moisture kinetic) ภายใต้สภาวะบรรยากาศคงที่ โดยนำขนมปัง ที่มีสูตรและวิธีการทำดังแสดงในภาคผนวก ค มาทำการลดความชื้นของขนมปังด้วยการเก็บขนมปังในโถดูดความชื้นที่มีสารดูดความชื้นประมาณ 2 สัปดาห์ ก่อนนำไปบดและบรรจุขนมปังที่บดแล้วประมาณ 4 กรัม ในถ้วยพลาสติกที่ไม่มีฝาปิดเพื่อให้ขนมปังดูดความชื้นจากสภาวะแวดล้อมได้สะดวก วางถ้วยพลาสติกภายในขวดแก้วปิดสนิท ที่บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัวเพื่อปรับบรรยากาศภายในขวดให้มีความชื้นสัมพัทธ์แตกต่างกันตามชนิดของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่ใช้ โดยสารละลายเกลือที่ใช้มี 5 ชนิด ได้แก่ LiCl MgCl_2 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ NaCl และ K_2NO_3 ซึ่งจะควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ ภายในขวดให้ได้ เท่ากับร้อยละ 11.3 32.4 51.4 75.1 และ 92.3 ตามลำดับ (Bell and Labuza, 2000) เก็บที่อุณหภูมิ 30 ± 1 องศาเซลเซียส จากนั้นหาปริมาณความชื้นของขนมปังโดยใช้วิธี AOAC (Lane, 1998) ทุกๆ 2 ชั่วโมง จนกระทั่งขนมปังดูดความชื้นจนเข้าสู่สภาวะสมดุล วิเคราะห์ผลโดยหาค่าเฉลี่ยของความชื้นที่ได้ พล็อตกราฟระหว่างความชื้นกับเวลา และเส้นกราฟการดูดความชื้นถูกศึกษาหาความสอดคล้องด้วยรูปแบบเชิงประจักษ์ของ Peleg (1988) ดังสมการ

$$M(t) = M_0 \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (15)$$

เมื่อ

$M(t)$ = ปริมาณความชื้นที่เวลา t โดย $t > 0$

M_0 = ความชื้นเริ่มต้น (เวลา=0)

k_1, k_2 = ค่าคงที่

3.1.2 การดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่

นำขนมปังที่อบเสร็จใหม่ (ภาคผนวก ค) มาทำการลดความชื้นในโถดูดความชื้นที่มีสารดูดความชื้นประมาณ 2 สัปดาห์ ก่อนบดและบรรจุขนมปังที่บดแล้วประมาณ 4 กรัม ในถ้วยพลาสติกที่ไม่มีฝาปิดเพื่อให้ขนมปังดูดความชื้นจากสภาวะแวดล้อมได้สะดวก

การศึกษาค่าการดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ของขนมปังถูกวัดที่อุณหภูมิ 30 ± 1 องศาเซลเซียส โดยใช้เทคนิคกราวิเมตริก (Spiess and Wolf, 1983; Labuza, 2000) โดยวางถ้วยตัวอย่างขนมปังที่เตรียมไว้ในขวดแก้วปิดสนิทที่บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว ในการศึกษาทำการศึกษาที่ 9 ระดับความชื้นสัมพัทธ์ คือ ร้อยละ 11.3 21.6 32.4 43.2 51.4 67.9 75.1 83.6

และ 92.3 โดยใช้สารละลาย LiCl CH_2COOK MgCl_2 K_2CO_3 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ KI NaCl KCl และ K_2NO_3 ตามลำดับ (Greenspan, 1977; Palipane and Driscoll, 1992; Young, 1967; Bell and Labuza, 2000) ที่งไว้จนกระทั่งจนมอดความชื้นจนอิมตัว หรือประมาณ 4 สัปดาห์ จากนั้นนำขนมที่อิมตัวแล้วไปหาความชื้นตามวิธี AOAC (Lane, 1998) และวัดค่า A_w ซึ่งเรียกความชื้นที่จุดอิมตัวนี้ว่า ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content)

พล็อตกราฟระหว่างความชื้นสมดุล (น้ำหนักแห้ง) บนแกน Y กับค่า A_w ของขนมบนแกน X และใช้รูปแบบเชิงประจักษ์ปรับเส้นโค้งการมอดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ ที่นิยมใช้มีหลายรูปแบบได้แก่

- รูปแบบเชิงประจักษ์ของ GAB ซึ่งนิยมใช้มาก

$$m_e = \frac{C_1 k m_0 a_w}{(1 - k a_w)(1 - k a_w + C_1 k a_w)} \quad (16)$$

เมื่อ

m_e = ความชื้นสมดุล (น้ำหนักแห้ง)

C_1, k = ค่าคงที่

m_0 = น้ำในชั้นมอนอเลเยอร์

A_w = วอเตอร์แอกติวิตี

แก้สมการจะได้

$$\frac{a_w}{m_e} = \frac{k}{m_0} \left(\frac{1}{c} - 1\right) a_w^2 + \frac{1}{m_0} \left(1 - \frac{2}{c}\right) a_w + \frac{1}{m_0 k c} \quad (17)$$

$$\frac{a_w}{m_e} = \alpha a_w^2 + \beta a_w + \varepsilon \quad (18)$$

เมื่อ

$$\alpha = \frac{k}{m_0} \left(\frac{1}{c} - 1\right) \quad \beta = \frac{1}{m_0} \left(1 - \frac{2}{c}\right) \quad \varepsilon = \frac{1}{m_0 k c} \quad (19)$$

ซึ่งรูปแบบนี้จะใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (linear regression analysis) กับ ค่าผลบวกกำลังสอง (sum of squares methods) จะได้ค่า α β และ ϵ ก็จะหาค่า m_0 c และ k ได้ (Van den Berg and Bruin, 1981)

- รูปแบบเชิงประจักษ์ของ

$$m_e = \frac{F}{(1-a_w)^G} - \frac{F}{(1+a_w)^H} \quad (20)$$

เมื่อ

F G และ H = ค่าคงที่ (Lewicki, 1998)

- รูปแบบเชิงประจักษ์ของ Oswin

$$m_e = k \left[\frac{a_w}{(1-a_w)} \right]^c \quad (21)$$

เมื่อ

k และ c = ค่าคงที่ ซึ่งได้จากความชัน และค่าจุดตัดแกนตั้ง (intercept) ของกราฟเส้นตรงจากการพล็อตค่า $\log(m_e)$ กับ $\log \frac{a_w}{1-a_w}$ (Oswin, 1946)

- รูปแบบเชิงประจักษ์ของ Peleg

$$m_e = aa_w^b + ca_w^d \quad (22)$$

เมื่อ

a b c และ d = ค่าคงที่ (Peleg, 1993)

- รูปแบบเชิงประจักษ์ของ BET

$$m_e = \frac{m_0 C a_w}{(1 - a_w)(1 + (C - 1)a_w)} \quad (23)$$

เมื่อ

m_0 = น้ำในชั้นมอนอเลเยอร์

C = ค่าคงที่ (Brunauer *et al.*, 1938)

รูปแบบทั้งหมดถูกทำนายเพื่อวิเคราะห์หาค่าของตัวแปรต่างๆ โดยใช้โปรแกรม Kyplot 2.0 (Kyence Inc., Japan) แล้วคำนวณหาค่า R^2 ค่าร้อยละของรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (root mean square percent error, % RMS) เพื่อใช้บ่งบอกความเหมาะสมของรูปแบบที่นำมาใช้ โดยค่า R^2 จะพิจารณาค่าที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุด ส่วนค่า % RMS จะพิจารณาค่าต่ำ จึงจะแสดงถึงความเหมาะสมของรูปแบบที่นำมาใช้ ศึกษา เนื่องจากเป็นค่าที่แสดงความแตกต่างระหว่างค่าที่ทดลองจริงกับค่าที่ทำนาย หากค่าที่ทดลองจริงมากกว่าค่าทำนาย แสดงว่ามีความต่างกันมาก ทำให้ค่าของ % RMS ที่คำนวณได้มีค่าสูงจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ทำนาย โดยค่า % RMS คำนวณได้จาก

$$\% \text{ RMS} = \frac{\sqrt{\sum \left(\frac{X_{\text{exp}} - X_{\text{model}}}{X_{\text{exp}}} \right)^2}}{n - 1} \times 100\% \quad (24)$$

เมื่อ

X_{exp} = ค่าที่ได้จากการทดลอง

X_{model} = ค่าจากรูปแบบเชิงประจักษ์

n = จำนวน

การเปรียบเทียบค่าปริมาณความชื้นจากการทดลองและค่าที่ทำนายได้จากรูปแบบเชิงประจักษ์ต่างๆที่ใช้ปรับเส้นโค้ง โดยศึกษาความสัมพันธ์ในลักษณะเป็นเส้นทแยงมุม (diagonal) และศึกษาสัมพันธ์ระหว่างค่า A_w กับค่าความคลาดเคลื่อน (residual errors) ของแต่ละรูปแบบ

3.2 อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อคุณภาพของขนมปัง

3.2.1 การวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ

นำขนมปังที่อบเสร็จใหม่ (ภาคผนวก ค) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ โดยวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน เถ้า และ เส้นใย ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ โดยใช้วิธี AOAC (AOAC, 1980)

3.2.2 การวัดค่าคุณภาพทางเนื้อสัมผัส

นำขนมปังที่อบเสร็จใหม่ (ภาคผนวก ค) มาลดความชื้นในโถดูดความชื้นที่มีสารดูดความชื้นทิ้งไว้ประมาณ 2 สัปดาห์ วางขนมปังทั้งชิ้นในขวดแก้วปิดสนิทที่แต่ละขวดจะบรรจุสารละลายเกลืออิมิตัวแตกต่างกัน 9 ชนิด ได้แก่ LiCl CH_2COOK MgCl_2 K_2CO_3 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ KI NaCl KCl และ K_2NO_3 ซึ่งสารแต่ละชนิดจะให้ความชื้นสัมพัทธ์แตกต่างกันคือ ร้อยละ 11.3 21.6 32.4 43.2 51.4 67.9 75.1 83.6 และ 92.3 ตามลำดับ

นำขนมปังที่ลดความชื้นจนเข้าสู่สภาวะสมดุลในแต่ละระดับความชื้น ไปทดสอบคุณภาพทางเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส ตามวิธีการที่ดัดแปลงจากงานวิจัยของ Li *et al.* (1998) โดยวางขนมปังให้อยู่กึ่งกลางหัวกด โดยหัวกดกดขนมจากจุดสูงสุดลงมา ระยะการกดประมาณ 5 มิลลิเมตร หรือประมาณ $\frac{1}{2}$ ของความสูงของขนม หัวกด (probe) เป็นรูปทรงกระบอกปลายเรียบ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.77 มิลลิเมตร วัดด้วยความเร็ว (crosshead speed) 10 มิลลิเมตรต่อนาที และแรงกด (load) 50 กิโลกรัมแรง บันทึกค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ขนมแตกเป็นแรงที่ต้องการเพื่อถอดตัวอย่างระหว่างฟันเพื่อให้เกิดการแตก (Brennan, 1980) ซึ่งเป็นการวัดความแข็ง (hardness) และบันทึกงาน (work) ซึ่งเป็นพื้นที่ใต้กราฟ ที่คำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟของค่าแรงและระยะทาง

3.2.3 การวัดคุณภาพทางอุณหภูมิ

ปรับความชื้นของขนมปังให้มีความชื้นระดับต่างๆ โดยที่ระดับความชื้นต่ำ (ใกล้ 0) ทำด้วยการนำขนมปังไปอบในตู้อบสูญญากาศ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความดัน 76 มิลลิเมตรปรอท นาน 48 ชั่วโมง ส่วนที่ระดับความชื้นอื่นๆ เตรียมโดยเก็บขนมปังในขวดแก้วปิด

สัณนิที่ที่บรรจุสารละลายเกลืออิมิตัวตัวแตกต่างกัน 4 ชนิดได้แก่ LiCl K₂CO₃ NaCl และ K₂NO₃ ซึ่ง จะมีความชื้นสัมพัทธ์แตกต่าง 4 ระดับ คือที่ร้อยละ 11.3 43.2 75.1 และ 92.3 ตามลำดับ ทั้งไว้จน ขนมหึงดูความชื้นจนถึงจุดสมดุล จากนั้นนำขนมหึงที่ผ่านการปรับความชื้นทั้งหมดไปหาปริมาณ ความชื้น (Lane, 1998) รายละเอียดภาคผนวก ง

วิเคราะห์ค่า T_g โดยนำขนมหึงที่เตรียมไว้ข้างต้นมาหาค่า T_g ด้วยเครื่อง DSC ตามวิธีการที่ดัดแปลงจากงานวิจัยของ Li *et al.* (1998) โดยบรรจุขนมหึง 11-15 มิลลิกรัม ในถ้วย อะลูมิเนียมสำหรับวิเคราะห์และปิดผนึกไม่ให้อากาศเข้า วิเคราะห์แบบไดนามิก (dynamic mode) ด้วยอัตราการสแกน (scan rate) เท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยเริ่มต้นที่อุณหภูมิ – 50 ถึง 230 องศาเซลเซียส ช่วงความกว้างของอุณหภูมิ (amplitude) เท่ากับ 1 องศาเซลเซียส และใช้ช่วงเวลา ก่อนเริ่มวัด (equilibrating period) 30 วินาที นำค่าที่วัดได้หาค่าอนุพันธ์ลำดับที่ 1 (1st derivative) ของอุณหภูมิและพลังงานที่ใช้ ซึ่งจะให้เห็นค่าความแตกต่างของพลังงานได้ชัดเจนขึ้น ทำให้ ทราบค่า T_g ของขนมหึงได้

3.2.4 การวัดคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ปรับความชื้นของขนมหึงโดยเก็บขนมหึงใน โถดูความชื้นที่บรรจุน้ำกลั่นซึ่ง มีความชื้นในบรรยากาศประมาณร้อยละ 90 ทั้งไว้ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน จากนั้นหาปริมาณ ความชื้น (Lane, 1998) รายละเอียดภาคผนวก ง ซึ่งจะได้อุณหภูมิที่มีความชื้นแตกต่างกัน 6 ระดับ คือ มีความชื้นร้อยละ 4.055 4.968 5.819 7.299 7.973 และ 9.223 จากนั้นนำขนมหึงที่ได้ไป ทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค

การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส ทดสอบโดยใช้ผู้บริโภคที่ผ่านการ ฝึกฝนจำนวน 12 คน เพื่อให้แน่ใจว่าจะได้ข้อมูลความพึงพอใจในด้านความกรอบที่ใกล้เคียงกัน (Duizer *et al.*, 1998) ระดับคะแนนความกรอบแบ่งเป็น 9 ระดับ (1= ไม่กรอบ/ นิ่มมาก, 9 = กรอบ มาก) ผู้บริโภคจะได้รับตัวอย่างขนม 3 ซ้ำ

ขั้นตอนนี้จะได้อุณหภูมิความชื้นวิกฤติของตัวอย่างเพื่อนำมาใช้ในการทำนายอายุ การเก็บของขนมต่อไป

3.3 การทำนายอายุการเก็บ

3.3.1 การทำนายอายุการเก็บของอาหารโดยวิธีดั้งเดิม

ก. ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการทำนายอายุการเก็บ

1) ผลិតภัณฑ์

ความชื้นเริ่มต้น นำตัวอย่างอาหารที่ทำเสร็จใหม่ มาหาปริมาณความชื้น (Lane, 1998) รายละเอียดภาคผนวก ง

2) บรรจุภัณฑ์

ขนาดบรรจุภัณฑ์ ที่จะใช้บรรจุผลิตภัณฑ์

ความหนา ของพลาสติกที่จะใช้บรรจุ

3) สภาพการเก็บ

อุณหภูมิ และ *ความชื้น* ที่จะเก็บรักษาผลิตภัณฑ์

ข. การทำนายอายุการเก็บของอาหารโดยวิธีดั้งเดิม โดยใช้ค่า P ของไอน้ำของฟิล์มจากสภาวะทดสอบมาตรฐาน

ทำนายอายุการเก็บของขนมปังโดยใช้ค่า P สำหรับไอน้ำของฟิล์มที่อุณหภูมิ 38 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90 ± 2 ซึ่งเป็นสภาวะที่นิยมทดสอบกันตามมาตรฐาน (เป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณหาอายุการเก็บของอาหารแบบเดิม) ประกอบกับข้อมูลเกี่ยวกับตัวผลิตภัณฑ์ เช่นความชื้นเริ่มต้น ความชื้นวิกฤติ ที่ได้ศึกษาไว้ข้างต้น (ข้อ 3.2 และ 3.3.1) ข้อมูลเกี่ยวกับบรรจุภัณฑ์ และข้อมูลสภาวะการเก็บ นำข้อมูลทั้งหมดมาคำนวณหาอายุการเก็บได้จากสมการ (14)

3.2.2 การทำนายอายุการเก็บโดยใช้ค่า E_u เป็นตัวปรับค่าให้ถูกต้อง (correction factor)

ทำนายอายุการเก็บของอาหารตัวอย่าง โดยนำค่า E_u สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มที่จะใช้บรรจุมาคำนวณหา P สำหรับไอน้ำ ที่อุณหภูมิการเก็บจริง ซึ่ง

คำนวณได้จากสมการ (13) จากนั้นนำข้อมูลต่างๆ มาคำนวณหาอายุการเก็บได้จากสมการ (14) เช่นเดียวกัน

3.3.3 การเปรียบเทียบผลการทำนายอายุการเก็บกับการเก็บรักษาขนมผิง

การศึกษาอายุการเก็บจริง โดยนำขนมผิงบรรจุในถุงพลาสติก ขนาดบรรจุ ประมาณ 50 กรัม แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 ± 1 องศาเซลเซียส แล้วสุ่มตัวอย่างขนมผิงที่เก็บไว้ในระยะเวลาต่างๆไปทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส ทดสอบคุณภาพทางเนื้อสัมผัส หาปริมาณความชื้น และ A_w เก็บตัวอย่างไปทดสอบเป็นระยะไปจนกระทั่งขนมผิงที่เก็บไว้นั้นมีความชื้นถึงจุดวิกฤติหรือไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคแล้วเปรียบเทียบผลของอายุการเก็บจริงกับการทำนายอายุการเก็บข้อ 3.3.2 และ 3.3.3

ผลและวิจารณ์

1. การสำรวจข้อมูลเบื้องต้นของฟิล์มพลาสติกสำหรับการบรรจุอาหารที่ไว้ต่อความชื้น

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของฟิล์มชนิดต่างๆที่มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ได้ศึกษาข้อมูลจากแหล่งข้อมูลจากเอกสารวิชาการต่างๆ บทความจากวารสาร และข้อมูลจากผู้ผลิตบรรจุภัณฑ์ พบว่าฟิล์มที่ใช้อยู่ปัจจุบันมีทั้งแบบที่เป็นฟิล์มชั้นเดียว (ตารางที่ 1) และฟิล์มหลายชั้น (ตารางที่ 2) ซึ่งผ่านกระบวนการนำฟิล์มชั้นเดียวมาประกบกัน (lamination)

ตารางที่ 1 ชนิดพลาสติกชั้นเดียวที่ใช้ในปัจจุบัน

ชนิดฟิล์ม	ความหนา (ไมครอน)
PE	15 – 80
OPP	20, 28, 30, 40, 60
PET	12
Nylon	15
PS	23-150
MPET	12
MCPP	15-25
MOPP	12-20

หมายเหตุ: PE = พอลิเอทิลีน

OPP = พอลิพรอพิลีนชนิดจัดระเบียบโมเลกุล

PET = พอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลต

Nylon = พอลิอามีด

PS = พอลิสไตรีน

MPET = พอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลตชนิดจัดระเบียบโมเลกุลอบไอโลหะ

MCPP = พอลิพรอพิลีนชนิดหล่ออบไอโลหะ

MOPP = พอลิพรอพิลีนชนิดจัดระเบียบโมเลกุลอบไอโลหะ

ตารางที่ 2 ชนิดฟิล์มที่ใช้กับอุตสาหกรรมอาหาร

องค์ประกอบของฟิล์ม	ความหนา (ไมครอน)
PET12/PE20/ALU20/LLDPE65	117
OPP-MATT20/PE20/ALU7/PE20/LLDPE50	117
PET12/PE22/ALU7/PE40	81
PET12/ALU9/PE60	81
OPP20/PE15/MPET12/PE18/ CPP20	85
PET12/PE20/UMPET12/PE28	72
PET12/MPET12/PE25/VMX25	74
OPP20/MPET12/PE20/ CPP20	72
OPP20/MPET12/LLDPE40	72
MPET12/LLDPE60	72
MPET12/LLDPE80	92
OPP20/MCPP25	45
OPP28/MCPP25	53
OPP30/MCPP25	55
OPP30/PE15/ CPP20	65
OPP40/ CPP30	70
OPP30/LLDPE50	80
OPP20/ CPP25	45
OPP20/ CPP20	40
Nylon15/LLDPE65	80
Nylon15/LLDPE60	75
Nylon15/LLDPE50	65
Nylon15/LLDPE75	90
PP150	150
PP140	140
PP70	70
PE50	50
OPP50	50

หมายเหตุ: - รวบรวมจากบริษัท พรินมาสเตอร์ จำกัด บริษัท ไทยฟิล์ม จำกัด (มหาชน) บริษัท ทีพีเอ็น แพ็คกิ้ง แอนด์ จำกัด และบริษัท เอสที ดีไซน์ จำกัด และเอกสารวิชาการ

- ALU = อะลูมิเนียมฟอยล์ (aluminium foil)

เนื่องจากคุณสมบัติที่ต้องการเพื่อใช้งานในผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด มีความแตกต่างกัน และฟิล์มชั้นเดียวไม่สามารถตอบสนองความต้องการเหล่านั้นได้ครบถ้วน ถึงแม้จะมีพอลิเมอร์หลายชนิดให้เลือกใช้ในการผลิตฟิล์มแล้วก็ตาม แต่ฟิล์มชั้นเดียวนั้นยังคงมีคุณสมบัติบางประการขาดหายไป การใช้ฟิล์มหลายชั้นสามารถช่วยเสริมคุณสมบัติที่ต้องการได้ อีกทั้งลดค่าใช้จ่ายในการผลิตฟิล์มที่มีคุณสมบัติสูงในชั้นเดียว โดยหันมาใช้ฟิล์มที่ราคาถูกกว่าหลายๆ ชนิดมาลามิเนตเป็นฟิล์มหลายชั้นแทน (Massey, 2002) โดยฟิล์มหลายชั้นที่ผลิตจะเป็นการนำฟิล์มเดี่ยวหลายๆ ชั้นมาลามิเนตแบบอัดรีด รีดร่วม หรือใช้สารยึดติด ซึ่งฟิล์มชั้นเดียวที่มีใช้ขณะนี้หลายชนิดได้แก่ PE OPP PET Nylon และPS (ไม่นิยมใช้ในการบรรจุอาหาร) ซึ่งแต่ละชนิดมีหลายความหนาให้เลือกใช้ เนื่องจากคุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านของฟิล์มจะสูงขึ้นถ้าความหนาเพิ่มขึ้น (Massey, 2002) นอกจากนี้ยังมีการใช้ฟิล์มที่มีการอบไอโลหะ เช่น MPET MCP P MOPP ซึ่งเป็นฟิล์มที่มีคุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซได้ดีกว่าฟิล์มชั้นเดียว เพื่อเป็นทางเลือกสำหรับสินค้าที่มีความต้องการการปกป้องสูง การเลือกชนิดของฟิล์มที่จะนำมาลามิเนตนั้นจะต้องพิจารณาคุณสมบัติของฟิล์มและลักษณะการนำไปใช้งาน ตลอดจนความต้องการของลูกค้า รวมทั้งราคาที่เหมาะสม

จากตารางที่ 2 ฟิล์มที่ผลิตเพื่อบรรจุอาหารในปัจจุบันพบว่ามีหลากหลายองค์ประกอบที่แตกต่างกัน โดยจะพบทั้งฟิล์มที่มีอะลูมิเนียมฟอล์ยเป็นองค์ประกอบ ฟิล์มที่มีฟิล์มอบไอโลหะเป็นองค์ประกอบ ฟิล์มลามิเนตหลายชั้น และฟิล์มชั้นเดียว จะสังเกตเห็นว่าข้อมูลที่นำมาเสนอไม่มีการใช้ EVOH และ PVDC ซึ่งผู้ผลิตให้เหตุผลว่าฟิล์มดังกล่าวยังไม่มีการผลิตในประเทศต้องนำเข้า ซึ่งมีราคาแพงจึงหันมาใช้เป็นฟิล์มหลายชั้นที่มีองค์ประกอบอื่นที่มีราคาถูกกว่ามาใช้แทน

ฟิล์มที่มีอะลูมิเนียมฟอล์ย เป็นองค์ประกอบ จากข้อมูลที่ได้ศึกษาในตารางที่ 2 จะเห็นว่าฟิล์มในกลุ่มนี้จะเป็นการลามิเนตกันของฟิล์มตั้งแต่ 3-5 ชั้น โดยมีชั้นของอะลูมิเนียมฟอล์ยอยู่ชั้นใน แล้วเชื่อมกับวัสดุอื่นเช่น PE หรือสารยึดติดอื่นในการลามิเนต ฟิล์มที่มีอะลูมิเนียมฟอล์ยเป็นองค์ประกอบมีคุณสมบัติเด่นในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ และก๊าซได้ดี นิยมใช้กับอาหารที่ไวต่อความชื้นประเภทกาแฟ (Fowle, 2005)

ฟิล์มที่มีฟิล์มอบไอโลหะเป็นส่วนประกอบ จากตัวอย่างฟิล์มในตารางที่ 2 จะเห็นว่าฟิล์มอบไอโลหะที่ใช้เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นฟิล์ม MPET ความหนา 12 ไมครอน ส่วนฟิล์ม MCP P ความหนา 25 ไมครอน มีใช้บ้าง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะฟิล์ม PET มีความเสถียร เคลือบง่าย

ผิวเรียบ ใช้ปริมาณโลหะน้อยก็สามารถเสริมคุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านได้ (Fowle, 2005) ส่วนการนำฟิล์ม MCPP มาใช้จะได้ประโยชน์ทั้งคุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านและการปิดผนึกด้วยความร้อน

ฟิล์มลามิเนตหลายชั้น จากตัวอย่างฟิล์มที่ศึกษา (ตารางที่ 2) พบว่า ฟิล์มในกลุ่มนี้ไม่ได้ต้องการเพิ่มคุณสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านมากนัก ส่วนใหญ่จะนำฟิล์มเดี่ยวลามิเนตกันเพียง 2 ชั้น ชั้นนอกซึ่งนอกจากจะมีคุณสมบัติด้านการป้องกันการซึมผ่านแล้วยังต้องมีคุณสมบัติด้านการพิมพ์ด้วย การใช้งานจะเลือกใช้ตามคุณสมบัติของฟิล์มชั้นนอกเป็นหลัก เช่นฟิล์ม OPP ที่มีคุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซ ไออน้ำ และไขมันได้ดี (งามทิพย์, 2550) จะใช้กับอาหารที่เสื่อมเสียจากความชื้น และ/หรือ ออกซิเจน เป็นต้น และหากชั้นนอกเป็นฟิล์ม Nylon ก็จะใช้กับอาหารแช่แข็ง ทำเป็นถุงสำหรับบรรจุแบบสุญญากาศ หรือบรรจุสินค้าที่มีน้ำหนักมาก เนื่องจาก Nylon มีความแข็งแรง ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซ กลิ่น และไขมันได้ดี (งามทิพย์, 2550) อีกทั้งการนำลามิเนตกับ LLDPE ซึ่งนอกจากช่วยในการปิดผนึกแล้วยังช่วยเพิ่มความต้านทานแรงทิ่มทะลุและแรงฉีกขาดได้ดี (Robertson, 2006)

ฟิล์มชั้นเดียว จากข้อมูลที่ศึกษามาเป็นฟิล์มที่หาซื้อได้ง่ายในท้องตลาด ซึ่งผู้ผลิตผลิตเพื่อจำหน่ายในปริมาณไม่มาก สำหรับ ผู้บริโภครายย่อยให้สามารถหาซื้อได้ โดยไม่ต้องซื้อในปริมาณมากตามปริมาณการสั่งซื้อที่ผู้ผลิตกำหนด แต่คุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านจะน้อยกว่าฟิล์มลามิเนต เนื่องจากมีเพียงคุณสมบัติของฟิล์มเพียงชนิดเดียว ถึงแม้จะเพิ่มความหนาของฟิล์มให้มากขึ้นเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านของฟิล์มซึ่งจะสูงขึ้นถ้าความหนาเพิ่มขึ้น (Massey, 2002)

2. การศึกษาค่าพลังงานก่อกัมมันต์สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไออน้ำของฟิล์มพลาสติกสำหรับการบรรจุอาหารที่ไวต่อความชื้น

จากการศึกษา P ของไออน้ำของฟิล์มพลาสติกตัวอย่าง ผลดังตารางที่ 3 ค่า P ของไออน้ำของฟิล์มทุกชนิดจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทั้งนี้เพราะ โมเลกุลของไออน้ำสามารถละลายในพอลิเมอร์ และจะแพร่ผ่านพอลิเมอร์ไปตามช่องว่างที่อยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งช่องว่างระหว่างโมเลกุลนี้จะเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน คือ เมื่ออุณหภูมิสูงช่องว่างนี้จะเพิ่มขนาด

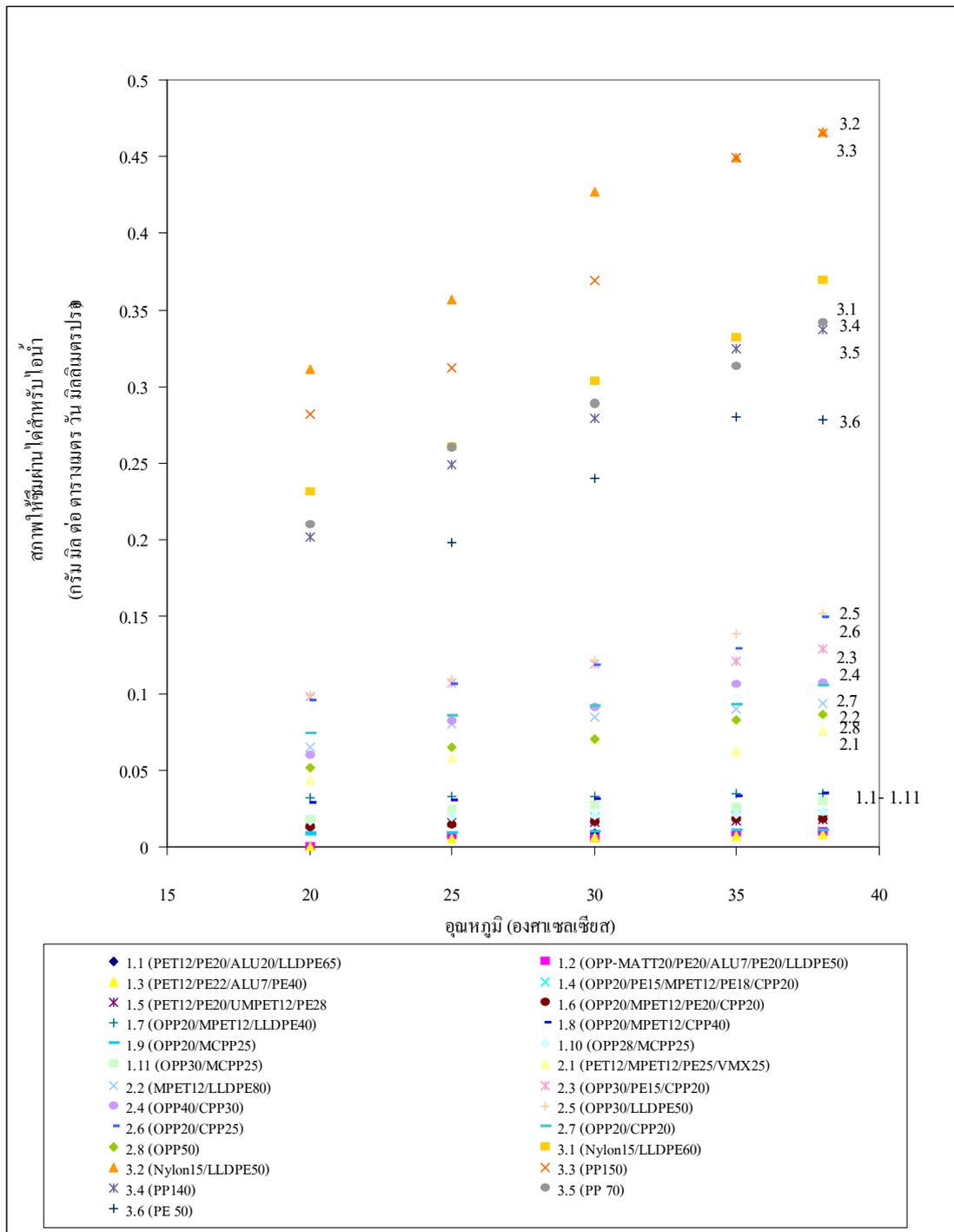
ตารางที่ 3 สภาพให้ซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพลาสติก

ชนิดและความหนา (ไมครอน)	ความ หนารวม (มิก)	P (กรัม มิลต่อ ตารางเมตร วัน มิลลิเมตรปรอท)				
		20±1	25±1	30±1	35±1	38±1
1. ฟิล์มที่ป้องกันการซึมผ่านได้ดีมาก						
1.1 PET12/PE20/ALU20/LLDPE65	4.606	-	0.0069±0.0008 ^{AB}	0.0085±0.0028 ^{AB}	0.0086±0.0000 ^A	0.0097±0.0021 ^A
1.2 OPP-MATT20/PE20/ALU7/PE20/LLDPE50	4.606	-	0.0069±0.0000 ^{AB}	0.0057±0.0000 ^A	0.0086±0.0000 ^A	0.0097±0.0021 ^A
1.3 PET12/PE22/ALU7/PE40	3.189	-	0.0053±0.0000 ^A	0.0066±0.0045 ^A	0.0069±0.0000 ^A	0.0076±0.0000 ^A
1.4 OPP20/PE15/MPET12/PE18/CPP20	3.346	0.0150±0.0000 ^{BC}	0.0166±0.0000 ^{CD}	0.0193±0.0048 ^D	0.0208±0.0036 ^{BC}	0.0212±0.0000b ^{BC}
1.5 PET12/PE20/UMPET12/PE28	2.835	0.0148±0.0037 ^{BC}	0.0156±0.0027 ^C	0.0163±0.0020 ^{BCD}	0.0167±0.0015 ^B	0.0179±0.0000 ^B
1.6 OPP20/MPET12/PE20/CPP20	2.835	0.0127±0.0000 ^B	0.0141±0.0000 ^C	0.0163±0.0040 ^{CD}	0.176±0.0030 ^{BC}	0.0179±0.0000 ^B
1.7 OPP20/MPET12/LLDPE40	2.835	0.0318±0.0000 ^D	0.0328±0.0000 ^F	0.0332±0.0025 ^F	0.0343±0.0046 ^E	0.0351±0.0013 ^E
1.8 OPP20/MPET12/CPP40	3.622	0.0286±0.0045 ^D	0.0305±0.0023 ^F	0.0315±0.0070 ^F	0.0326±0.0015 ^E	0.0347±0.0034 ^E
1.9 OPP20/MCPP25	1.772	0.0079±0.0000 ^A	0.0088±0.0000 ^B	0.0099±0.0015 ^{ABC}	0.0105±0.0010 ^A	0.0105±0.0007 ^A
1.10 OPP28/MCPP25	2.087	0.0171±0.0027 ^C	0.0196±0.0020 ^D	0.0206±0.0026 ^{DE}	0.0214±0.0000 ^C	0.0231±0.0061 ^C
1.11 OPP30/MCPP25	2.165	0.0178±0.0028 ^C	0.0239±0.0041 ^E	0.0267±0.0071 ^{EF}	0.0262±0.0035 ^D	0.0291±0.0034 ^D
2. ฟิล์มที่ป้องกันการซึมผ่านได้						
2.1 PET12/MPET12/PE25/VMX25	2.913	0.0435±0.0075 ^A	0.0578±0.0000 ^A	0.0701±0.0280 ^A	0.0624±0.0000 ^A	0.0760±0.0000 ^A
2.2 MPET12/LLDPE80	2.835	0.0649±0.0000 ^B	0.0799±0.0069 ^{BC}	0.0849±0.0118 ^{AB}	0.0900±0.0019 ^C	0.0935±0.0044 ^B

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ชนิดและความหนา (ไมครอน)	ความ หนารวม (มิล)	P (กรัม มิลต่อ ตารางเมตร วัน มิลลิเมตรปรอท)				
		20±1	25±1	30±1	35±1	38±1
2.3 OPP30/PE15/CPP20	2.559	0.0975±0.0057 ^D	0.1072±0.0065 ^D	0.1190±0.0102 ^C	0.1208±0.0014 ^E	0.1285±0.0012 ^D
2.4 OPP40/CPP30	2.756	0.0597±0.0036 ^B	0.0820±0.0046 ^{BC}	0.0907±0.0039 ^B	0.1061±0.0015 ^D	0.1068±0.0022 ^C
2.5 OPP30/LLDPE50	3.150	0.0988±0.0071 ^D	0.1094±0.0156 ^D	0.1218±0.0022 ^C	0.1389±0.0045 ^G	0.1519±0.0129 ^E
2.6 OPP20/CPP25	1.772	0.0953±0.0000 ^D	0.1055±0.0192 ^D	0.1181±0.0000 ^C	0.1287±0.0000 ^F	0.1494±0.0095 ^E
2.7 OPP20/CPP20	1.575	0.0741±0.0035 ^C	0.0851±0.0066 ^C	0.0920±0.0022 ^B	0.0924±0.0059 ^C	0.1054±0.0040 ^C
2.8 OPP50	1.969	0.0514±0.0025 ^A	0.0651±0.0033 ^{AB}	0.0705±0.0000 ^A	0.0831±0.0074 ^B	0.0861±0.0056 ^{AB}
3. พีดัมที่ป้องกันการซึมผ่านได้ปานกลาง						
3.1 Nylon15/LLDPE60	2.953	0.2315±0.0000 ^B	0.2604±0.0123 ^C	0.3037±0.0476 ^C	0.3319±0.0538 ^B	0.3688±0.0751 ^B
3.2 Nylon15/LLDPE50	2.559	0.3115±0.0033 ^D	0.3569±0.0049 ^D	0.4275±0.0483 ^A	0.4497±0.0050 ^C	0.4660±0.152 ^C
3.3 PP150	5.906	0.2822±0.0076 ^C	0.3125±0.0000 ^C	0.3693±0.0111 ^B	0.4492±0.0114 ^C	0.4653±0.0350 ^C
3.4 PP140	5.512	0.2017±0.0143 ^A	0.2491±0.0053 ^B	0.2789±0.0136 ^{CD}	0.3251±0.0078 ^B	0.3369±0.0126 ^{AB}
3.5 PP70	2.756	0.2099±0.0123 ^A	0.2598±0.0079 ^B	0.2880±0.0275 ^{CD}	0.3132±0.0133 ^{AB}	0.3420±0.0278 ^{AB}
3.5 PE50	1.969	0.2852±0.0142 ^C	0.1986±0.0000 ^A	0.2406±0.0172 ^D	0.2805±0.0110 ^A	0.2785±0.0000 ^A

หมายเหตุ: ^{A-G} อักษรที่ต่างกัน ในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



ภาพที่ 3 สภาพให้ซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ

ใหญ่ขึ้นด้วย (Hernandez *et al.*, 2000) ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงโมเลกุลของไอน้ำก็จะสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวกมากขึ้น จึงทำให้ฟิล์มมีค่า P ของไอน้ำสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ

Fowle (2005) แบ่งกลุ่มพลาสติกตามคุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพลาสติกได้เป็น 4 กลุ่ม คือ 1) ระดับต่ำ (มีค่า WVTR > 100 กรัมต่อตารางเมตรต่อวัน) 2) ระดับปานกลาง (มีค่า WVTR 6-100 กรัมต่อตารางเมตรต่อวัน) 3) ระดับดี (มีค่า WVTR 1-5 กรัมต่อตารางเมตรต่อวัน) และ 4) ระดับดีมาก (มีค่า WVTR < 1 กรัมต่อตารางเมตรต่อวัน) เมื่อเทียบกับข้อมูล P ของฟิล์มต่างๆ ที่ได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ ซึ่ง $P = WVTR \times l / \Delta p$ จะทำให้ค่า P น้อยกว่าค่า WVTR แต่สามารถใช้เป็นแนวทางในการจัดกลุ่มฟิล์มที่ได้ศึกษามาได้ จากผลในตารางที่ 3 จะเห็นว่าค่า P สูงสุดของฟิล์มที่มีความหนามากที่สุดที่อุณหภูมิ 38±1 องศาเซลเซียส มีค่าเพียง 0.4659 (WVTR เท่ากับ 8.14 กรัมต่อตารางเมตรต่อวัน) แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่นำมาศึกษาครั้งนี้เป็นฟิล์มที่คุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านได้ในระดับดีมาก ดี และปานกลาง (ตารางที่ 3 และภาพที่ 3)

จากภาพที่ 3 จะสังเกตได้ชัดเจนว่าฟิล์มที่นำมาศึกษาสามารถแบ่งกลุ่มพลาสติกตามคุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพลาสติกของ Fowle (2005) ได้เป็น 3 กลุ่ม ในทุกอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ (20 25 30 35 และ 38 องศาเซลเซียส) โดยแต่ละกลุ่มมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ฟิล์มที่มีการป้องกันการซึมผ่านได้ดีมากมีค่า P ต่ำมากมีค่าประมาณ 0.0076 - 0.0351 กรัม มิลต่อตารางเมตร วัน มิลลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิ 38±1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90±2 ส่วนที่อุณหภูมิต่ำๆ จะมีค่า P ลดลงตามอุณหภูมิต่ำลง ฟิล์มในกลุ่มนี้จะมีองค์ประกอบของโลหะ โดยเฉพาะอะลูมิเนียมฟอสฟอรัสที่ส่งผลให้ฟิล์มมีค่า P ต่ำมาก เมื่อเทียบกับฟิล์มอื่นที่มีองค์ประกอบของฟิล์มอบไอโลหะ เนื่องจากอะลูมิเนียมฟอสฟอรัสมีคุณสมบัติเด่นด้านการป้องกันการซึมผ่านไอน้ำและก๊าซได้ดีมาก (Fowle, 2005) ส่วนฟิล์มอื่นๆ ที่มีฟิล์มอบไอโลหะเป็นองค์ประกอบจะมีค่า P แตกต่างกันตามชนิดและความหนาของฟิล์มที่นำมาเปรียบเทียบกัน โดยฟิล์มที่มีองค์ประกอบเหมือนกันความหนาใกล้เคียงกันจะมีค่า P เป็นไปในทิศทางเดียวกัน เช่น ฟิล์ม OPP20/MPET12/LLDPE40 กับ OPP20/MPET12/PP40 และ OPP28/MCPP25 กับ OPP30/MCPP25 เป็นต้น มีฟิล์มบางชนิดที่ให้ผลแตกต่างจากทฤษฎีที่ว่าคุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านของฟิล์มจะสูงขึ้นถ้าความหนาเพิ่มขึ้น (Massey, 2002) เช่น ฟิล์ม OPP20/MCPP25 มีค่า P น้อย

กว่าฟิล์ม OPP28/MCPP25 ที่มีความหนามากกว่า ทั้งนี้อาจเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของการอบไอโลหะ ทำให้การป้องกันการซึมผ่านของฟิล์มมีประสิทธิภาพลดลง

2.2 ฟิล์มที่มีการป้องกันการซึมผ่านได้ดี มีค่า P ประมาณ 0.0760 – 0.1519 กรัม มิลต่อตารางเมตร วันมิลลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิ 38±1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90±2 ฟิล์มในกลุ่มนี้มีทั้งฟิล์มชั้นเดียวและฟิล์มลามิเนต เพียง 2-3 ชั้น โดยจะสังเกตเห็นว่าองค์ประกอบหลักของฟิล์มในกลุ่มนี้เป็นฟิล์ม OPP ที่เป็นชั้นที่มีคุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านได้ดี เนื่องจากผ่านการจัดระเบียบโมเลกุลซึ่งจะเพิ่มคุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านได้ดีกว่าฟิล์มปกติ (งามทิพย์, 2550) โดยฟิล์ม OPP ที่มีความหนามากกว่าจะมีแนวโน้มของค่า P สูงกว่าฟิล์มที่มีความหนาน้อยกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มที่มีองค์ประกอบของฟิล์มอบไอโลหะรวมอยู่ในกลุ่มนี้ด้วย ทั้งนี้ฟิล์มที่มีองค์ประกอบของฟิล์มอบไอโลหะควรมีคุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านได้ดีนั้น อาจเนื่องมาจากข้อบกพร่องในการอบไอโลหะที่ไม่สม่ำเสมอที่ทำให้การซึมผ่านของไอน้ำมากกว่าปกติ

2.3 ฟิล์มที่ป้องกันการซึมผ่านได้ปานกลาง ฟิล์มในกลุ่มนี้เป็นฟิล์มชั้นเดียวเป็นส่วนใหญ่ มีค่า P ระหว่าง 0.2785-0.3688 กรัม มิลต่อตารางเมตร วัน มิลลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิ 38±1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90±2 โดยจะมีค่าใกล้เคียงกันในกลุ่มของ PP และ PE ที่เป็นฟิล์มเดี่ยว จากผลการทดลองพบว่าถึงแม้ความหนาจะต่างกันแต่กลับมีค่าใกล้เคียงกัน อาจมีผลจากคุณภาพของฟิล์มที่ไม่สม่ำเสมอ ฟิล์มชั้นเดียวไม่นิยมใช้บรรจุอาหารที่ไวต่อความชื้นในระดับอุตสาหกรรมเพราะคุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านยังไม่เพียงพอที่จะเก็บรักษาอาหารให้มีอายุการเก็บได้ยาวนานตามต้องการได้ แต่จะใช้ในกรณีที่ผลิตอาหารขายในปริมาณน้อย อายุการวางขายไม่นาน เนื่องจากต้นทุนค่าบรรจุภัณฑ์ต่ำ ส่วนฟิล์ม Nylon จะมีค่า P ต่างกันเล็กน้อย คือมีค่าลดลงตามความหนาของฟิล์ม LLDPE ที่นำมาลามิเนต ซึ่งฟิล์ม Nylon โดยทั่วไปจะไม่นิยมนำมาบรรจุอาหารที่ไวต่อความชื้น ส่วนใหญ่มักใช้ทำถุงบรรจุอาหารภายใต้สุญญากาศ ทำถุงบรรจุข้าวสาร เป็นต้น อาหารดังกล่าวถึงแม้จะไม่ใช่อาหารที่ไวต่อความชื้น แต่คุณสมบัติด้านการป้องกันการซึมผ่านไอน้ำ เป็นคุณสมบัติหนึ่งที่สามารถนำไปเป็นองค์ประกอบในการพิจารณาเลือกใช้ฟิล์มได้

เมื่อคำนวณหา E_g สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มพลาสติกตัวอย่างแต่ละชนิด (ตารางที่ 4) พบว่า E_g ของฟิล์มมีความแตกต่างกัน เนื่องจากฟิล์มแต่ละชนิดมีค่า P ของไอน้ำ

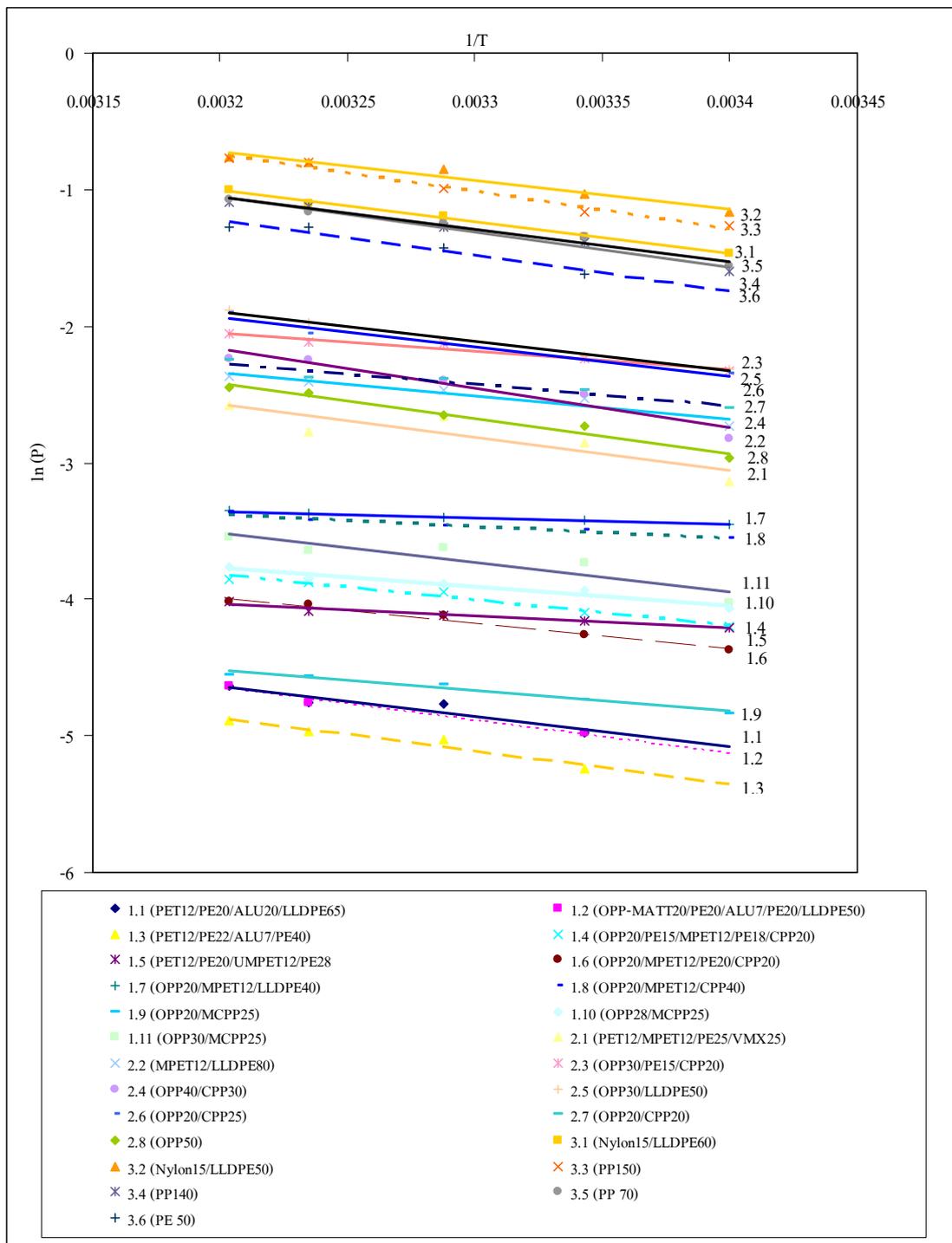
ที่ต่างกัน ประกอบกับความแตกต่างของ P ในแต่ละอุณหภูมิของฟิล์มแต่ละชนิด ไม่เท่ากันเนื่องจาก โครงสร้างที่แตกต่างกันของฟิล์ม ทำให้ความชัน (E_u/R) มีค่าแตกต่างกัน ทำให้ค่า E_u ที่ได้มีค่า แตกต่างกันตามค่าความชันของกราฟ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ค่า E_u สามารถแสดงถึงความไวในการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงได้ นั่นคือหากฟิล์มมีค่า E_u สูงแสดงว่ามีความไวต่อ อุณหภูมิมากกว่าฟิล์มที่มีค่า E_u ต่ำ ค่า E_u สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มพลาสติก แต่ละชนิด สามารถจัดกลุ่มได้เป็น 3 กลุ่ม ตามความไวต่ออุณหภูมิ คือ 1) ฟิล์มที่มีค่า E_u ต่ำ มีค่า 4.0490-7.4739 กิโลจูลต่อโมล 2) ฟิล์มที่มีค่า E_u ปานกลาง มีค่า 11.1990-15.3967 กิโลจูลต่อโมล และ 3) ฟิล์มที่มีค่า E_u สูง มีค่า 18.1278-24.6344 กิโลจูลต่อโมล จากการทดลองจะเห็นว่าฟิล์มที่ นำมาทดลองกว่า 15 ชนิด เป็นฟิล์มที่มีความไวสูงต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (มีค่า E_u สูง) มี ฟิล์ม 7 ชนิดที่ไวต่ออุณหภูมิในระดับปานกลาง มีฟิล์มเพียง 3 ชนิดที่ไม่ไวต่ออุณหภูมิ (มีค่า E_u ต่ำ) ดังนั้นหากนำฟิล์มที่มีความไวต่ออุณหภูมิตำมาทำนายอายุการเก็บของอาหารโดยไม่ปรับเปลี่ยนค่า P ตามที่ใช้งานจริงก็จะได้ข้อมูลอายุการเก็บที่ผิดจากความจริง

เมื่อพิจารณาค่า E_u ของฟิล์มชนิดต่าง ๆ ที่นำมาศึกษา (ตารางที่ 4) จะสังเกตเห็นได้ว่า ฟิล์มเดี่ยว เช่น PP150 PP140 PP70 PE50 และ OPP50 จะมีค่า E_u สูงกว่าฟิล์มหลายชั้น เมื่อ เปรียบเทียบฟิล์มหลายชั้นที่มีฟิล์มชนิดเดียวกันเป็นองค์ประกอบแต่ความหนาต่างกัน จะพบว่าการ เพิ่มความหนาของฟิล์มตัวใดตัวหนึ่งก็จะส่งผลให้ค่า E_u ของฟิล์มสูงขึ้น เช่น ค่า E_u ของฟิล์ม OPP30/MCPP25 (18.16 กิโลจูลต่อโมล) มีค่าสูงกว่าค่า E_u ของฟิล์ม OPP20/MCPP25 (12.42 กิโลจูลต่อ โมล) และค่า E_u ของฟิล์ม OPP20/CPP25 (17.96 กิโลจูลต่อ โมล) มีค่าสูงกว่าค่า E_u ของ ฟิล์ม OPP20/CPP20 (12.93 กิโลจูลต่อ โมล) เป็นต้น และเมื่อเพิ่มความหนาของฟิล์มทั้งสองชนิดก็ จะให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน เช่น ฟิล์ม OPP40/CPP30 จะมีค่า E_u สูงกว่าฟิล์ม OPP20/CPP20 ที่มี ความหนาน้อยกว่า ดังนั้นความหนาของฟิล์มที่เพิ่มขึ้นจะมีผลให้ค่า E_u ของฟิล์มเพิ่มมากขึ้นด้วย

จากการใช้งานของค่า E_u ที่สะท้อนถึงความไวต่ออุณหภูมิของฟิล์ม จึงได้มีการ พิจารณาถึงการใส่ค่า P ในการประเมินความไวต่ออุณหภูมิของฟิล์มด้วย จากความสัมพันธ์ ระหว่าง $\ln(P)$ กับค่า $1/T$ ดังภาพที่ 4 จะเห็นได้ว่าพลาสติกที่มีค่า P ในกลุ่มเดียวกันบางชนิดมี ความชันของกราฟใกล้เคียงกัน เช่นฟิล์มที่ป้องกันการซึมผ่านได้ปานกลาง (หมายเลข 3.1-3.6) ซึ่ง มีค่า E_u อยู่ในกลุ่มเดียวกัน แต่เมื่อพิจารณาฟิล์มที่ป้องกันการซึมผ่านได้ดีมาก (หมายเลข 1.1-1.11) และ ดี (หมายเลข 2.1-2.8) ความชันของกราฟจะไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจึงไม่สามารถ สรุปได้ว่าฟิล์มที่มีค่า P ในกลุ่มเดียวกันจะมีค่า E_u อยู่ในกลุ่มเดียวกันด้วย

ตารางที่ 4 พลังงานก่อกัมมันต์ของฟิล์มชนิดต่างๆ ที่มีการจัดกลุ่มโดยใช้วิธีการจัดกลุ่มแบบ
คลัสเตอร์

กลุ่ม/ชนิดฟิล์ม	E_a (กิโลจูลต่อโมล)
กลุ่มที่ 1	
OPP20/MPET12/LLDPE40	4.0490
PET12/PE20/UMPET12/PE28	7.3271
OPP20/MPET12/PP40	7.4739
กลุ่มที่ 2	
OPP20/PE15/MPET12/PE18/PP20	15.3967
OPP20/MPET12/PE20/PP20	15.3967
OPP20/MCPP25	12.4170
OPP28/MCPP25	11.3594
MPET12/LLDPE80	14.3408
OPP30/PE15/PP20	11.1990
OPP20/PP20	12.9308
กลุ่มที่ 3	
PET12/PE20/ALU20/LLDPE65	18.4538
OPP-MATT20/PE20/ALU7/PE20/LLDPE50	24.6344
PET12/PE22/ALU7/PE40	20.2122
PET12/MPET12/PE25/VMX25	19.8738
OPP30/MCPP25	18.1594
OPP40/PP30	24.0857
OPP30/LLDPE50	18.1278
OPP20/PP25	17.9591
Nylon15/LLDPE60	19.4223
Nylon15/LLDPE50	17.4868
PP150	22.7230
PP140	21.7070
PP 70	19.4149
PE 50	21.3171
OPP 50	21.3911



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(P)$ กับ $1/T$ ของฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ

สำหรับ ค่า E_u ที่มีความสำคัญในการนำมาใช้ปรับค่า P ของไอน้ำของฟิล์มให้เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่ต้องการได้หากรับค่า P ที่อุณหภูมิหนึ่ง ตามสมการที่ (13) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการทำนายอายุการเก็บของอาหารที่ไวต่อความชื้นได้ ผลการใช้งานของค่า E_u กับการทำนายอายุการเก็บของอาหารที่ไวต่อความชื้น ดังข้อ 3.3

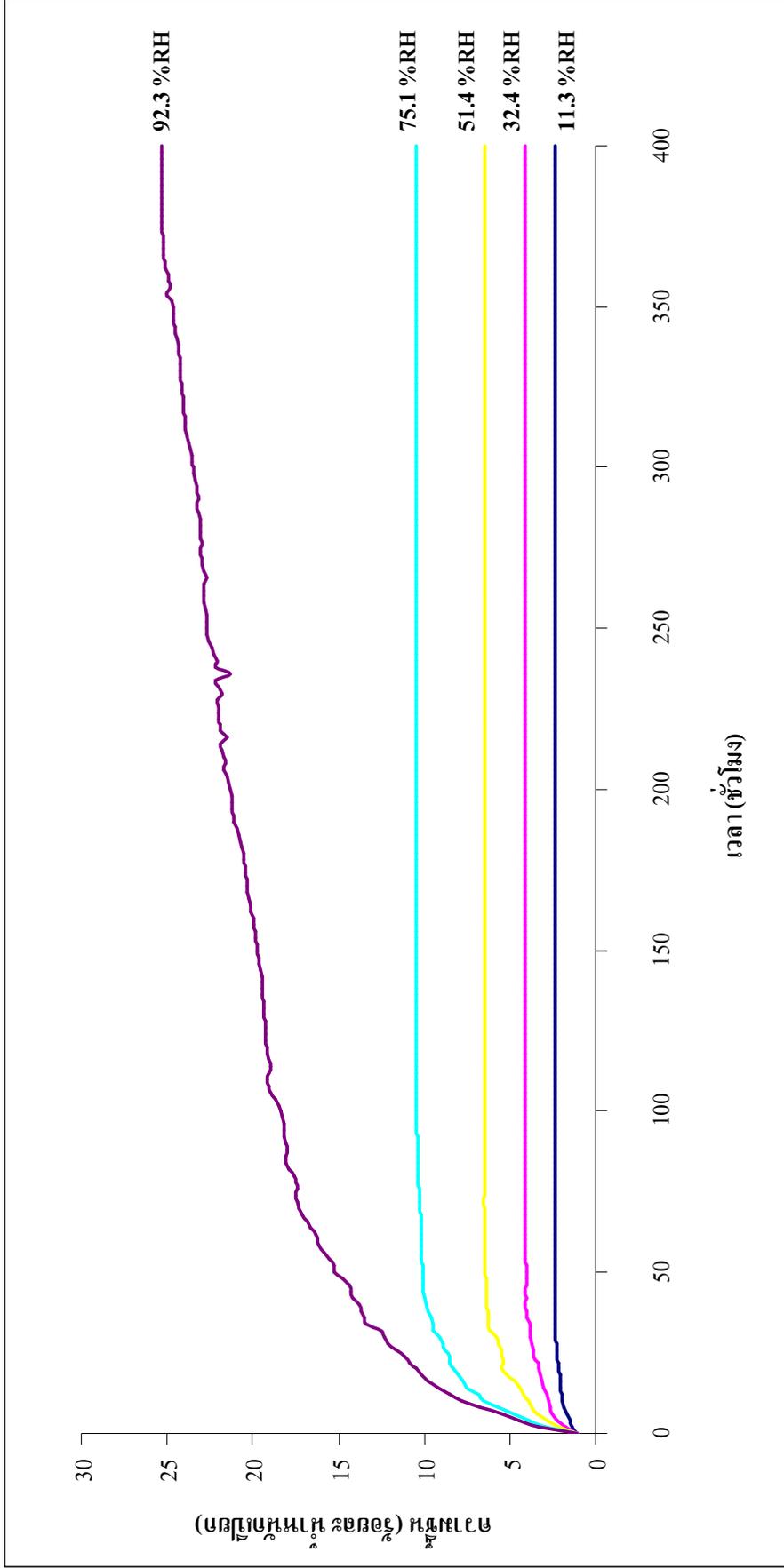
ดังนั้นการหาค่า E_u สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของตัวอย่างฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ ที่ได้ศึกษามา จึงเป็นฐานข้อมูลที่จะสะดวกในการนำมาใช้ในการปรับค่า P โดยไม่ต้องเสียเวลา เสียค่าใช้จ่ายไปทดสอบหรือวัดค่าในแต่ละอุณหภูมิใหม่

3. การศึกษาประสิทธิภาพในการทำนายอายุการเก็บของอาหารที่ไวต่อความชื้น โดยใช้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ กรณีศึกษา: ขนมหึง

3.1 ลักษณะการดูความชื้นของขนมหึง

3.1.1 จลนพลศาสตร์การดูความชื้นของขนมหึง

จลนพลศาสตร์การดูความชื้นของขนมหึง ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 30 ± 1 องศาเซลเซียส ผลดังภาพที่ 5 กราฟการดูชื้นน้ำของขนมหึงที่ระดับความชื้นต่างๆ พบว่าการดูความชื้นเกิดขึ้นรวดเร็วในระยะแรก และลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลในแต่ละสภาวะความชื้นที่ทดสอบ โดยที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 11.3 32.4 และ 51.4 ลักษณะกราฟที่พบมีแนวโน้มเดียวกัน เวลาที่ใช้ในการดูความชื้นจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลของขนมหึงที่ความชื้นสัมพัทธ์ดังกล่าวเท่ากับ 34 60 76 และ 100 ชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนการดูความชื้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 92.5 ใช้เวลาประมาณ 384 ชั่วโมง ในการเข้าสู่สมดุล ซึ่งมากกว่าระดับความชื้นต่ำอย่างเห็นได้ชัดซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองอื่นที่พบว่าที่ระดับความชื้นสูงการเกิดการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer) จะเกิดขึ้นช้ามาก (Baucour and Daudin, 2000; Wolf *et al.*, 1985; Trujillo *et al.*, 2003) หลังจากปรับเส้นกราฟด้วยรูปแบบเชิงประจักษ์ของ Peleg (1988) ตามสมการที่ (15) ได้ค่าคงที่ k_1 k_2 และค่า R^2 ดังปรากฏบนตารางที่ 5 และเมื่อพิจารณาผลการ



ภาพที่ 5 ลักษณะการดูดความชื้นของขมฝิ่งที่เก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 11.3 32.4 51.4 75.1 และ 92.3 ที่อุณหภูมิ 30±1 องศาเซลเซียส

ทดสอบกับรูปแบบเชิงประจักษ์พบว่า ปริมาณความชื้นที่ดูดซึมเข้าไป ($1/k_2$) และอัตราการดูดความชื้นของขนมฝิง ($1/k_1$) จากค่าคงที่ k_1 และ k_2 ดังตารางที่ 5 พบว่าอัตราการดูดความชื้นและปริมาณความชื้นที่ดูดซึมเข้าไปที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 11.3 32.4 51.4 และ 75.7 จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น (k_1 และ k_2 ลดลง) ยกเว้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 95.5 มีอัตราการดูดความชื้นต่ำ (k_1 สูง) แต่ปริมาณความชื้นที่ดูดซึมสูง (k_2 ต่ำ) ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะแวดล้อมที่ศึกษามีความชื้นสูงจึงทำให้อัตราการดูดซึมต่ำ (Pinto and Esin, 2004)

เมื่อพิจารณา ค่า R^2 ในตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าทุกสภาวะที่ทำศึกษามีค่าตั้งแต่ 0.92–0.97 ซึ่งแสดงว่ารูปแบบเชิงประจักษ์ที่นำมาใช้ปรับเส้นโค้งของกราฟได้ดี

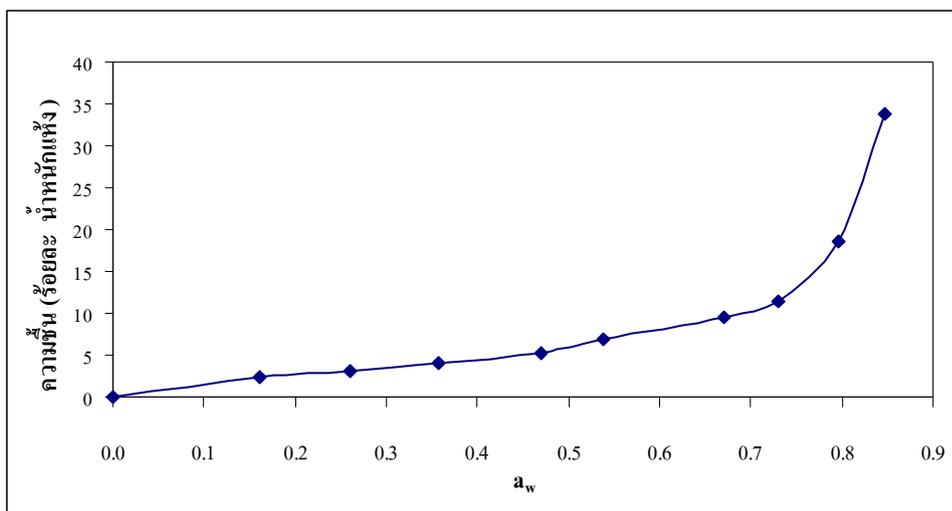
ตารางที่ 5 ค่าคงที่ของรูปแบบเชิงประจักษ์ที่ใช้ปรับเส้นโค้งของการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดความชื้นของขนมฝิง ที่อุณหภูมิ 30 ± 1 องศาเซลเซียส และ R^2 ที่ระดับความชื้นต่างๆ

ความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ)	ขนมฝิง		
	k_1	k_2	R^2
11.3	3.3244	0.7654	0.9286
32.4	1.8622	0.3047	0.9429
51.4	1.0940	0.1652	0.9391
75.7	0.6435	0.0913	0.9634
92.5	1.7978	0.0278	0.9650

3.1.2 การดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่

ผลการศึกษาการดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ ของขนมฝิงที่อุณหภูมิ 30 ± 1 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 6 โดยทำการศึกษาการดูดความชื้นของขนมในสภาวะที่มีค่า A_w แตกต่างกัน 9 ระดับ ตั้งแต่ 0.113–0.923 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า A_w กับความชื้นได้เป็นแบบที่ 2 หรือที่เรียกว่าซิกโมดอล เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถละลายได้ โดยเส้นกราฟที่ได้จะมีลักษณะโค้ง ตามรูปแบบที่ 2 และ 4 ซึ่งจะพบมากในผลิตภัณฑ์อาหาร (Brunauer *et al.*, 1940; Mathlouthi and Roge, 2001) และสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลักเช่น ผลิตภัณฑ์แป้ง เช่น มันฝรั่งและแป้งสาลี (Van den Berg, 1981) คุกกี้และแป้งข้าวโพดอบกรอบ

(Palou *et al.*, 1997) บิสกิต (Cadden, 1988; Durakova and Menkov, 2005; Erbas *et al.*, 2005) โดยเส้นกราฟที่ได้จะดูความชื้นมากในช่วงแรกและจะลดปริมาณการดูดความชื้นเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น และปริมาณความชื้นสมดุลจะเพิ่มขึ้นตามค่า A_w ที่เพิ่มสูงขึ้น และจากการศึกษาการดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ของขนมฝักรูปที่อุณหภูมิ 30 ± 1 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นที่จุดสมดุลเพิ่มขึ้นสูงมากอย่างเห็นได้ชัดเจน เมื่อ A_w เท่ากับ 7.3 โดยจะเริ่มสูงขึ้นตั้งแต่ A_w ประมาณ 0.5-0.73 ซึ่งใกล้เคียงกับบิสกิต ที่มีปริมาณความชื้นเพิ่มสูงในช่วง A_w ประมาณ 0.5-0.75 (Arogba, 2001) แต่เมื่อเทียบกับการดูดความชื้นของสตาร์ชที่ได้จากแป้งมัน (Chang *et al.*, 2006) การดูดความชื้นของขนมฝักรูปจะน้อยกว่าสตาร์ชที่ระดับ A_w เดียวกัน ซึ่งได้มีการตีพิมพ์ในงานวิจัย Iglesias and Chirife (1982) ได้วิเคราะห์สาเหตุที่ผลิตภัณฑ์มีการดูดน้ำลดลงเนื่องจากขนมฝักรูปมีส่วนผสมของไขมันอยู่ด้วย เนื่องจากโมเลกุลของไขมันไม่ชอบน้ำ ทำให้ดูดน้ำได้น้อยลง



ภาพที่ 6 การดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ของขนมฝักรูป ที่อุณหภูมิ 30 ± 1 องศาเซลเซียส

เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาปรับเส้นโค้งการดูดความชื้นโดยใช้รูปแบบเชิงประจักษ์ ผลดังตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่า GAB สามารถปรับเส้นโค้งของกราฟการดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ของขนมฝักรูปได้ดีที่สุด โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9976 และมีค่า % RMS ที่มีค่าต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 3.1309 เนื่องจาก GAB เหมาะสมกับการปรับเส้นโค้งของกราฟการดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ของอาหารที่มีค่า A_w มากกว่า 0.10 แต่น้อยกว่า 0.90 (Timmerman *et al.*, 2001) Peleg และ Lewicki เป็นอีกรูปแบบที่เหมาะสมต่อการนำมาปรับเส้นโค้งการดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ของขนมฝักรูปที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9991 และ 0.9888 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงใกล้ 1 มาก และให้ผลสอดคล้องกับค่า % RMS ที่มีค่าต่ำ เท่ากับ 3.6487 และ 4.7429

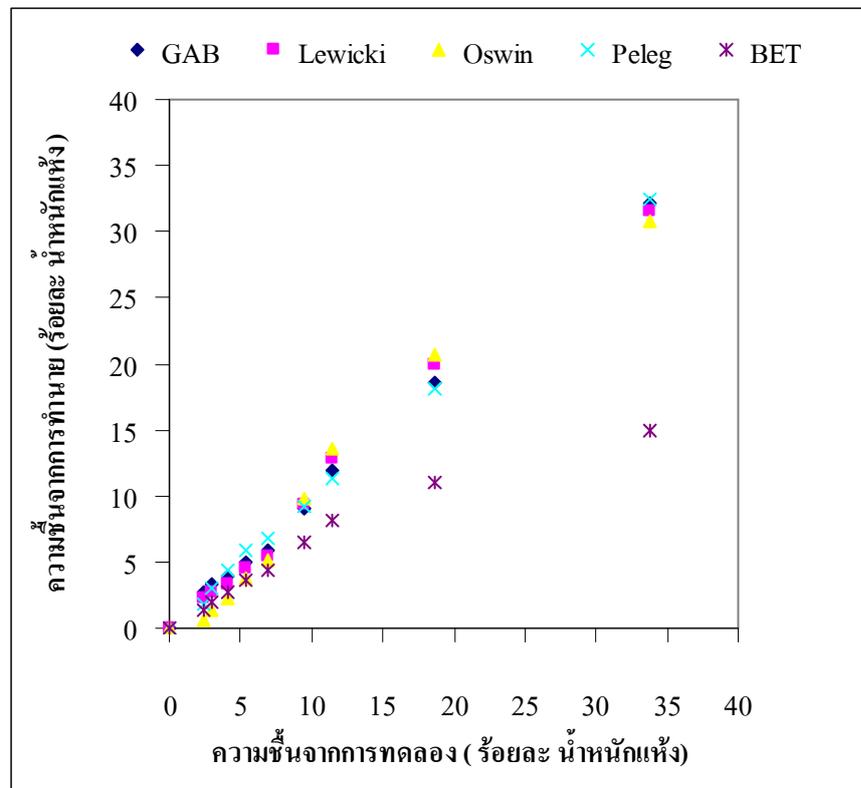
ตามลำดับ โดยที่ Peleg สามารถใช้ปรับเส้นโค้งของข้อมูลทั้งแบบที่เป็นซิกโมดอล และแบบอื่น แต่ค่าคงที่ที่ใช้คำนวณนั้นไม่มีข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ สำหรับ Lewicki ซึ่งพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถใช้กับข้อมูลที่มีช่วงของค่า A_w สูงๆ โดยให้ค่า x เท่ากับ 0 เมื่อ A_w เท่ากับ 0 และ x เท่ากับ ∞ เมื่อ A_w เท่ากับ 1 (Lewicki, 1998) รูปแบบนี้เหมาะกับข้อมูลการดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ที่มีความชื้นสูงและใช้ทำนายปริมาณความชื้น (x) ไม่มีที่สิ้นสุด เมื่อ A_w เท่ากับ 1 ใช้ได้กับอาหาร อย่างไรก็ตามก็ไม่เหมาะกับช่วงความชื้นที่แคบๆ เช่น A_w เท่ากับ 0.60 ถึง 0.90 (Trujillo *et al*, 2003)

ตารางที่ 6 ตัวแปรของรูปแบบเชิงประจักษ์ต่างๆ ที่นำมาใช้ปรับเส้นโค้งของกราฟ R^2 และ % RMS ของขนมปัง

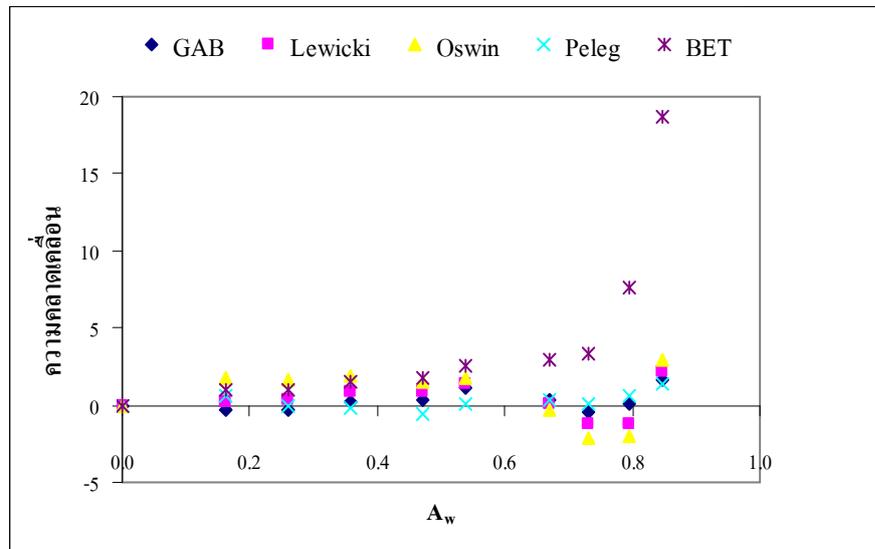
รูปแบบสมการ	ค่าคงที่	R^2	%RMS
GAB	$m_0 = 2.4598$ $C = 49.0599$ $k = 1.0904$	0.9976	3.1309
Lewicki	$F = 1.6765$ $G = 1.5727$ $H = -3.9982$	0.9888	4.7429
Oswin	$k = 4.3764$ $c = 1.1409$	0.9668	13.9072
Peleg	$a = 335.0922$ $b = 16.6709$ $c = 13.6947$ $d = 1.1218$	0.9991	3.6487
BET	$m_0 = 2.3867$ $C = 4.6705$	0.9481	6.6812

ส่วน Oswin และ BET ไม่เหมาะเท่ากับ 3 รูปแบบที่กล่าวข้างต้น เนื่องจากมีค่า R^2 ต่ำ เท่ากับ 0.9668 และ 0.9481 ตามลำดับ และมีค่า % RMS เท่ากับ 13.9072 และ 6.6812 ซึ่งสูงกว่า

จากการเปรียบเทียบค่าปริมาณความชื้นจากการทดลองและค่าที่ทำนายได้จากรูปแบบเชิงประจักษ์ต่างๆที่ใช้ปรับเส้นโค้ง ในภาพที่ 7 จะเห็นว่า ค่าที่ทำนายจากรูปแบบของ GAB Peleg และLewicki มีแนวโน้มเดียวกัน คือค่าทำนายกับค่าจริงมีค่าใกล้เคียงกันมากจนมีความสัมพันธ์ในลักษณะเป็นเส้นทะแยงมุม ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความคลาดเคลื่อน ดังภาพที่ 8 ที่มีการกระจายตัวน้อยเมื่อใช้ GAB Peleg และ Lewicki ทำนาย ดังนั้นรูปแบบเชิงประจักษ์ทั้ง 3 รูปแบบจึงเหมาะที่จะใช้ทำนายการดูดความชื้นของขนมฝังที่อุณหภูมิ 30 ± 1 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 7 การเปรียบเทียบปริมาณความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลองกับการทำนาย



ภาพที่ 8 การกระจายตัวของความคลาดเคลื่อน ที่เกิดจากการประเมินความเหมาะสมในแต่ละรูปแบบเชิงประจักษ์ที่ใช้ในการปรับเส้นโค้งการดูดความชื้น

3.2 อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อคุณภาพของขนมปัง

3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ

องค์ประกอบทางเคมีของขนมปังที่ทำการศึกษา ผลดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของขนมปัง

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละ น้ำหนักเปียก) ±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	วิธีการทดสอบ
คาร์โบไฮเดรต	84.78±0.09	Calculation
โปรตีน	0.63±0.07	Kjeldahl's Method
ไขมัน	10.24±0.09	AOAC
ความชื้น	3.74±0.05	AOAC
เถ้า	0.32±0.01	AOAC
เส้นใย	0.29±0.03	AOAC

ขนมฝingsที่เตรียมขึ้นมีสีขาวนวล มีลักษณะโดยทั่วไปกรอบ เมื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณดังผลในตารางที่ 7 มีปริมาณคาร์โบไฮเดรต และไขมันสูง คือประมาณร้อยละ 84.78 และ 10.24 ตามลำดับ มีความชื้นต่ำ หลังอบและทิ้งให้เย็นแล้วมีลักษณะแข็งกรอบ (glassy stage) เมื่อนำไปวิเคราะห์ A_w ปริมาณความชื้นและ T_g มีค่าเท่ากับ 0.38 ร้อยละ 3.9 และ 148 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3.2.2 คุณภาพทางเนื้อสัมผัส

เมื่อนำขนมฝingsที่ผ่านการปรับสภาวะในสารละลายอิ่มตัวให้ขนมมีความชื้นต่างๆ กันแล้วนำไปทดสอบความแข็ง และงาน ผลดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ความแข็งและงานของขนมฝingsที่ระดับความชื้นและวอเตอร์แอกติวิตีต่างๆ

ความชื้น (ร้อยละ น้ำหนักแห้ง)	A_w	ความแข็ง (กิโลกรัมแรง)	งาน (กิโลกรัมแรง-มิลลิเมตร)
3.114±0.12	0.234	2.028±0.17 ^B	4.041±2.11 ^{AB}
4.048±0.02	0.376	2.699±0.16 ^C	5.302±3.09 ^B
5.240±0.08	0.494	2.717±0.13 ^C	5.467±2.26 ^B
6.343±0.07	0.566	3.083±0.46 ^D	5.329±1.50 ^B
7.567±0.13	0.622	2.139±0.18 ^B	5.592±3.46 ^B
9.072±0.06	0.670	0.852±0.07 ^A	3.137±1.16 ^{AB}
13.381±0.08	0.749	0.637±0.18 ^A	1.761±1.09 ^A

หมายเหตุ : ^{A-D} อักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

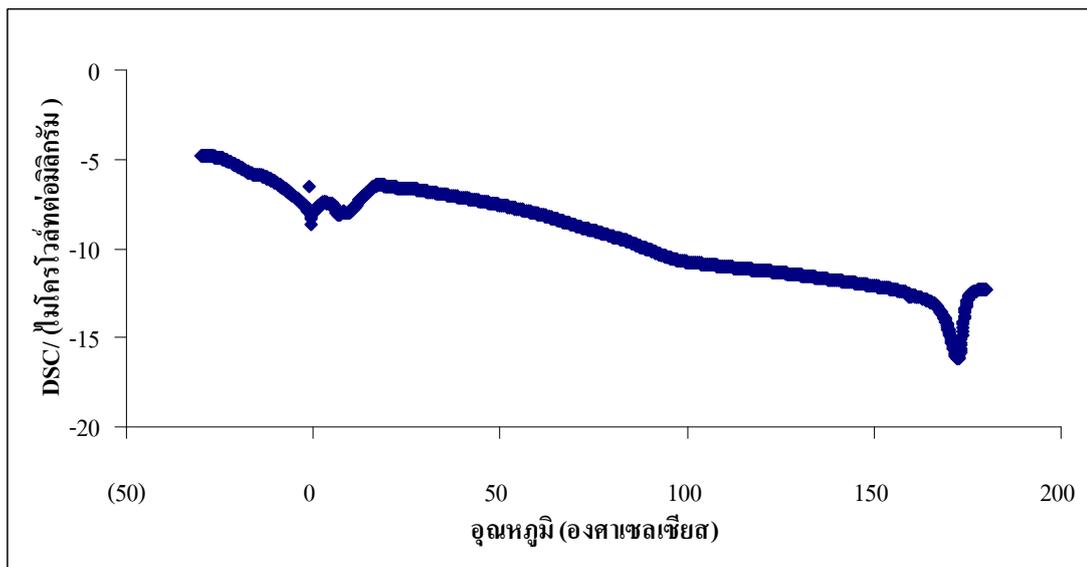
ความแข็ง และงานได้ผลไปในทิศทางเดียวกันคือที่ระดับความชื้นต่ำประมาณร้อยละ 3.114 หรือ A_w เท่ากับ 0.234 จะมีความแข็งและงานต่ำ และเพิ่มตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อนำขนมมีความชื้นสูงกว่าร้อยละ 6 ค่าที่วัดได้ดังกล่าวกลับลดลงเรื่อยๆ โดยที่ระดับค่า A_w ต่ำ (0.23 ถึง 0.54) ความแข็งและงานของขนมฝingsเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่า A_w เพิ่มขึ้น

3.2.3 คุณภาพทางอุณหภาพ

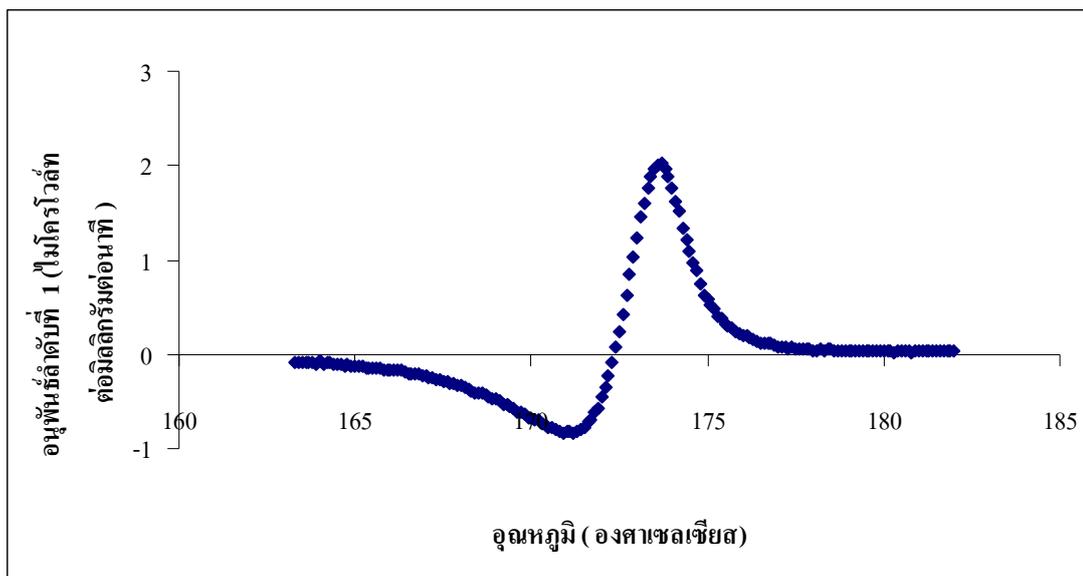
จากการหาค่า T_g ของขนมฝิงที่ระดับความชื้นแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 9 โดยกราฟเทอร์โมแกรม และ อนุพันธ์ลำดับที่ 1 ขนมฝิงที่มีความชื้นแตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 9-20 ปรากฏว่าที่ระดับความชื้นต่ำร้อยละ 0.058 ขนมมีค่า T_g สูง เท่ากับ 173.7 องศาเซลเซียสและเป็นระดับที่ขนมมีความกรอบมากที่สุด แต่เมื่อขนมฝิงมีความชื้นเพิ่มสูงขึ้นค่า T_g จะมีค่าลดลง ความกรอบของขนมฝิงจะลดลงด้วย โดยที่ความชื้นร้อยละ 12.649 (A_w เท่ากับ 0.740) ค่า T_g ที่วิเคราะห์ได้ยังคงมีค่า 102.7 องศาเซลเซียส ซึ่งระดับความชื้นดังกล่าวขนมยังคงอยู่ในสถานะของแข็ง ณ อุณหภูมิห้อง แต่ค่า T_g ลดลงอย่างมาก มีค่าเพียง - 10.1 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ที่ระดับความชื้นร้อยละ 36.046 หรือ A_w เท่ากับ 0.855 ดังนั้นขนมจะมีลักษณะนิ่มหากอยู่ที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 9 อุณหภูมิคล้ายแก้วของขนมฝิงที่ระดับความชื้นและวอเตอร์แอกติวิตีต่างๆ

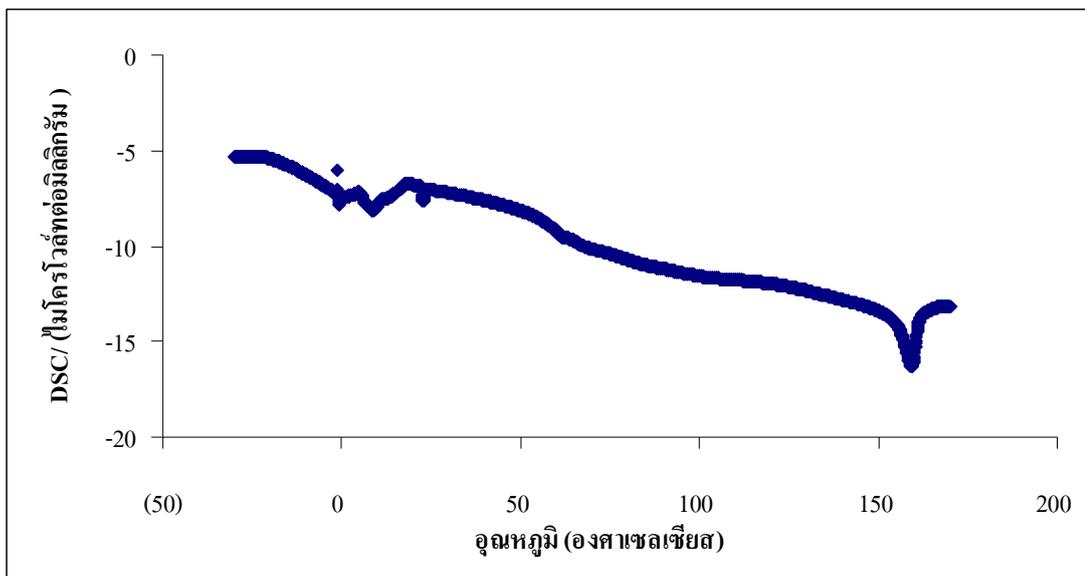
ความชื้น (ร้อยละ น้ำหนักแห้ง)	A_w	T_g (องศาเซลเซียส)
0.058±0.016	-	173.7
2.447±0.039	0.112	160.2
2.809±0.052	0.177	157.6
6.262±0.051	0.561	124.8
12.649±0.150	0.740	102.7
36.046±0.314	0.855	-10.1



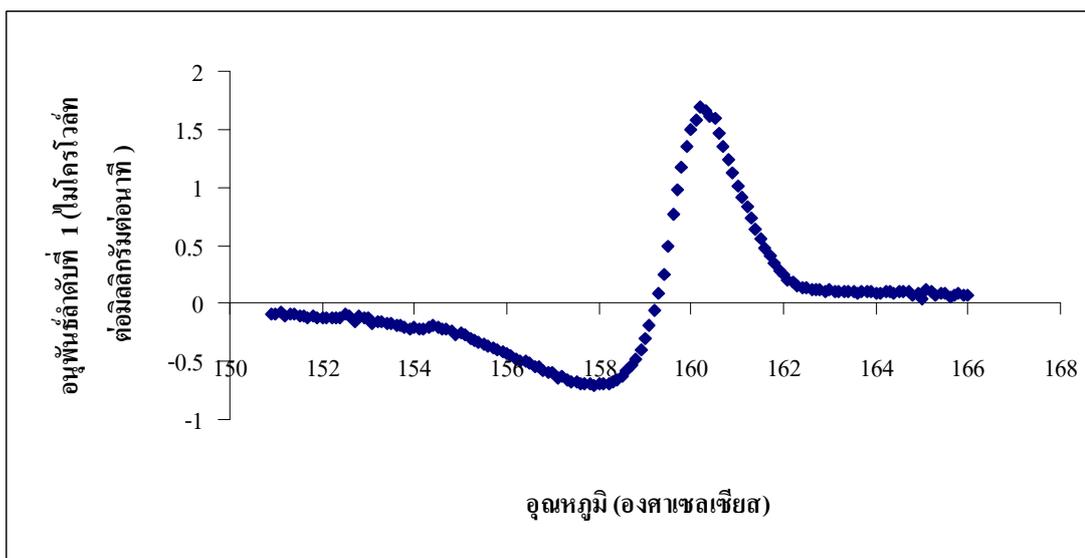
ภาพที่ 9 เทอร์โมแกรมของอนุภาคลายแก้วของขนมฝิ่งที่มีความชื้นร้อยละ 0.058 ± 0.016



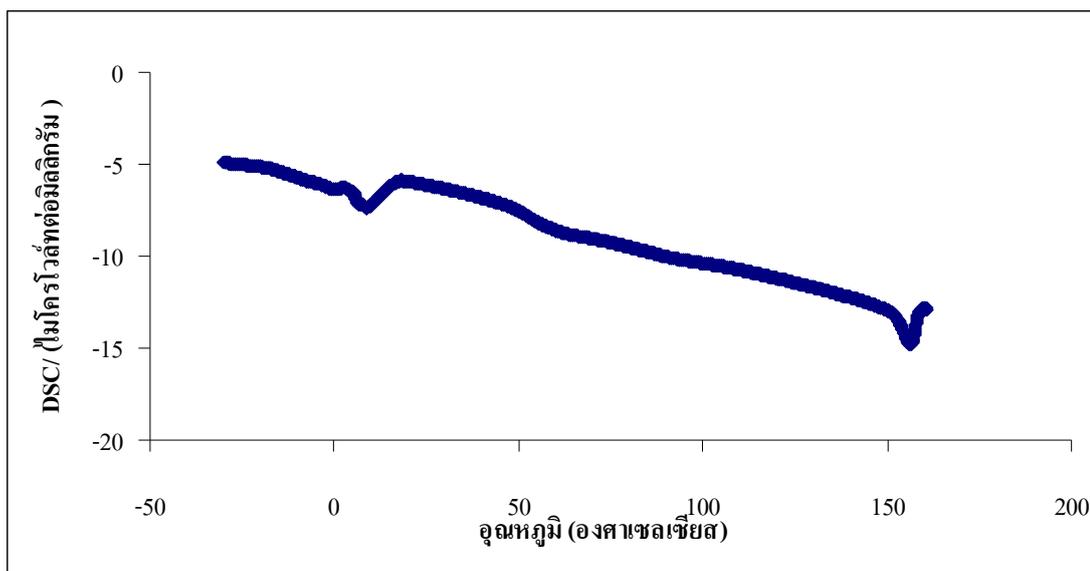
ภาพที่ 10 อนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของอนุภาคลายแก้วของขนมฝิ่งที่มีความชื้นร้อยละ 0.058 ± 0.016



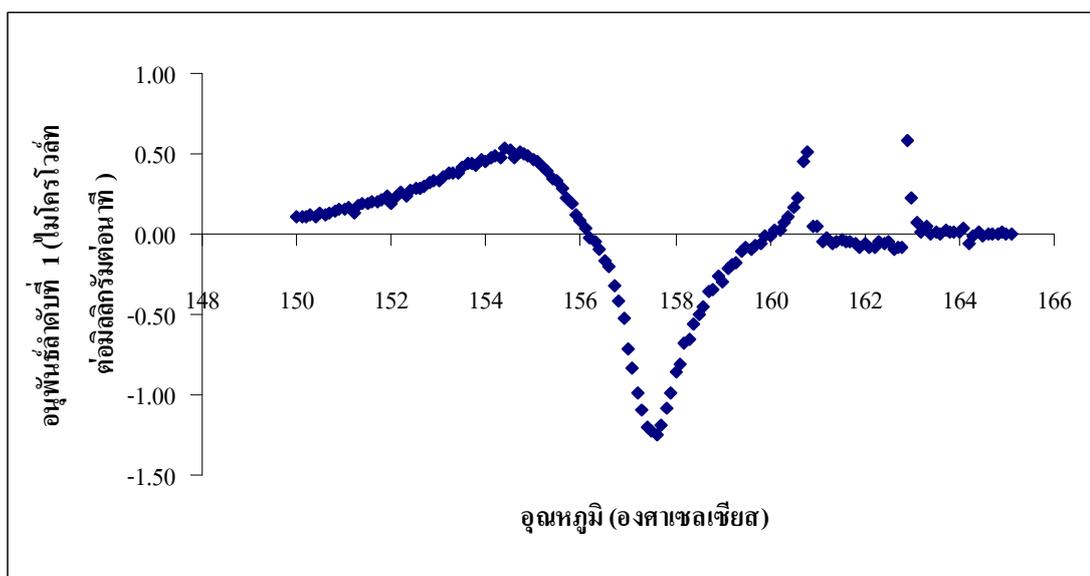
ภาพที่ 11 เทอร์โมแกรมของอุณหภูมิคล้ายแก้วของขนมฟิงที่มีความชื้นร้อยละ 2.447 ± 0.039



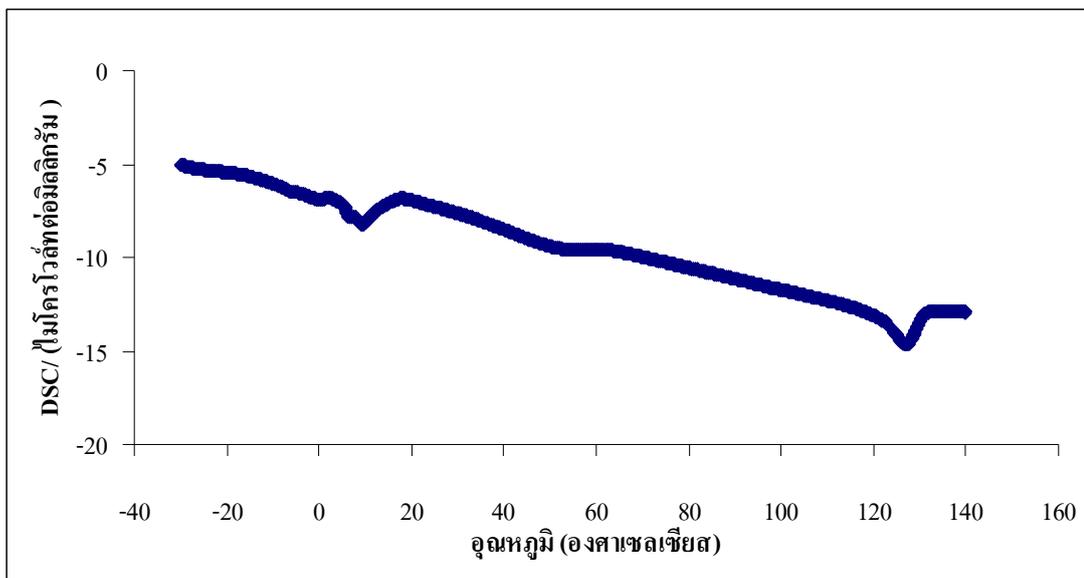
ภาพที่ 12 อนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของอุณหภูมิคล้ายแก้วของขนมฟิงที่มีความชื้นร้อยละ 2.447 ± 0.039



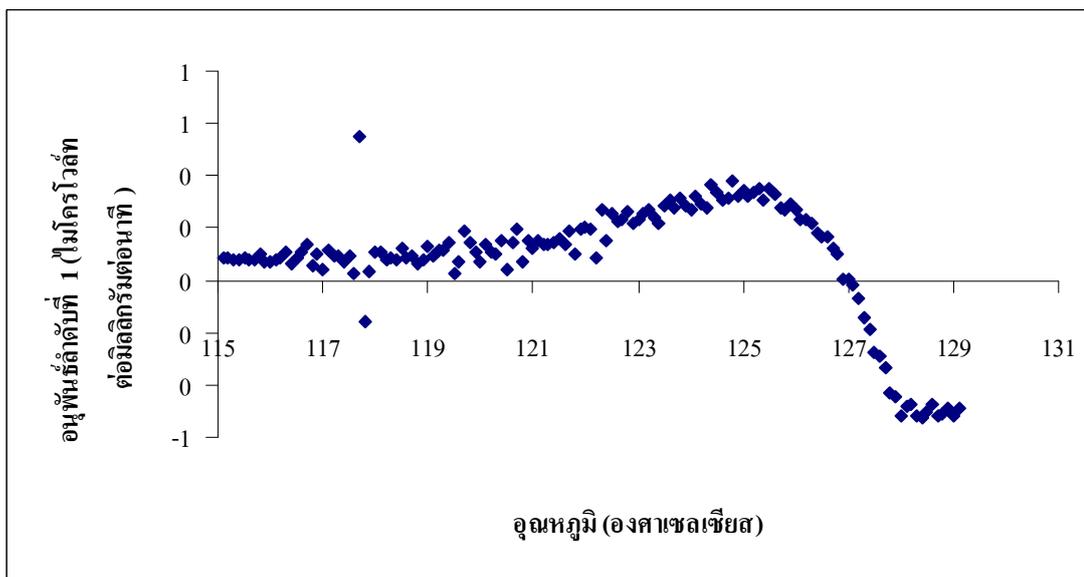
ภาพที่ 13 เทอร์โมแกรมของอุณหภูมิคล้ายแก้วของขนมฝิ่งที่มีความชื้นร้อยละ 2.809 ± 0.052



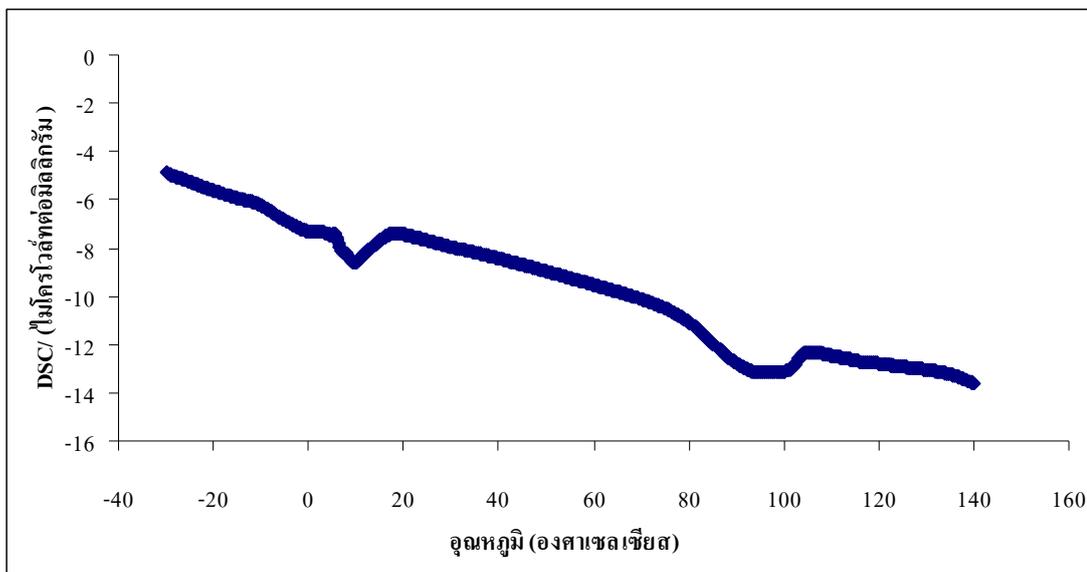
ภาพที่ 14 อนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของอุณหภูมิคล้ายแก้วของขนมฝิ่งที่มีความชื้นร้อยละ 2.809 ± 0.052



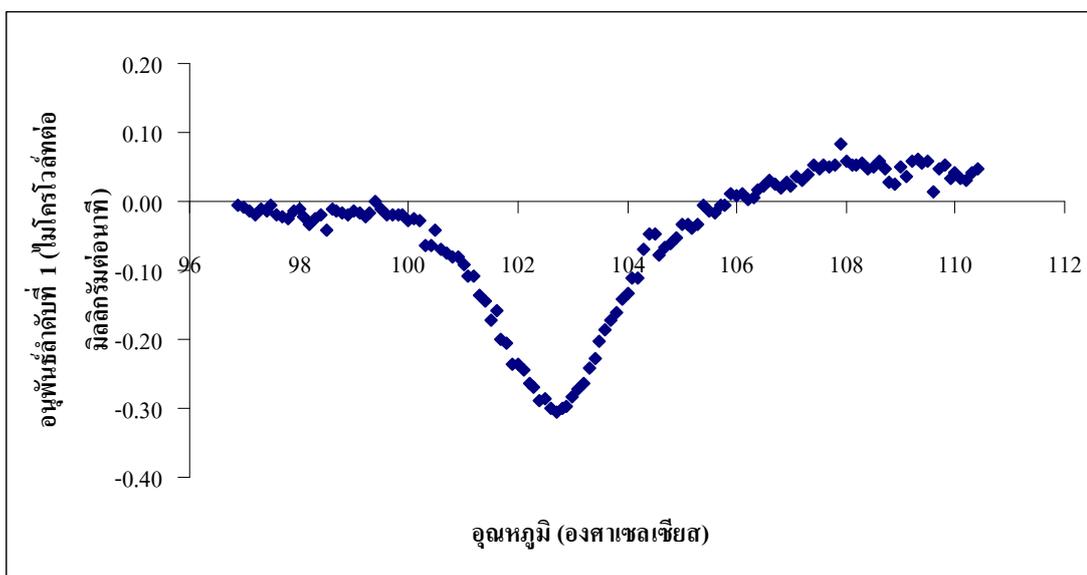
ภาพที่ 15 เทอร์โมแกรมของอุณหภูมิกลายแก้วของขบวนการที่มีความชื้นร้อยละ 6.262 ± 0.051



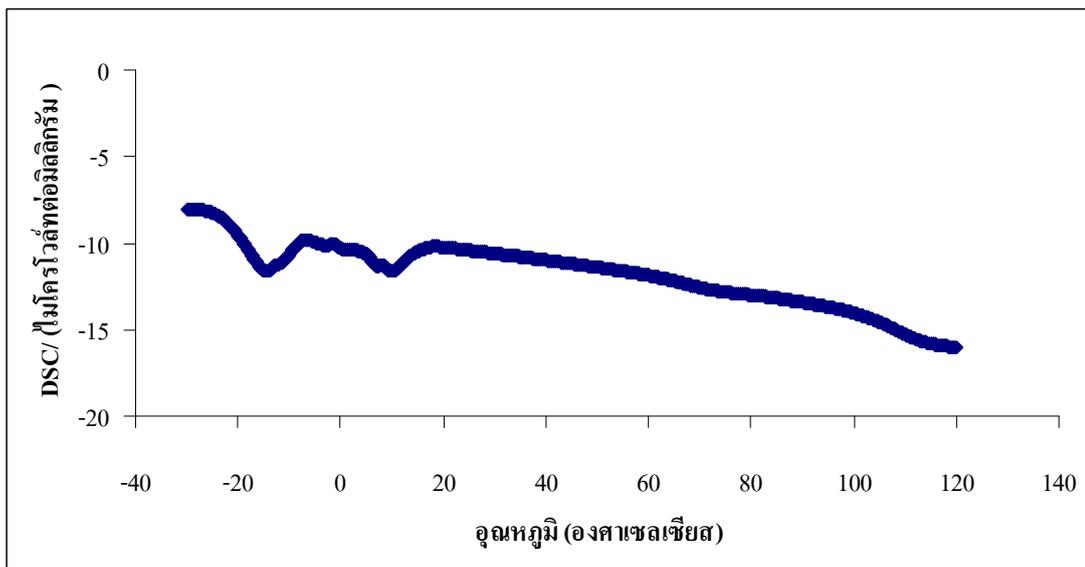
ภาพที่ 16 อนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของอุณหภูมิกลายแก้วของขบวนการที่มีความชื้นร้อยละ 6.262 ± 0.051



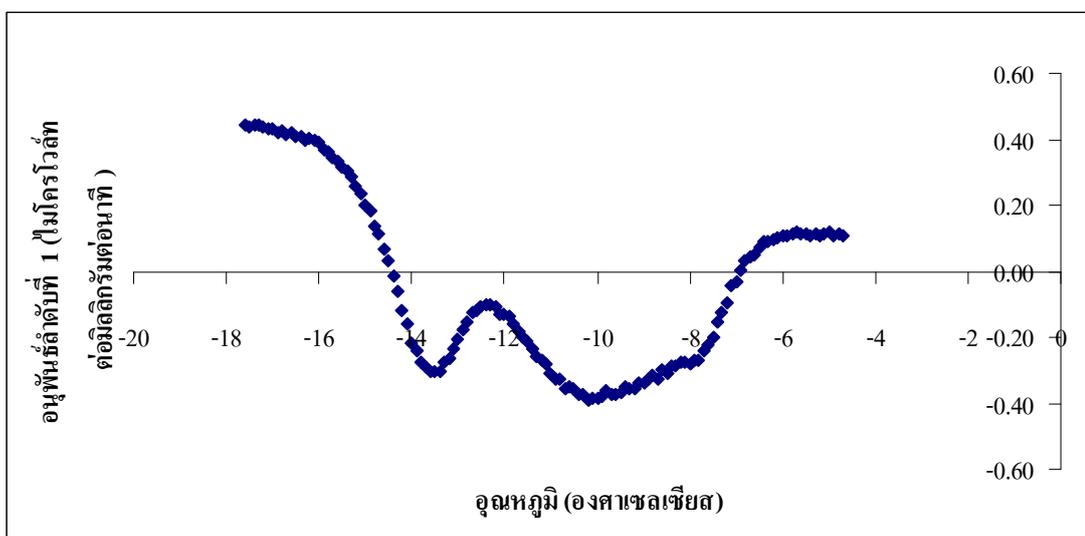
ภาพที่ 17 เทอร์โมแกรมของอุณหภูมิกลายแก้วของขนมฝิงที่มีความชื้นร้อยละ 12.649 ± 0.150



ภาพที่ 18 อนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของอุณหภูมิกลายแก้วของขนมฝิงที่มีความชื้นร้อยละ 12.649 ± 0.150



ภาพที่ 19 เทอร์โมแกรมของอุณหภูมิคล้ายแก้วของขนมฝิ่งที่มีความชื้นร้อยละ 36.046 ± 0.314



ภาพที่ 20 อนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของอุณหภูมิคล้ายแก้วของขนมฝิ่งที่มีความชื้นร้อยละ 36.046 ± 0.314

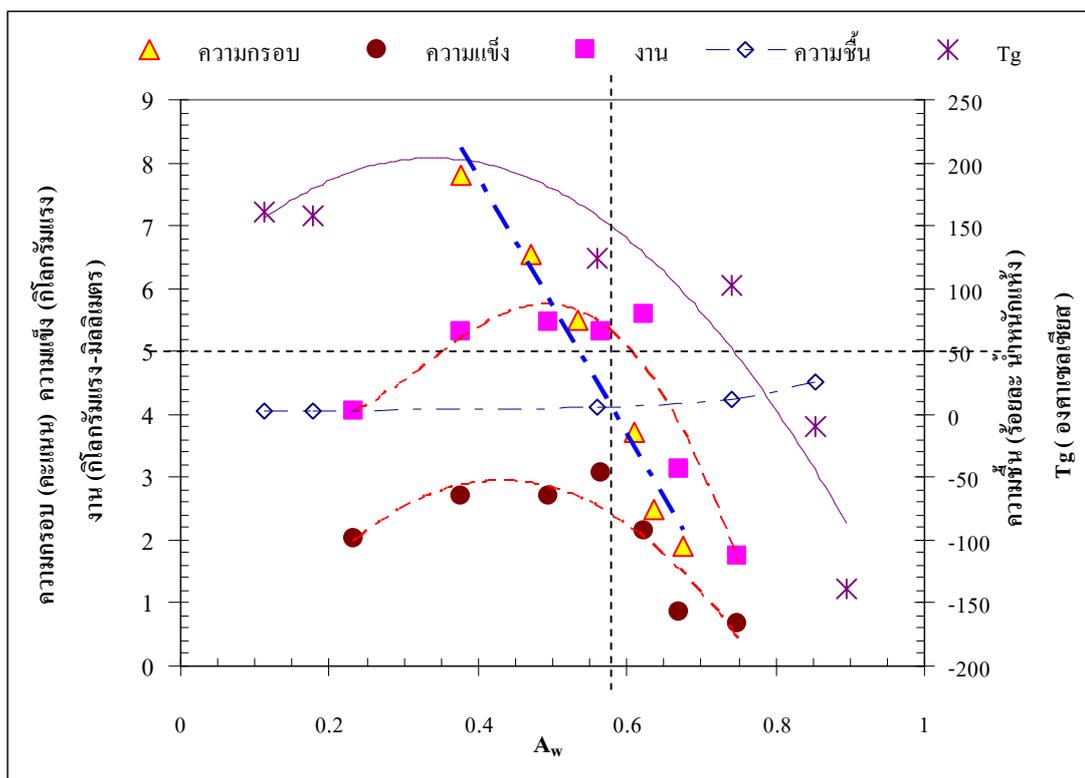
3.2.3 คุณภาพทางประสาทสัมผัส

ความกรอบของตัวอย่างขนมปังสำหรับการวิจัยนี้ได้ใช้การวิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคร่วมด้วย การยอมรับของผู้บริโภคเป็นตัวบ่งชี้ สำหรับตัวอย่างที่ผลิตใหม่มีความชื้นต่ำ กรอบมาก ผู้บริโภคจะให้คะแนนความกรอบเท่ากับ 7.8 (ตารางที่ 10) และมีคะแนนลดลงเรื่อยๆ เมื่อขนมปังมีความชื้นเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 10 ความกรอบของขนมปังที่ระดับความชื้นและวอเตอร์แอกติวิตีต่างๆ

ความชื้น (ร้อยละ น้ำหนักแห้ง)	A_w	ความกรอบ (คะแนน)
4.055±0.05	0.377	7.81±0.32
4.968±0.41	0.472	6.56±0.87
5.819±0.59	0.535	5.50±0.93
7.299±0.51	0.611	3.72±0.71
7.973±0.67	0.637	2.50±0.46
9.223±0.66	0.674	1.92±0.36

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพเนื้อสัมผัส ค่า A_w และค่า T_g ดังภาพที่ 21 จะสังเกตเห็นว่าคะแนนความกรอบเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเมื่อขนมปังมีค่า A_w หรือความชื้นสูงขึ้น ทั้งนี้เพราะลักษณะของขนมปังมีความไวต่อความชื้นสูง ซึ่งจะดูดความชื้นเข้าไปอย่างรวดเร็ว สังเกตที่ตำแหน่งคะแนนความกรอบที่ระดับมากกว่าหรือเท่ากับ 5 ขนมปังจะมีค่า A_w น้อยกว่า 0.54 หรือ มีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 6 (น้ำหนักแห้ง) ขนมปังจะยังมีความกรอบ แต่เมื่อขนมปังมีความชื้นมากขึ้นขนมปังจะสูญเสียความกรอบไป ดังนั้น ณ ตำแหน่งที่ขนมปังมีค่า A_w เท่ากับ 0.54 และความชื้นร้อยละ 6 ณ จุดนี้จึงถือเป็นจุดวิกฤติที่ชี้ว่าขนมปังจะสูญเสียความกรอบหากค่าดังกล่าวมีค่ามากขึ้น ซึ่งค่า A_w วิกฤติของผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่มีองค์ประกอบของสตาร์ช และโปรตีนเป็น โครงสร้างหลัก เช่นเดียวกันจะมีค่า A_w วิกฤติประมาณ 0.5 (Katz and Labuza, 1981; Roos *et al.*, 1998; Hough *et al.*, 2001) ผลิตภัณฑ์ขนมอบใช้แป้งมันเป็นองค์ประกอบหลักดังเช่นขนมปังซึ่งมีแป้งและ โปรตีนเป็น โครงสร้างหลักที่ทำให้ขนมปังมีความกรอบ แต่โครงสร้างนี้จะนุ่มลงเมื่อดูดความชื้นเข้าไปสูงกว่าความชื้นวิกฤติ (Katz and Labuza, 1981; Martinez-Navarrete *et al.*, 2004)



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างวอเตอร์แอกติวิตี คุณลักษณะเนื้อสัตว์ และอุณหภูมิคล้ายแก้วของขนมฝิง

จากค่า A_w ที่จุดวิกฤติของขนมฝิงที่ใช้เป็นกรณีศึกษาซึ่งมีค่าประมาณ 0.54 หรือความชื้นประมาณร้อยละ 6 ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าน้ำในระดับมอโนเลเยอร์ของขนมฝิงที่มีค่า A_w เท่ากับ 0.112 หรือมีความชื้นร้อยละ 2.5 (น้ำหนักแห้ง) และที่จุดวิกฤตินี้ขนมฝิงยังอยู่ในสถานะคล้ายแก้ว คือมีความแข็งกรอบเนื่องจากขนมฝิงมีค่า T_g เท่ากับ 160.2 องศาเซลเซียส

ความกรอบของขนมฝิงที่วัดโดยใช้เครื่องมือ ที่แสดงผลในรูปของแรงที่ใช้ในการกดให้แตก และงาน (ดังภาพที่ 21) มีค่ามากขึ้นเมื่อขนมมีความชื้นเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าเพิ่มสูงจนกระทั่งสูงสุดที่ระดับ A_w ประมาณ 0.54 (จุดวิกฤติ) แต่เมื่อ A_w สูงกว่า 0.54 แรงและงานกลับมีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนมสูญเสียความกรอบไป และเมื่อพิจารณาที่ระดับคะแนนความกรอบ ณ ตำแหน่งเดียวกัน (A_w ประมาณ 0.54) จะมีคะแนนเท่ากับ 5 ดังนั้นผลของค่าแรงและงานที่วัดได้สามารถใช้เป็นตัวกำหนดระดับความชื้นวิกฤติของผลิตภัณฑ์โดยมีความสอดคล้องกับ

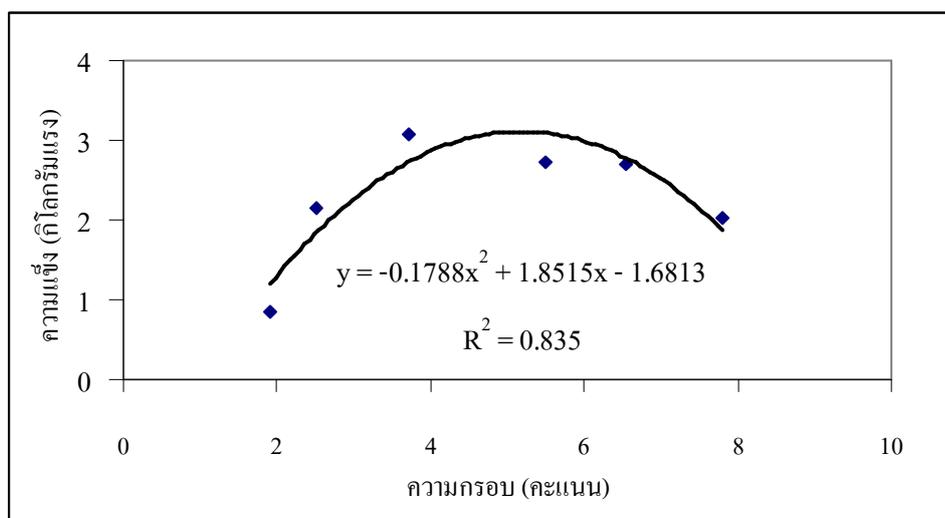
คะแนนความกรอบของผู้บริโภค ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกันกับการทดลองของ Roudaut *et al.* (1998) ที่ได้ทดลองกับขนมปังกรอบ

ค่า T_g ของขนมปังจะมีความสัมพันธ์กับค่า A_w ของผลิตภัณฑ์ ดังภาพที่ 21 พบว่ามีค่าลดลงจาก 173.7 องศาเซลเซียสไปจนถึง 102.7 องศาเซลเซียส เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.058 ไปถึงร้อยละ 12.649 ตำแหน่งที่มีค่า A_w สูงกว่า 0.74 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ขนมปังดูดความชื้นเข้าไปมาก (สังเกตได้จากกราฟการดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ของขนมปัง) และทำให้ค่า T_g ของขนมปังลดลงอย่างรวดเร็ว ดังภาพที่ 21 ที่ค่า A_w ที่เพิ่มขึ้นจาก 0.74 ถึง 0.85 จะมีค่า T_g ของขนมปังลดลงอย่างรวดเร็วจาก 102.7 องศาเซลเซียส ที่ระดับค่า A_w เท่ากับ 0.74 และมีค่าลดลงมากเป็น -10.1 องศาเซลเซียส ที่ระดับค่า A_w เท่ากับ 0.85 การที่ T_g ของขนมปังมีค่าลดลงซึ่งนอกจากจะมีผลกระทบจากความชื้นแล้วยังอาจมีผลกระทบของน้ำตาลในขนมปังที่ทำให้ค่า T_g ของขนมปังมีค่าต่ำลง เพราะน้ำตาลมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งจะมีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์เหมือนกับความชื้น ดังนั้นจึงทำให้ T_g ของขนมปังลดลง (Bhandari *et al.*, 1997; Roos and Karel, 1991)

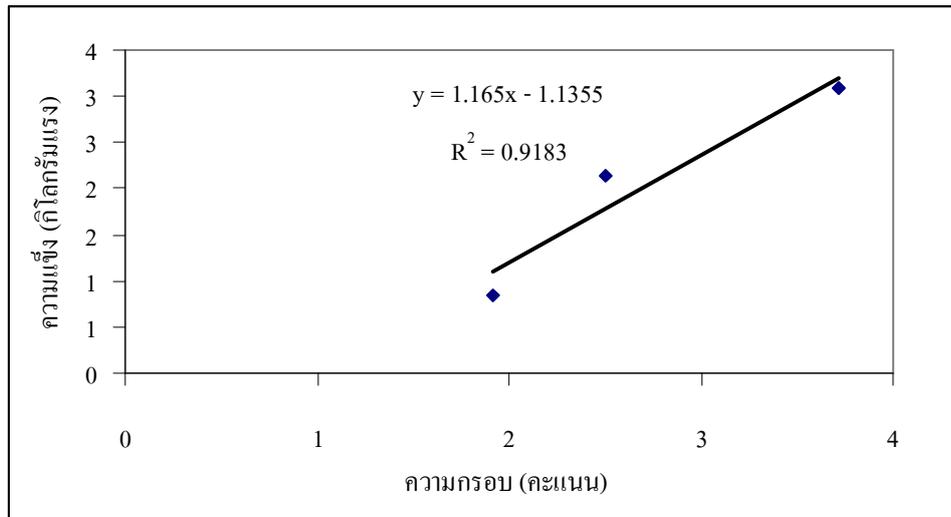
การดูดความชื้นทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นเพิ่มขึ้น (ระดับค่า A_w สูง) ส่งผลต่อการลดลงของค่า T_g ของผลิตภัณฑ์และความกรอบ แต่ความแข็งและงานมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่า A_w เพิ่มขึ้นมีค่าสูงสุดเมื่อค่า A_w สูงถึงระดับ 0.54 และลดลงเรื่อยๆ เมื่อขนมปังมีค่า A_w สูงกว่า 0.54 การที่ค่าที่วัดได้ดังกล่าวมีค่าลดลงเป็นเพราะ โมเลกุลของขนมเกิดการเคลื่อนที่โดยโมเลกุลของน้ำที่ดูดเข้าไปนั่นเอง (Roudaut *et al.*, 2002) อย่างไรก็ตามที่ระดับค่า A_w ต่ำ (จาก 0.23-0.54) ความแข็งและงานมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่า A_w เพิ่มขึ้น ซึ่งกรณีนี้เป็นผลที่เกิดกับผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำน้อยอย่างเช่นในขนมปังในการทดลองที่ค่า A_w เท่ากับ 0.23 ซึ่งใกล้เคียงกับ 0.112 ที่เป็นปริมาณน้ำในระดับมอนอเลเยอร์ของขนมปัง จะมีโมเลกุลของน้ำอยู่เพียงเล็กน้อย การดูดน้ำเพิ่มเข้าไปจะไปช่วยเติมหรือปิดช่องว่างที่เล็กมากๆ ทำให้ขนมปังมีความหนาแน่นมากขึ้น (Benczedi, 1999; Seow *et al.*, 1999; Vrentas *et al.*, 1988) และทำยังทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำและโมเลกุลขององค์ประกอบอื่น (Roudaut *et al.*, 2002) ปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นผลทำให้ขนมปังกรอบมากขึ้นจึงทำให้ได้ค่าแรงและงานเพิ่มขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างความกรอบซึ่งทดสอบโดยการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคกับความแข็งที่เป็นการทดสอบเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัสของขนมปัง ผลดังภาพที่ 22-24

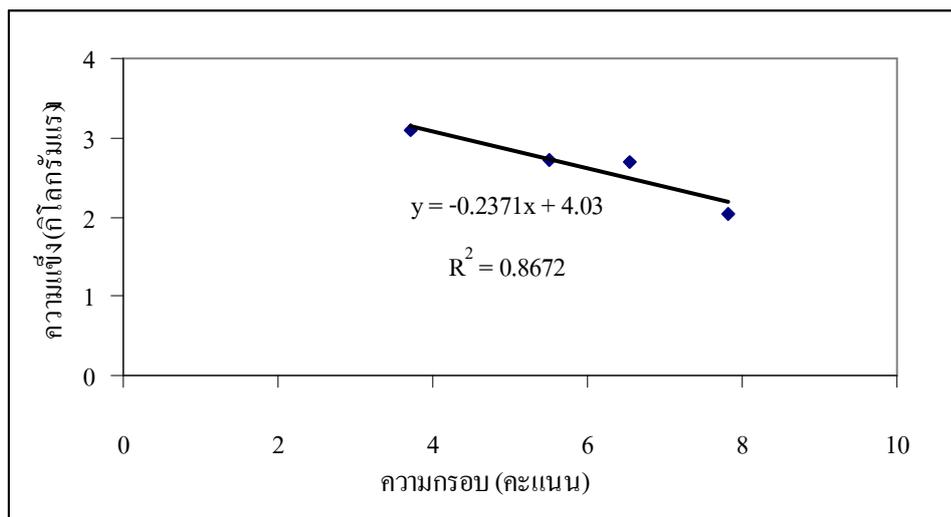
ความสัมพันธ์ระหว่างความกรอบกับความแข็งของขนมฝั่งที่มี A_w ตั้งแต่ 0.234 ถึง 0.670 พบว่ามีความสัมพันธ์กันแบบ โพลีโนเมียล ดังภาพที่ 20 เนื่องจากความแข็งของขนมฝั่งที่มีค่า A_w ต่ำจะมีค่าความแข็งต่ำและจะเพิ่มสูงขึ้นตามความชื้นที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งขนมมีค่า A_w ประมาณ 0.54 ความแข็งของขนมกลับลดลง ขณะที่คะแนนความกรอบของผู้บริโภคจะมีค่าสูงสุดที่ A_w ต่ำและลดลงตามความชื้นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ความกรอบและความแข็งของขนมฝั่งจะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ในสองทิศทาง คือ ที่คะแนนความกรอบต่ำกว่า 4 (ภาพที่ 21) จะมีความสัมพันธ์ในทางบวก (คะแนนความกรอบลดลงความแข็งลดลง) และที่คะแนนสูงกว่า 4 (ภาพที่ 22) จะมีความสัมพันธ์ในทางลบ (คะแนนความกรอบมากขึ้นขณะที่ความแข็งลดลง) แสดงให้เห็นว่าผู้บริโภคไม่สามารถแยกความแตกต่างของความแข็งที่เพิ่มขึ้นจากการดูความชื้นเพียงเล็กน้อยได้ แต่เมื่อขนมมีการดูความชื้นมากขึ้นจนถึงจุดวิกฤติ (คะแนน= 5) หรือจุดที่ความแข็งเริ่มลดลง ผู้บริโภคจะสามารถบอกความรู้สึกได้ ดังนั้นจึงมีการทดลองที่ใช้ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสเป็นตัวชี้วัดความสดใหม่ของอาหาร (Szczesniak and Kleyn, 1963; Rohm, 1990)



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างความกรอบและความแข็งของขนมฝั่ง ที่มีวอเตอร์แอกติวิตีตั้งแต่ 0.234-0.670



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างความกรอบและความแข็งแรงของชนมผิงที่มีคะแนนต่ำกว่า 4



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างความกรอบและความแข็งแรงของชนมผิงที่มีคะแนนสูงกว่า 5

3.3 การทำนายอายุการเก็บของชนมผิง

การทำนายอายุการเก็บที่จะศึกษาในงานวิจัยนี้ซึ่งเป็นการศึกษาเปรียบเทียบค่าที่ทำนายได้จากการใช้ค่า P ของไอน้ำที่สภาวะมาตรฐานที่ใช้คำนวณกันมาดั้งเดิม กับค่าที่ใช้ E_u เป็นตัวปรับค่า P ให้ถูกต้องตามอุณหภูมิการใช้งานจริง เปรียบเทียบกับอายุการเก็บที่ได้ทำการทดลองเก็บจริง ข้อมูลเบื้องต้นของชนมผิงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษาอายุการเก็บขนมปัง

รายละเอียด	LDPE	OPP
ฟิล์ม		
ความหนา (มิล)	1.969	1.969
ขนาด (เมตร)	0.103 x 0.156	0.103 x 0.156
ผลิตภัณฑ์		
น้ำหนัก (กรัม)	52.065	51.682
ความชื้นเริ่มต้น (ร้อยละ น้ำหนักแห้ง)	4.096	4.096
ความชื้นวิกฤติ (ร้อยละ น้ำหนักแห้ง)	6 ($A_w=0.54$)	6 ($A_w=0.54$)
สภาวะการเก็บ		
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	30±1	30±1
ความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ)	50±2	50±2

3.3.1 การทำนายอายุการเก็บโดยวิธีดั้งเดิม

การทำนายอายุการเก็บของอาหารที่ไวต่อความชื้นเดิมจะคำนวณโดยใช้ค่า WVTR ของฟิล์มที่ได้ข้อมูลจากผู้ผลิตฟิล์มหรือเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน ซึ่งในประเทศในเขตร้อนจะกำหนดอุณหภูมิความชื้นที่ใช้ในการทดสอบค่า WVTR ของฟิล์มตามมาตรฐาน ASTM ที่ระบุว่าสภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิ 38±1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 90±2 เป็นสภาวะรุนแรงที่สินค้าจะพบ ดังนั้นผู้ผลิตหรือหน่วยงานที่ให้บริการทดสอบค่านี้ จะใช้สภาวะนี้ในการทดสอบ ซึ่งหากนำค่าที่อุณหภูมิดังกล่าวมาคำนวณหาอายุการเก็บโดยใช้สมการที่ (14) (ภาคผนวก จ) จะได้อายุการเก็บของขนมปังที่เก็บในถุง LDPE เท่ากับ 30.47 วัน และถุง OPP เท่ากับ 97.84 วัน

3.3.2 การทำนายอายุการเก็บโดยใช้ค่า E_u เป็นตัวปรับค่าให้ถูกต้อง (correction factor)

จากค่า E_u สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มที่ได้ศึกษาในข้อ 2 (ตารางที่ 4) Hernandez *et al.* (2000) ระบุว่าจากสมการอาร์เรเนียส ตามสมการที่ (13) ค่า E_u สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำสามารถใช้เป็นตัวแปรในการปรับค่า P ของไอน้ำ จากอุณหภูมิหนึ่งที่เราปรับค่า ไปเป็นอีกอุณหภูมิหนึ่งที่ต้องการ เพื่อให้ตรงกับอุณหภูมิที่เก็บรักษาจริง จากนั้นนำค่า P ของไอน้ำที่ปรับค่าเป็นค่าที่อุณหภูมิที่ต้องการแล้วไปคำนวณหาอายุการเก็บ ซึ่งจะได้อายุการเก็บที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง การปรับค่า P และการคำนวณหาอายุการเก็บของขนมฝิงในถุง LDPE และ OPP แสดงในภาคผนวก จ โดยได้ค่า P ที่อุณหภูมิ 30 ± 1 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.22885 และ 0.06874 กรัม มิลต่อตารางเมตร วัน มิลลิเมตรปรอท สำหรับถุง LDPE และ OPP ตามลำดับ เมื่อนำมาทำนายอายุการเก็บอายุการเก็บ จะได้อายุการเก็บของขนมที่บรรจุในถุง LDPE และ OPP เท่ากับ 37.085 วัน และ 122.562 วัน ตามลำดับ

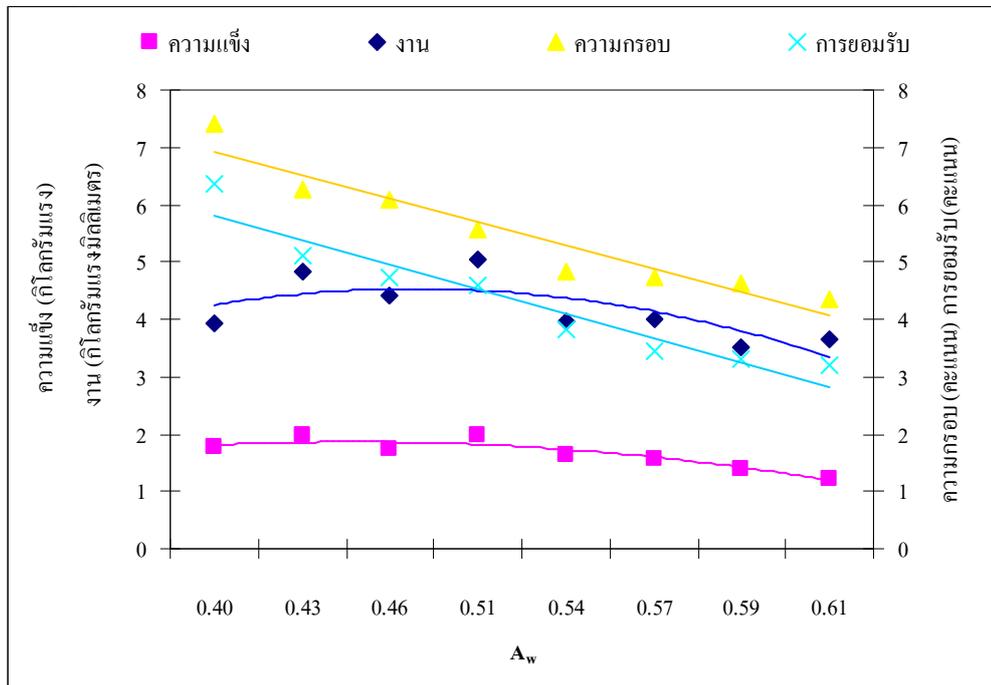
3.3.3 การเปรียบเทียบผลการทำนายอายุการเก็บกับการเก็บรักษาขนมฝิง

ก. การศึกษาอายุการเก็บจริง

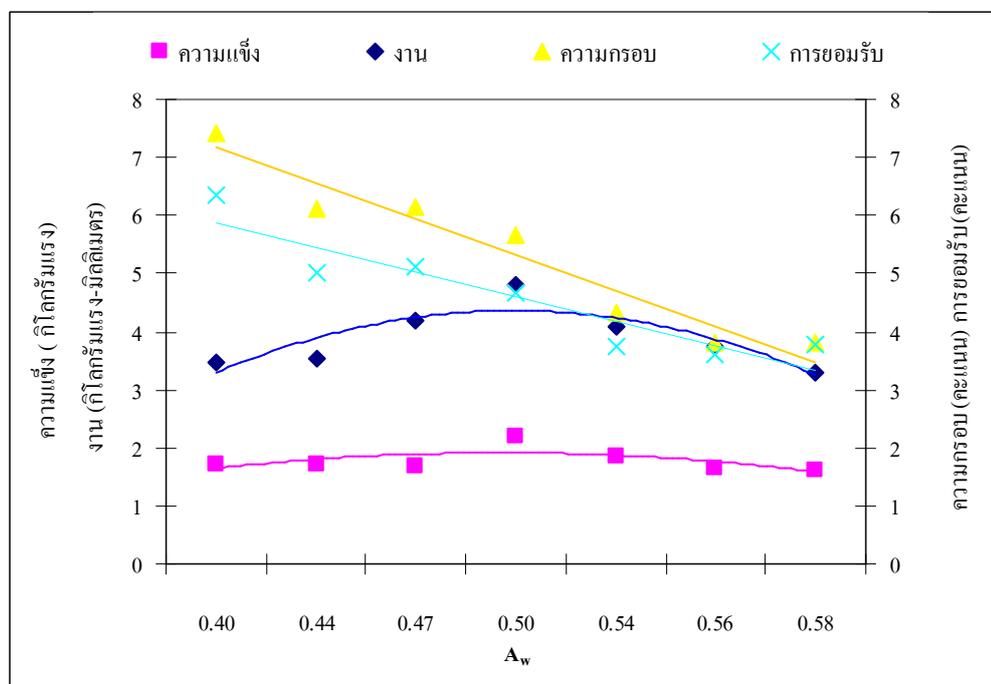
การศึกษาอายุการเก็บจริงของขนมฝิงโดยบรรจุขนมฝิงในถุงพลาสติก 2 ชนิด คือ ถุง LDPE และ OPP ขนาดบรรจุถุงละประมาณ 50 กรัม ขนาดถุงที่ใช้บรรจุเท่ากับ 0.103×0.156 เมตร เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ± 2 เก็บไว้ทุกๆ 3-4 วัน นำมาหาความชื้น วัดความแข็งและงาน รวมทั้งทดสอบคุณลักษณะความกรอบและการยอมรับของผู้บริโภค ผลปรากฏดังตารางที่ 12 และภาพที่ 25 และ 26

ตารางที่ 12 ความชื้นและวอเตอร์แอกติวิตีของขนมปังในถุงพลาสติก LDPE และ OPP ใน
ระยะเวลาการเก็บต่างๆ

อายุการเก็บ (วัน)	LDPE		อายุการเก็บ (วัน)	OPP	
	ความชื้น (ร้อยละ น้ำหนักแห้ง)	A_w		ความชื้น (ร้อยละ น้ำหนักแห้ง)	A_w
0	4.096	0.397	0	4.096	0.397
3	3.946	0.384	3	4.121	0.400
7	4.289	0.414	7	4.182	0.405
10	4.431	0.426	10	4.234	0.409
14	4.537	0.434	14	4.276	0.413
18	4.916	0.463	18	4.340	0.418
21	5.321	0.492	21	4.382	0.422
24	5.557	0.507	24	4.436	0.426
28	5.793	0.522	28	4.490	0.430
31	5.912	0.529	31	4.511	0.432
35	6.029	0.536	35	4.555	0.436
			38	4.585	0.438
			43	4.663	0.444
			45	4.706	0.447
			49	4.740	0.450
			52	4.809	0.455
			56	4.853	0.458
			59	4.901	0.462
			63	4.925	0.464
			66	4.987	0.468
			70	5.044	0.472
			73	5.083	0.475
			77	5.141	0.479
			80	5.195	0.483
			84	5.219	0.485
			87	5.303	0.490
			91	5.324	0.492
			94	5.392	0.496
			98	5.501	0.503
			101	5.538	0.506
			105	5.629	0.512
			108	5.734	0.518
			112	5.814	0.523
			116	5.946	0.531
			119	6.004	0.535



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างวอเตอร์แอกติวิตี คุณลักษณะเนื้อสัมผัส และการยอมรับของขนมฝังที่เก็บในถุง LDPE



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างวอเตอร์แอกติวิตี คุณลักษณะเนื้อสัมผัส และการยอมรับของขนมฝังที่เก็บในถุง OPP

ปริมาณความชื้นที่ซึมผ่านถุงพลาสติกเข้าไปในตัวขนมฝงจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยขนมที่บรรจุในถุงพลาสติก LDPE จะมีความชื้นสูงกว่าขนมที่บรรจุในถุง OPP เนื่องจากฟิล์ม LDPE มีอัตราการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่า ทำให้ขนมที่บรรจุในถุงพลาสติก LDPE มีอายุการเก็บสั้นกว่า คือ เก็บได้ 35 วัน ขณะที่ขนมที่บรรจุในถุงพลาสติก OPP เก็บได้นานถึง 119 วัน จึงจะมีความชื้นถึงจุดวิกฤติ (ร้อยละ 6 น้ำหนักแห้ง หรือ A_w ประมาณ 0.54 ข้อมูลจากข้อ 3.2)

เมื่อพิจารณาค่าความแข็งและงานของขนมเมื่อเก็บที่เวลาต่างๆ พบว่าขนมฝงที่เก็บในถุง LDPE และ OPP ได้ผลไปในทิศทางเดียวกันคือที่ระดับความชื้นต่ำร้อยละ 4.096 (น้ำหนักแห้ง) หรือ A_w เท่ากับ 0.397 จะมีความแข็งและงานต่ำ และเพิ่มตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อขนมมีความชื้นสูงกว่าร้อยละ 6 หรือ A_w เท่ากับ 0.54 ซึ่งเป็นความชื้นวิกฤติตามที่ได้ศึกษาไว้ในข้อ 3.2.3 ค่าที่วัดได้ดังกล่าวกลับลดลงเรื่อยๆ ซึ่งได้ผลสอดคล้องกับการทดลองในข้อ 3.2.3 ที่ว่าระดับค่า A_w ต่ำ (0.23 ถึง 0.54) ค่าความแข็งและงานของขนมฝงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามค่า A_w เพิ่มขึ้น เพราะน้ำที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจะเข้าไปเติมบริเวณช่องว่าง ซึ่งเป็นการเพิ่มความหนาแน่นให้ผลิตภัณฑ์ (Benczedi, 1999; Seow *et al.*, 1999; Vrentas *et al.*, 1988) ทำให้ความแข็งและงานมีค่าสูง แต่เมื่อมีปริมาณน้ำเกินกว่าจุดวิกฤติ (ความชื้นร้อยละ 6 หรือ A_w เท่ากับ 0.54) น้ำที่ดูดเพิ่มเข้าไปจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุล (Roudaut *et al.*, 2002) ส่งผลให้ความแข็งและงานมีค่าลดลง

ความกรอบและการยอมรับของผู้บริโภคของขนมฝงที่บรรจุในถุงทั้งสองชนิดให้ผลที่สอดคล้องกัน คือ ที่ระดับความชื้นต่ำ (ร้อยละ 4.096 หรือ A_w เท่ากับ 0.397) คะแนนความกรอบและคะแนนการยอมรับของผู้บริโภคจะอยู่ในระดับสูง (7.42 และ 6.37 ตามลำดับ) และลดลงอย่างรวดเร็วตามความชื้นที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งความชื้นเข้าสู่จุดวิกฤติ หรือจุดที่ขนมหมดอายุ ซึ่งถุง LDPE มีอายุการเก็บ 35 วันและถุง OPP ที่เวลาเก็บ 119 วัน โดยมีคะแนนความกรอบอยู่ที่ 4.84 คะแนน และ 4.32 คะแนน ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับคะแนนความกรอบที่จุดวิกฤติ (คะแนนเท่ากับ 5) ที่ได้ศึกษาไว้ในข้อ 3.2.3 และมีคะแนนการยอมรับอยู่ที่ 3.83 และ 3.73 สำหรับถุง LDPE และถุง OPP ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับคะแนน 3 ที่เป็นระดับที่ไม่ยอมรับ จากผลการทดลองดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเห็นว่าผลการศึกษาอายุการเก็บจริงของถุงทั้งสองชนิดได้ผลที่สอดคล้อง

คล้ายกัน และเป็นการยืนยันว่าที่ระดับความชื้นร้อยละ 6 หรือ A_w เท่ากับ 0.397 เป็นความชื้นวิกฤติของขนมปังที่ผู้บริโภคมักจะไม่ยอมรับหากขนมมีความชื้นสูงกว่า ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความกรอบของขนมทำให้ความแข็งและงานลดลงอย่าง

ข. การเปรียบเทียบผลการทำนายอายุการเก็บ

การเปรียบเทียบอายุการเก็บของขนมปังที่ได้จากการคำนวณแบบดั้งเดิม การคำนวณโดยใช้ค่า E_a เป็นตัวปรับค่า และการทดลองเก็บรักษาจริง อายุการเก็บรักษาที่ได้จากวิธีการต่างๆ สรุปผลในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 อายุการเก็บของขนมปังในถุง LDPE และ OPP ที่ได้จากวิธีการต่างๆ

วิธีการ	LDPE	OPP
1. คำนวณแบบดั้งเดิม (ใช้ค่า P ที่อุณหภูมิมาตรฐาน)	30.47	97.85
2. คำนวณโดยใช้ค่า E_a (E_a ปรับค่า P ตามอุณหภูมิที่ใช้งานจริง)	37.09	122.56
3. ทดลองเก็บรักษาจริง	35	119

อายุการเก็บที่คำนวณโดยใช้ค่า E_a เป็นตัวปรับค่า P ของไอน้ำให้ตรงกับอุณหภูมิที่ใช้งานจริงก่อนนำไปคำนวณอายุการเก็บ จะได้ค่าอายุการเก็บที่ใกล้เคียงกับอายุการเก็บจริงมาก ดังเช่นกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ อายุการเก็บที่คำนวณโดยใช้ E_a มีค่าประมาณ 37 วัน และ 123 วัน สำหรับขนมปังที่บรรจุในถุง LDPE และ OPP ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับอายุการเก็บจริงที่มีค่าเท่ากับ 35 วันในถุง LDPE และ 119 วันในถุง OPP แต่เมื่อเทียบกับค่าที่คำนวณแบบดั้งเดิมที่ไม่ปรับค่า P ในที่นี้ใช้ค่า P ที่อุณหภูมิ 38 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90 ± 2 มาคำนวณผลปรากฏว่าอายุการเก็บของขนมปังที่เก็บในถุง LDPE มีค่าเท่ากับ 30 วัน และในถุง OPP มีค่า 98 วัน เมื่อเทียบความแตกต่างแล้วจะห่างจากอายุการเก็บจริง 5 วันสำหรับถุง LDPE และ 21 วันสำหรับถุง OPP ขณะที่หากใช้ค่า E_a มาปรับค่า P ก่อนนำไปคำนวณจะมีความต่างเพียง 2 วันในถุง LDPE และ 4 วัน สำหรับถุง OPP นั่นคือประโยชน์ของค่า E_a ที่ช่วยปรับค่า P จากค่าที่มีอยู่ซึ่งอาจไม่ตรงกับอุณหภูมิใช้งานจริง หากนำค่าดังกล่าวมาใช้คำนวณก็จะได้ค่าที่คลาดเคลื่อนจากความ

จริงดังตัวอย่างการทำนายอายุการเก็บขนมปังที่ใช้เป็นกรณีศึกษา และถ้าใช้ค่า P ที่อุณหภูมิต่างจาก อุณหภูมิที่ใช้งานจริงมากๆ ความผิดพลาดของอายุการเก็บที่ทำนายได้จะมากขึ้นด้วย ดังนั้นใน วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้จึงได้จัดทำฐานข้อมูลค่า E_u ของฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ ขึ้นเพื่อเอื้อประโยชน์ ในการนำไปใช้เพื่อความถูกต้องของอายุการเก็บ ซึ่งเป็นทางเลือกที่เพิ่ม โอกาสให้ผู้ผลิตสินค้าหรือ ผู้ผลิตฟิล์มพลาสติก สามารถเลือกฟิล์มที่เหมาะสมกับอายุการเก็บของสินค้าตามที่ต้องการได้ ซึ่งหาก ทำนายโดยใช้ค่า P ตามอุณหภูมิมาตรฐานแบบเดิมผู้ผลิตจะไม่ทราบว่าอายุการเก็บที่แท้จริงของ สินค้า ทราบแต่อายุการเก็บที่ประมาณการซึ่งอาจมากกว่า หรือน้อยกว่าความจริง ขึ้นอยู่กับค่า P ที่ นำมาใช้คำนวณเป็นค่าที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าอุณหภูมิใช้งานจริง ทำให้ยากต่อการเลือกหรือ กำหนดคุณสมบัติของวัสดุบรรจุภัณฑ์ให้เหมาะสมกับสินค้าจริงๆ ยากที่ควบคุมค่าใช้จ่ายตรงจุดนี้ แต่ ถ้าทราบอายุการเก็บที่เป็นจริงแล้วจะทำให้ง่ายต่อการกำหนดคุณสมบัติของฟิล์มให้ตรงกับที่จะใช้ งานจริงหรือหากต้องการเพื่อความปลอดภัยก็สามารถกำหนดได้ ซึ่งส่งผลให้ผู้ผลิตสามารถควบคุม ต้นทุนค่าวัสดุบรรจุภัณฑ์ได้ด้วย อีกทั้งยังสะดวกในการนำไปใช้งาน ไม่ต้องเสียเวลาทำการ ทดสอบวัสดุใหม่ จากสมการที่ใช้ในการคำนวณในวิทยานิพนธ์นี้เป็นเพียงตัวอย่างหนึ่งที่ยกขึ้นมา เป็นกรณีศึกษาเพื่อให้เข้าใจชัดเจนขึ้น แต่ในปัจจุบันการคำนวณอายุการเก็บอาจมีหลายวิธี หากวิธี นั้นๆ มีการใช้ค่า P คำนวณ และต้องการปรับค่า P ก็สามารถใช้ค่า E_u เป็นตัวปรับค่าได้ เพื่อให้ผล ที่ได้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. การสำรวจข้อมูลเบื้องต้นของฟิล์มพลาสติกสำหรับการบรรจุอาหารที่ไวต่อความชื้น

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของฟิล์มพลาสติกสำหรับการบรรจุอาหารที่ผลิตและใช้ในประเทศ พบว่า ฟิล์มพลาสติกที่ใช้อยู่ปัจจุบันมีทั้งฟิล์มเดี่ยวและฟิล์มหลายชั้น โดยฟิล์มหลายชั้นที่ผลิตจะเป็นการนำฟิล์มเดี่ยว หลายๆ ชนิดมาลามิเนตกันเป็นฟิล์มหลายชั้นแทนการผลิตฟิล์มคุณภาพสูงในชั้นเดียวซึ่งมีราคาแพง ฟิล์มเดี่ยวที่ใช้ได้แก่ PE PP OPP เป็นฟิล์มที่ผลิตเป็นซองที่มีความหนาแตกต่างกัน จำหน่ายปลีกตามร้านค้าทั่วไป ส่วนฟิล์มเดี่ยวที่นำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นฟิล์มหลายชั้น ได้แก่ PE OPP PET Nylon MPET MCPPE และ MOPP ซึ่งฟิล์มเดี่ยวแต่ละชนิดจะมีให้เลือกหลายความหนา ในการผลิตจะพิจารณาถึงคุณสมบัติของฟิล์มแต่ละชนิดที่จะนำมาลามิเนตร่วมกัน รวมถึงคุณสมบัติที่ต้องการนำไปใช้ ส่วนฟิล์ม PS จะไม่นิยมใช้ทำเป็นถุงบรรจุอาหาร มักนิยมใช้กับผลิตภัณฑ์อื่น เช่นบรรจุผลิตภัณฑ์ประเภทดอกไม้ เป็นต้น

2. การศึกษาค่าพลังงานก่อกัมมันต์สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มพลาสติกสำหรับการบรรจุอาหารที่ไวต่อความชื้น

การศึกษา E_a สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการนำไปใช้ในการปรับค่า P ให้ตรงกับอุณหภูมิการเก็บจริง ก่อนทำนายอายุการเก็บของอาหารที่ไวต่อความชื้นนั้น ฟิล์มตัวอย่างที่นำมาศึกษาจะสามารถจัดกลุ่มตามคุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้เป็น 3 ระดับ (ดีมาก ดี และปานกลาง) ซึ่งขึ้นกับชนิดและองค์ประกอบของฟิล์ม สำหรับ E_a ของฟิล์มแต่ละชนิดจะไม่เท่ากันขึ้นกับความไวต่ออุณหภูมิของฟิล์ม โดยฟิล์มที่นำมาทดสอบส่วนใหญ่จัดเป็นฟิล์มที่มีความไวต่ออุณหภูมิสูง

3. การศึกษาประสิทธิภาพในการทำนายอายุการเก็บของอาหารที่ไวต่อความชื้น โดยใช้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ กรณีศึกษา: ขนมหึง

3.1 ลักษณะการดูความชื้นของขนมหึง

3.1.1 จลนพลศาสตร์การดูดความชื้นของขนมฝิง

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดความชื้นของขนมฝิง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30 ± 1 องศาเซลเซียส เส้นกราฟการดูดความชื้นที่ได้มีความเหมาะสมเป็นอย่างดีกับรูปแบบเชิงประจักษ์ที่ใช้ปรับเส้นโค้ง โดยการดูดซึมน้ำของขนมฝิงจะเกิดเร็วในระยะแรก และช้าลงเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น ระดับความชื้นสูงการเข้าสู่สมดุลก็จะใช้เวลานานกว่าที่ระดับความชื้นต่ำ ความชื้นที่จุดสมดุลจะเพิ่มสูงขึ้นตามระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น การดูดความชื้นของขนมฝิงที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 11.3 32.4 51.4 และ 75.1 จะใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลเท่ากับ 34 60 76 และ 100 ชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 92.5 ซึ่งมีอัตราการดูดความชื้นต่ำ จะใช้เวลาการเข้าสู่สมดุลเท่ากับ 384 ชั่วโมง

3.1.2 การดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่

การดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ของขนมฝิงที่อุณหภูมิ 30 ± 1 องศาเซลเซียส ลักษณะกราฟเป็นรูปโค้งแบบซิกโมคอด ขนมดูดความชื้นอย่างรวดเร็วระยะแรกและจะลดความเร็วลงเรื่อยๆจนกระทั่งคงที่เมื่อเข้าสู่สมดุล ส่วนปริมาณความชื้นสมดุลของขนมจะเพิ่มขึ้นตามค่า A_w ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ A_w เท่ากับ 0.73 เป็นจุดที่ขนมเริ่มดูดความชื้นสูงมากอย่างเห็นได้ชัด กราฟการดูดความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ของขนมฝิง สามารถใช้รูปแบบของ GAB Peleg และ Lewicki ได้ โดยที่รูปแบบของ GAB จะเหมาะสมที่สุด

3.2 อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อคุณภาพของขนมฝิง

3.2.1 คุณลักษณะเนื้อสัมผัส

ขนมฝิงที่อบเสร็จใหม่จะมีลักษณะแข็งกรอบ มีค่า A_w เท่ากับ 0.38 ความชื้นร้อยละ 3.9 ความกรอบของขนมฝิงเมื่อทดสอบความแข็งและงานจะมีค่าต่ำที่ระดับความชื้นต่ำ แล้วจะมีค่าสูงขึ้นตามความชื้นที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีความชื้นสูงกว่าร้อยละ 6 (A_w เท่ากับ 0.54) ค่าความแข็งและงานจะลดลงเรื่อยๆ ตามความชื้นที่เพิ่มขึ้น

3.2.2 คุณภาพทางอุณหภูมิ

ความชื้นมีผลต่อค่า T_g ของขมผึ้ง ที่ระดับความชื้นต่ำ (ร้อยละ 0.058) ค่า T_g ของขมผึ้งจะมีค่าสูงถึง 173.7 องศาเซลเซียส และจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อขมผึ้งมีความชื้นสูงขึ้น โดยที่ระดับความชื้นร้อยละ 12.649 มีค่า T_g เท่ากับ 102.7 องศาเซลเซียส แต่ที่ความชื้นร้อยละ 36.046 ค่า T_g จะต่ำลงอย่างมากเป็น -10.1 องศาเซลเซียส

3.2.3 คุณภาพทางประสาทสัมผัส

การทดสอบทางประสาทสัมผัสสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ความสดใหม่ ความกรอบของขมผึ้งได้ โดยที่ระดับคะแนนความกรอบที่น้อยกว่า 5 ค่า A_w น้อยกว่า 0.54 และความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 6 ขมผึ้งจะยังคงมีความกรอบ มีค่าความแข็งและงานสูง แต่เมื่อมีความชื้นสูงกว่าร้อยละ 6 เป็นต้นไปขมผึ้งจะสูญเสียความกรอบ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ณ ตำแหน่งที่ ขมผึ้งมีความชื้นร้อยละ 6 หรือ A_w เท่ากับ 0.54 เป็นจุดวิกฤติของขมผึ้ง

3.3 การทำนายอายุการเก็บของขมผึ้ง

3.3.1 การทำนายอายุการเก็บโดยวิธีดั้งเดิม

การทำนายอายุการเก็บแบบดั้งเดิม ซึ่งเป็นการนำค่า P ของไอน้ำของฟิล์ม ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นค่าที่ทดสอบตามอุณหภูมิมาตรฐาน (อุณหภูมิ 38 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90 ± 2) หากไม่ตรงกับอุณหภูมิใช้งานจริง ค่าที่คำนวณได้จะผิดจากความจริง

3.3.2 การทำนายอายุการเก็บโดยใช้ค่า E_a เป็นตัวปรับค่าให้ถูกต้อง (correction factor)

การทำนายอายุการเก็บโดยการใส่ค่า E_a สำหรับสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเป็นตัวปรับ ค่า P ของไอน้ำของฟิล์มให้ตรงกับอุณหภูมิที่ใช้งานจริงก่อน นำไปทำนายอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์จะทำให้ได้อายุการเก็บที่ใกล้เคียงความจริงมากขึ้น

3.3.3 การเปรียบเทียบผลการทำนายอายุการเก็บกับการเก็บรักษาขนมผิง

จากการศึกษาอายุการเก็บจริงของขนมผิงในถุงพลาสติก LDPE และ OPP ขนาด 0.103 x 0.156 เมตร บรรจุถุงละประมาณ 50 กรัม ที่อุณหภูมิ 30 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ± 2 ขนมผิงที่บรรจุในถุง LDPE และ OPP มีอายุการเก็บเท่ากับ 35 วัน และ 119 วัน ตามลำดับ เมื่อเทียบกับอายุการเก็บที่ทำนายได้จากการใช้ค่า E_u เป็นตัวปรับค่า P ให้เป็นค่า P ที่อุณหภูมิเดียวกันกับที่เก็บจริง จะได้อายุการเก็บของขนมผิงที่บรรจุในถุง LDPE เท่ากับ 37 วัน และในถุง OPP เท่ากับ 123 วัน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอายุการเก็บจริงมากกว่าอายุการเก็บที่ทำนายได้จากการใช้ค่า P ที่อุณหภูมิ 38 ± 1 องศาเซลเซียส ที่มีค่าเท่ากับ 30 วัน และ 97 วัน สำหรับถุง LDPE และถุง OPP ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาข้อมูลสูตรขนมผิงที่ผลิตในประเทศ รวมถึงข้อมูลการดูความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการนำไปใช้ในการทำนายอายุการเก็บต่อไป
2. ควรมีการศึกษาข้อมูลการดูความชื้น ณ อุณหภูมิคงที่ของผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความชื้นต่างๆ รวมทั้งความชื้นวิกฤติไว้เพื่อความสะดวกในการทำนายอายุการเก็บ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- งามทิพย์ ภู่วโรดม. 2550. การบรรจุอาหาร. บริษัท เอส.พี.เอ็ม. การพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพฯ.
- ภาณุวัฒน์ สรรพกุล. 2539. การพัฒนากันบูดจากวัสดุธรรมชาติและเปลือกถั่วลิสง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2548. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน. มอก. มพช.758-2548.
- Afolabi, W.A.O., C.R.B. Oguntona and B.B. Fakunmoju. 2001. Acceptability and chemical composition of bread from beniseed composition flour. **Nutrition and Food Science** 31: 310-314.
- Aggarwal, S.J., K.R. Diller and C.R. Baxter. 1988. Hydratic permeability and activation energy of human keratinocytes at subzero temperatures. **Cryobiology** 25: 203-211.
- Akanbi, C.T., R.S. Adeyemi and A. Ojo. 2006. Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices. **Journal of Food Engineering** 73: 157-163.
- Al-Muhtaseb, A.H., W.A.M. McMinn and T.R.A. Magee. 2002. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A review. **Food and Bioproducts Processing** 80: 118-128.
- Anonymous. n.d. **Activation Energy**. Wikipedia the Free Encyclopedia. Available Source: <http://en.wikipedia.org>, December 6, 2006.
- AOAC. 1980. **Official Methods of Analysis of the Association of Official**. 13rd ed. The Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.

- Arogba, S.S. 2001. Effect of temperature on the moisture sorption isotherm of a biscuit containing processed mango (*Mangifera indica*) kernel flour. **Journal of Food Engineering** 48: 121-125.
- ASTM. 2000. Standard test methods for water vapor transmission of materials ASTM E 96-00. **Annual Book of ASTM Standards** 04.06: 842-849.
- _____. 2003a. Standard test methods for water vapor transmission of flexible heat-sealed packages for dry products ASTM D 3079-94 (Reapproved 2003). **Annual Book of ASTM Standards** 15.10: 298-299.
- _____. 2003b. Standard test methods for water vapor transmission rate of sheet materials using dynamic relative humidity measurement ASTM E 398-03. **Annual Book of ASTM Standards** 15.10: 1-4.
- Aviara, N.A. and O.O. Ajibola. 2002. Thermodynamics of moisture sorption in melon seed and cassava. **Journal of Food Engineering** 55: 107-113.
- Ayranci, E., G. Ayranci and Z. Dogantan. 1990. Moisture sorption isotherms of dried apricot, fig and rasin at 20C and 36C. **Journal of Food Science** 55: 1591-1597.
- Azanha, A.B. and J.A.F. Faria. 2005. Use of mathematical models for estimating the shelf-life of cornflakes in flexible packaging. **Packaging Technology and Science** 18: 171-178.
- Baucour, P. and J.D. Daudin. 2000. Development of a new method for fast measurement of water sorption isotherms in the high humidity range validation gelatin Gel. **Journal of Food Engineering** 44: 97-107.
- Bell, N.L. and T.P. Labuza. 2000. **Moisture Sorption Practical Aspects of Isotherm Measurement and Use**. 2nd ed. University of Minnesota, USA.

- Benczedi, D. 1999. Estimation of the free volume of starch water barriers. **Trends in Food Science and Technology** 10: 21-24.
- Bertuzzi, M.A., E.F. Castro Vidaurre, M. Armada and J.C. Gottifredi. 2007. Water vapor permeability of edible starch based films. **Journal of Food Engineering** 80: 972-978.
- Bhandari, B.R., N. Datta, R. Crooks, S. Rigby and T. Howes. 1997. A semi-empirical approach to optimize the quantity of dry aids required to spray dry sugar rich foods. **Drying Technology** 15: 2509-2525.
- Brennan, J.G. 1980. Food texture measurement, pp. 1-69. *In* R.D. King, ed. **Developments in Food Analysis Technique-2**. Applied Science Publishers LTD., London.
- Brunauer, S., P.H. Emmett and E. Teller. 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society** 60: 309-319.
- Brunauer, S., L.S. Deming, W.E. Deming and E. Teller. 1940. On the theory of Van Der Waals adsorption of gases. **Journal of the American Chemists Society** 62: 1723-1732.
- Cadden, A.M. 1988. Moisture sorption characteristics of several food fibers. **Journal of Food Science** 53: 1150-1155.
- Cervenka, L., S. Rezkova and J. Kralovsky. 2008. Moisture adsorption characteristics of gingerbread, a traditional bakery product in Pardubice, Czech Republic. **Journal of Food Engineering** 84: 601-607.
- Compan, V., M.L. Lopez and L. Monferrer. 1993. Determination of the glass transition temperature of poly (cyclohexyl acrylate) from oxygen permeability measurements. **Polymer** 34: 2971-2974.

- Chang, Y.P., A.A. Karim and C.C. Seow. 2006. Interactive plasticizing- antiplasticizing effects of water and glycerol on the tensile properties of tapioca starch films. **Food Hydrocolloids** 20: 1-8.
- _____, P.B. Cheah and C.C. Seow. 2000. Variations in flexural and compressive fracture behavior of a brittle cellular food (dried bread) in response to moisture sorption. **Journal of Texture Studies** 31: 525-540.
- Chasin, L. and D. Mowshowitz. 2006. **Activation Energy**. Available Source: http://www.columbia.edu/~c2005/lectures/lec05_06.pdf, December 6, 2006.
- Dissayanun, D. 2006. Conver story snack trends. **Asia Pacific Food Industry Thailand** 3: 38-42.
- Duizer, L.M., O.H. Campanella and G.R.G. Barnes. 1998. Sensory instrumental and acoustic characteristics of extruded snack food products. **Journal of Texture studies** 29: 297-411.
- Durakova, A.G. and N.D. Menkov. 2005. Moisture sorption characteristics of chickpea flour. **Journal of Food Engineering** 68: 535-539.
- Erbas, M., M.F. Ertugay and M. Certel. 2005. Moisture adsorption behavior of semolina and farina. **Journal of Food Engineering** 69: 191-198.
- Ertugay, M.F. and M. Certel. 2000. Moisture sorption isotherms of cereals at different temperatures. **Nahrung** 44: 107-109.
- Ferriola, D. and M. Stone. 1998. Sweetener effects on flaked millet breakfast cereals. **Journal of Food Science** 63: 726-729.

- Fontanet, I., S. Davidou, C. Dacremont and M. Le Meste. 1997. Effect of water on the mechanical behavior of extruded flat bread. **Journal of Cereal Science** 25: 303-311.
- Fowle, J. 2005. **Developments in Barrier Films for Packaging**. Pira International Ltd, UK.
- Gal, S. 1987. The need for, and practical applications of sorption data, pp. 13-25. *In* R. Jowitt, F. Escher, M. Kent and B. McKenna. eds. **Physical Properties of Foods-2**. Elsevier Applied Science, London.
- Garcia-Perez, J.V., J.A. Carcel, G. Clemente and A. Mulet. 2007. Water sorption isotherms for lemon peel at different temperatures and isosteric heats. **Journal of Food Engineering** 78: 443-448.
- Goula, G.M., T.D. Karapantsios, D.S. Achilias and K.G. Adamopoulos. 2008. Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp. **Journal of Food Engineering** 85: 73-83.
- Greenspan, L. 1977. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. **Journal of Research of the Nation Bureau of Standards** 81A: 89-96.
- Hecke, E.V., K. Allaf and J.M. Bouvier. 1995. Texture and structure of crispy-puffed food products I: mechanical properties in bending. **Journal of Texture Studies** 26: 11-25.
- Hernandez, R.J., S.E.M. Selke and J.D. Culter. 2000. **Plastics Packaging: Properties, Processing, Applications and Regulations**. Hanser Gardner Publications, Inc., USA.
- Holt, S.D., K.H. Mcwatters and A.V.A. Resurreccion. 1992. Validation of predicted baking performance of muffins containing mixtures of wheat, cowpea, peanut, sorghum, and cassava flours. **Journal of Food Science** 57: 470-474.

- Hough, G., M.D.P. Buera, J. Chirife and O. Moro. 2001. Sensory texture of commercial biscuits as a function of water activity. **Journal of Texture Studies** 32: 57-74.
- Hudson, B.J.F. and A.O. Ogunsua. 1976. The effects of fiber, starch damage and surfactants on the baking quality of wheat/cassava composite flours. **Journal of Food Technology** 11: 129-136.
- Iglesias, H.A. and J. Chirife. 1976. A model for describing the water sorption behavior of foods. **Journal of Food Science** 41: 984-992.
- _____. 1982. **Handbook of Food Isotherms; Water Sorption Parameters for Food and Food Components**. Academic Press, New York.
- Iguedjal, T., N. Louka and K. Allaf. 2008. Sorption isotherms of potato slices dried and texturized by controlled sudden. **Journal of Food Engineering** 85: 180-190.
- Jamali A., M. Kouhila, L.A. Mohamed, J.T. Jaouhari, A. Idliman and N. Abdenouri. 2006. Sorption isotherm of *Chenopodium ambrosioides* leaves at three temperatures. **Journal of Food Engineering** 72: 77-84.
- Jenekhe, S.A. and J.W. Lin. 1983. Diffusion and permeation of vapors in composite polymer thin films. **Thin Solid Films** 105: 331-342.
- Kapanin, V.V. and O.B. Lemanik. 1975. Cell to investigate gas transfer through stress deformed films by a gas chromatograph. **Polymer Science U.S.S.R.** 17: 2713-2716.
- Katz, E.E, and T.P. Labuza. 1981. Effect of water activity on the sensory crispness and mechanical deformation of snack products. **Journal of Food Science** 46: 403-409.

- Kaymak-Ertekin, F. and M. Sultanoglu. 2001. Moisture sorption isotherm characteristics of peppers. **Journal of Food Engineering** 47: 225-231.
- Kilcast, D. and P. Subramaniam. 2000. Introduction, pp. 1-22. *In* D. Kilcast and P. Subramaniam, comps. **The stability and shelf-life of food**. CRC Press LLC, USA.
- Kumar, K.R. 2000. Moisture sorption and packaging characteristics of Arabian dry cereal foods. **Journal of Food Science and Technology** 37: 330-333.
- Labuza, T.P. 1975. Interrelation of sorption data in relation to the state of constituent water, pp. 155-172. *In* R. Duckworth, ed. **Water Relations in Foods**. New York Academic, New York.
- _____. 2000. **An Update on Continued Effects in Understanding Practical Strategies for Determining and Testing the Shelf life of Food Products**. University of Minnesota, USA. (Unpublished manuscript)
- Lane, R.H. 1998. Chapter 32: cereal foods, pp. 1-37. *In* AOAC, comp. **Official Methods Analysis of AOAC International**. 16th ed. AOAC International, Maryland, USA.
- Lewicki, P.P. 1998. A three parameter equation for food moisture sorption isotherm. **Journal of Food Process Engineering** 21: 127-144.
- Li, Y., M.K. Kloeppel and F. Hsieh. 1998. Texture of glassy corn cakes as a function of moisture. **Journal of Food Science** 63: 1-4.
- Lopez, A.C.B., A.J.G. Pereira and R.G. Junquetra. 2004. **Flour mixture of rice flour, corn and cassava starch in the production of gluten-free white bread**. Belo Horizonte, Brazil.

- MacDonald, W.A., D.H. MacKerron and D.W. Brooks. 2002. PET film and sheet, pp. 116-157. *In* D.W. Brooks and G.A. Giles, comps. **PET packaging technology**. Sheffield Academic Press, UK.
- Mathlouthi, M. and B. Roge. 2001. Water content, water activity and water structure, three approaches of water food interactions: application to crystalline sugar stability. **Zuckerindustrie** 126: 880-884.
- Marino, V., K. Yotsuyanagi, E. Vicente, L.M. Oliveira, M.H. Taniwaki, A. de Vitali and E.V. de Faria. 2005. Shelf- life of dried banana in PVC films and metallized OPP Packaging, pp. 1-13 *In* **IAPRI Symposium 22nd ed.** Campinas, Brazil.
- Martinez-Navarrete, N., G. Moragu, P. Talens and A. Chiralt. 2004. Water sorption and the plasticization effect in waters. **International Journal of Food Science Technology** 39: 555-562.
- Massey, L.K. 2002. **Permeability Properties of Plastics and Elastomers**. 2nd ed. Plastics Design Library/William Andrew Publishing, United State of America.
- McLaughlin, C.P. and T.R.A. Magee. 1998. The determination of sorption isotherm and the isosteric heats of sorption for potatoes. **Journal of Food Processing Engineering** 35: 267-280.
- McMinn, W.A.M., D.J. McKee and T.R.A. Magee. 2007. Moisture adsorption behavior of oatmeal biscuit and oat flakes. **Journal of Food Engineering** 79: 481-493.
- _____. and T.R.A. Magee. 1999. Studies on the effect of temperature on the moisture sorption characteristics of potatoes. **Journal of Food Processing Engineering** 22: 113-128.

- Mohamed, S., N. Abdullah and M.K. Muthu. 2006. Physical properties of keropok (fried crisps) in relation to the amylopectin content of the starch flours. **Journal of the Science of Food and Agriculture** 49: 369-377.
- _____, N.A. Hamid and M.A. Hamid. 1993. Food components affecting the oil absorption and crispness of fries batter. **Journal of the Science of Food and Agriculture** 78: 39-45.
- Ngoddy, P.O. and F.W. Bakker-Arkema. 1975. A theory of sorption hysteresis in biological materials. **Journal of Agricultural Engineering Research** 20: 109-121.
- Nicholls, R.J., I.A.M. Appelqvist, A.P. Davies, S.J. Ingman and P.J. Lillford. 1995. Glass transition and the fraction behavior of gluten and starches within the glassy state. **Journal of Cereal Science** 21: 25-36.
- Nielsen, B.R., H. Stapelfeldt and L.H. Skibsted. 1997. Early prediction of the shelf -life of medium-heat whole milk powder using stepwise multiple regression and principal component analysis. **Industrial Dairy Journal** 7: 341-348.
- Oswin, C.R. 1946. The kinetics of Packaging Life III. The Isotherm. **Journal of the Society of Chemical Industry** 65: 419-421.
- Pachico, D. 1997. **Linking Small Farms with Growth Markets to Build Sustainable Livelihoods in Rural areas.** (Annual Report). International Center for Tropical Agriculture.
- Paine, F.A. and H.Y. Paine. 1992. **A Handbook of Food Packaging.** Great Britain at the University Press, Cambridge.

- Palipane, K.B. and R.H. Driscoll. 1992. Moisture sorption characteristics of in shell macademia nut. **Journal of Food Engineering** 25: 63-76.
- Palou, E., A. Lopez-Malo, and A. Argaziz. 1997. Effect of temperature on the moisture sorption isotherms of some cookies and corn snacks. **Journal of Food Engineering** 31: 85-93.
- Peleg, M. 1988. An empirical model for the description of moisture sorption curves. **Journal of Food Science** 53: 1216-1217,1219.
- Peleg, M. 1993. Assessment of a semi empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. **Journal of Food Process Engineering** 16: 21-37.
- Perez-Alonso, C., C.I. Beristain, M.E. Rodriguez-Huezo and E.J. Vernon-Carter. 2006. Thermodynamic analysis of the sorption isotherms of pure and blended carbohydrate polymers. **Journal of Food Engineering** 77: 753-760.
- Pinto, G. and A. Esin. 2004. Kinetics of the osmotic hydration of chickpeas. **Journal of Chemical Education** 88: 532-536.
- Rahman, M.S. and R.H. Al-Belushi. 2006. Dynamic isopiestic method (DIM): measuring moisture sorption isotherm of freeze-dried garlic powder and other potential uses of DIM. **International Journal of Food Properties** 9: 421-437.
- Robertson, G.L. 2006. **Food Packaging Principles and Practice**. 2nd ed. CRC Press, USA.
- Rohm, H. 1990. Consumer Awareness of food texture in Austria. **Journal of Texture Studies** 21: 363-373.

- Roos, Y., K. Roininen, K. Jouppila and H. Tuorila. 1998. Glass transition and water plasticization effects on crispness of a snack food extrudate. **International Journal of Food Properties** 1: 163-180.
- _____ and M. Karel. 1991. Plasticizing effect of water on thermal behavior and crystallization of amorphous food models. **Journal of Food Science** 56: 38-43.
- Roudaut, G., C. Dacremont, B.V. Pamies, B. Colas and M.L. Meste. 2002. Crispness: a critical review on sensory and material science approaches. **Trends in Food Science and Technology** 13: 217-227.
- _____, _____ and M.L. Meste. 1998. Influence of water on the crispness of cereal based foods acoustic, mechanical, and sensory studies. **Journal of Texture Studies** 29: 199-213.
- Samapundo, S., F. Devlieghere, B.D. Meulenaer, A. Atukwase, Y. Lamboni and J.M. Debevere. 2007. Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn. **Journal of Food Engineering** 79: 168-175.
- Semenova, S.I., H. Ohya, T. Higashijima and Y.Negshi. 1992. Dependence of permeability through polyimide membranes on state of gas, vapor, liquid and supercritical fluid at high temperature. **Journal of Membrane Science** 67: 29-37.
- Seow, C.C., P.B. Cheah and Y.P. Chang. 1999. Antiplasticization by water in reduced-moisture food systems. **Journal of Food Science** 64: 576-581.
- Simal, S., A. Femenia, A. Castell-Palou and C. Rossello. 2007. Water desorption thermodynamic properties of pineapple. **Journal of food Engineering** 80: 1293-1301.

- Slade, L. and H. Levine. 1991. Beyond water activity: recent advances based on an alternative approach to the assessment of food quality and safety. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition** 30: 115-360.
- _____. 1995. Water and the glass transition - dependence of the glass transition on composition and chemical structure: special implication for flour functionality in cookie baking. **Journal of Food Engineering** 24: 431-509.
- Soroka, W. 2002. **Fundamentals of Packaging Technology**. 3rd ed. Institute of Packaging Professionals, Illinois.
- Spiess, W.E.L. and W. Wolf. 1983. The results of the COST 90 project on water activity, pp. 65-91. *In* W. Spiess, W. Wolf, R. Jowitt and F. Escher, eds. **Physical Properties of Foods**, Applied Science Publishers, London.
- Szczesniak, A.S. and D.H. Kleyn. 1963. Consumer Awareness of texture and other food attributes. **Journal of Food Technology** 63: 74-77.
- _____. 1971. Consumer Awareness of texture and other food attributes. **Journal of Texture Studies** 2: 196-206.
- Taoukis, P.S., W.N. Breene and T.P. Labuza. 1988. Intermediate-moisture foods in advances. **Cereal Science and Technology** 9: 91-128.
- Thakur, S. and D.C. Saxena. 2000. Formulation of extruded snack food (gum based cereal-pulse blend): optimization of ingredients levels using response surface analysis. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie** 33: 354-361.
- Timmermann, E.O., J. Chirife and H.A. Iglesias. 2001. Water sorption of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters. **Journal of Food Engineering** 48: 19-31.

- Trujillo, F.J., P.C. Yeow and Q.T. Pham. 2003. Moisture sorption isotherm of fresh lean beef and external beef fat. **Journal of Food Engineering** 60: 357-366.
- Van Boekel, M.A.J.S. and L.M.M. Tijskens. 2001. Kinetic modeling, pp. 35-57. *In* L.M.M. Tijskens, M.L.A.T.M. Hertog and B.M. Nicolai, comp. **Food Process Modeling**. CRC Press, USA.
- Van den Berg, C. and S. Bruin. 1981. Water activity and its estimation in food systems, pp. 147-177. *In* L.B. Rockland and F. Stewart, eds. **Water Activity: Influence on Food Quality**. Academic Press, New York.
- Van den Berg, C., F.S. Kaper, J.A.G. Weldring and I. Wolters. 1975. Water binding by potato starch. **Journal of Food Technology** 10: 589-602.
- _____. 1981. **Vapour Sorption Equilibrium and Other Water-Starch Interactions: A Physico-Chemical Approach**. Ph.D. thesis, The Netherlands, Agriculture University of Wageningen.
- Viswanathan, R., D.S. Jayas and R.B. Hulasare. 2003. Sorption isotherms of tomato slices and onion shreds. **Biosystems Engineering** 86: 465-472.
- Vrentas, J.S., J.L. Duda, and H.C. Ling. 1988. Antiplasticization and volumetric behavior in glassy polymers. **Macromolecules** 21: 1470-1475.
- Wang, H.L. and B.R. Mattes. 1999. Gas transport and sorption in polyaniline thin film. **Synthetic Metals** 102: 1333-1334.
- Wang, N. and J.G. Brennan. 1991. Moisture sorption isotherms characteristics of potatoes at four temperatures. **Journal of Food Engineering** 14: 269-287.

- Wang, Z.F., B. Wang, X.M. Ding, M. Zhang, L.M. Lui, N. Qi. and J.L. Hu. 2004. Effect of temperature and structure on the free volume and water vapor permeability in hydrophobic polyurethanes. **Journal of Membrane Science** 241: 355-361.
- Wolf, W., W.E.L. Spiess and G. Jung. 1985. Standardization of isotherm measurements (cost-project 90 and 90 bis). pp. 661-679. *In* D. Simatos and J.L. Multon, eds. **Properties of Water in Foods in Relation to Quality and Stability**. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, UK.
- Xianda, Y., W. Anlai and C. Suqin. 1987. Water vapor permeability of polyvinyl alcohol films. **Desalination** 62: 293-297.
- Xiong, L. 2002. **Determination and Prediction of Shelf Life of Moisture-Sensitive Post® Shredded Wheat Cereal**. Michigan State University, USA. (Unpublished manuscript)
- Yilgor, I. and E. Yilgor. 1999. Hydrophilic polyurethaneurea membranes: influence of soft block composition on the water vapor permeation rates. **Polymer** 40: 5575-5581.
- Young, J.F. 1967. Humidity control in the laboratory using salt solutions - a review. **Journal of Applied Chemistry** 17: 241-245.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การเตรียมสารละลายลิเทียมคลอไรด์

การเตรียมสารละลายลิเทียมคลอไรด์

3. อุปกรณ์และสารเคมี

- ลิเทียมคลอไรด์
- น้ำกลั่น
- โถคู่ความชื้น
- เครื่องชั่งน้ำหนัก

4. การเตรียมสารละลาย

การเตรียมสารละลายลิเทียมคลอไรด์เพื่อใช้ปรับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส สามารถคำนวณได้ดังนี้

จากตารางภาคผนวกที่ ก1 เกลือลิเทียมคลอไรด์ปริมาณ 9 กรัม ต่อ น้ำกลั่น 91 กรัม จะให้ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90.50 เกลือลิเทียมคลอไรด์ปริมาณ 9.5 กรัม ต่อน้ำกลั่น 90.5 กรัม จะให้ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 89.80

ดังนั้น การเตรียมสารละลายลิเทียมคลอไรด์เพื่อใช้ปรับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้เกลือลิเทียมคลอไรด์} &= \frac{9 + (90.50 - 90.00) \times (9.50 - 9.00)}{(90.50 - 89.80)} \\ &= 9.357 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

เพื่อปรับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90.00 ต้องใช้เกลือลิเทียมคลอไรด์ปริมาณ 9.356 กรัม ต่อน้ำกลั่น 90.643 กรัม

ตารางผนวกที่ ก1 วอเตอร์แอกติวิตีของสารละลายลิเทียมคลอไรด์ ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ถึง 45 องศาเซลเซียส

ความเข้มข้น (น้ำหนักร้อยละ)	A_w ที่ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)								
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
0.5	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996
1.0	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992
1.5	0.988	0.988	0.988	0.988	0.988	0.988	0.988	0.988	0.988
2.0	0.983	0.983	0.983	0.983	0.983	0.983	0.984	0.984	0.984
2.5	0.979	0.979	0.979	0.979	0.979	0.979	0.979	0.979	0.979
3.0	0.974	0.974	0.974	0.974	0.974	0.974	0.975	0.975	0.975
3.5	0.969	0.970	0.970	0.970	0.970	0.970	0.970	0.970	0.970
4.0	0.964	0.964	0.965	0.965	0.965	0.965	0.965	0.965	0.965
4.5	0.959	0.959	0.960	0.960	0.960	0.960	0.960	0.960	0.960
5.0	0.954	0.954	0.954	0.954	0.954	0.954	0.955	0.955	0.955
5.5	0.948	0.949	0.949	0.949	0.949	0.949	0.949	0.949	0.950
6.0	0.943	0.943	0.943	0.943	0.943	0.943	0.944	0.944	0.944
6.5	0.937	0.937	0.937	0.937	0.937	0.938	0.938	0.938	0.938
7.0	0.931	0.931	0.931	0.931	0.931	0.932	0.932	0.932	0.932
7.5	0.924	0.924	0.925	0.925	0.925	0.925	0.925	0.926	0.926
8.0	0.917	0.918	0.918	0.918	0.919	0.919	0.919	0.919	0.919
8.5	0.911	0.911	0.911	0.911	0.912	0.912	0.912	0.913	0.913
9.0	0.904	0.904	0.905	0.905	0.905	0.905	0.906	0.906	0.907
9.5	0.896	0.897	0.897	0.897	0.898	0.898	0.898	0.899	0.900
10.0	0.889	0.889	0.889	0.890	0.890	0.891	0.891	0.892	0.893
10.5	0.881	0.881	0.882	0.882	0.883	0.883	0.884	0.884	0.885
11.0	0.873	0.873	0.874	0.874	0.875	0.875	0.876	0.876	0.877
11.5	0.864	0.865	0.865	0.866	0.867	0.867	0.868	0.868	0.870
12.0	0.855	0.856	0.857	0.857	0.858	0.859	0.859	0.860	0.861
12.5	0.847	0.847	0.848	0.849	0.849	0.851	0.851	0.852	0.853
13.0	0.837	0.838	0.839	0.840	0.841	0.841	0.842	0.843	0.844
13.5	0.828	0.829	0.830	0.830	0.831	0.832	0.833	0.834	0.836
14.0	0.818	0.815	0.820	0.821	0.822	0.823	0.823	0.825	0.826
14.5	0.808	0.809	0.810	0.811	0.812	0.813	0.814	0.815	0.817
15.0	0.797	0.799	0.800	0.801	0.802	0.803	0.804	0.805	0.807
15.5	0.787	0.788	0.789	0.790	0.792	0.793	0.794	0.795	0.797
16.0	0.776	0.777	0.778	0.780	0.781	0.782	0.783	0.785	0.787
16.5	0.764	0.766	0.767	0.769	0.770	0.771	0.773	0.774	0.777
17.0	0.753	0.754	0.756	0.757	0.759	0.760	0.762	0.763	0.766
17.5	0.741	0.743	0.744	0.746	0.747	0.749	0.750	0.752	0.755
18.0	0.729	0.730	0.732	0.734	0.730	0.737	0.739	0.741	0.744
18.5	0.716	0.718	0.720	0.722	0.724	0.725	0.727	0.729	0.732
19.0	0.703	0.705	0.707	0.709	0.711	0.713	0.715	0.717	0.721
19.5	0.690	0.692	0.695	0.696	0.699	0.701	0.702	0.705	0.709
20.0	0.677	0.679	0.681	0.683	0.686	0.688	0.690	0.692	0.696
21.0	0.649	0.652	0.654	0.657	0.659	0.662	0.664	0.666	0.671
22.0	0.621	0.623	0.626	0.629	0.632	0.634	0.637	0.640	0.645
23.0	0.591	0.594	0.597	0.600	0.603	0.606	0.608	0.612	0.618

ภาคผนวก ข

การวัดอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพลาสติก

การวัดอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพลาสติก

1. เครื่องมือ

- ถ้วยอะลูมิเนียมสำหรับทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ (test dish)
- โถดูดความชื้น
- เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง
- ซิลิกาเจลอบแห้ง
- พาราฟิน

2. การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างฟิล์มต้องไม่มีรอยพับ ชูดขีด ร้าว ตัดตัวอย่างเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7 เซนติเมตร เก็บตัวอย่างในห้องปรับสภาพที่ควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 27 ± 1 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง

3. วิธีทดสอบ

นำถ้วยอะลูมิเนียมตามมาตรฐานมาใส่สารดูดความชื้น ได้แก่ ซิลิกาเจล ที่อบแห้งแล้ว นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างมาปิดปากถ้วยแล้วหยอดพาราฟินเหลวเพื่อยึดฟิล์มไว้ให้แน่นสนิทและป้องกันอากาศผ่านเข้าออกที่ขอบรอยต่อระหว่างปากถ้วยกับแผ่นฟิล์ม นำถ้วยไปชั่งน้ำหนักเริ่มต้นก่อนนำไปเก็บในสภาวะควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ จากนั้นนำถ้วยออกมาชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่กำหนด บันทึกเวลาและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและเวลาจนได้กราฟเส้นตรง

4. การคำนวณ

$$\text{อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (WVTR)} = \frac{(G/t)}{A}$$

โดย

WVTR = อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (กรัมต่อตารางเมตร วัน)

G/t = อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่อเวลา (slope)

A = พื้นที่ของตัวอย่าง (ตารางเมตร)

ภาคผนวก ค
สูตรและวิธีการทำขนมปัง

วิธีการทำขนมผิง

1. ส่วนผสม

- แป้งมันร้อยละ	55.20
- น้ำกะทิร้อยละ	18.40
- ไข่ร้อยละ	1.15
- น้ำตาลร้อยละ	23.00
- น้ำร้อยละ	2.3

2. วิธีการทำ

ผสมน้ำกะทิ และน้ำตาล อุ่นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เคี่ยวจนกระทั่งเหลือน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 40 จากนั้นเติมไข่แดง และผสมแป้งมัน โดยใส่แป้งลงไปทีละน้อยขนาดที่ระดับความเร็วต่ำ โดยใช้เครื่องผสม นวดจนกระทั่งได้แป้งเหนียวเนื้อเนียน เก็บใส่ในภาชนะที่มีฝาปิดแน่นสนิท ทิ้งไว้ค้างคืนที่อุณหภูมิห้อง ก่อนปั้นเติมน้ำลงไปนวดให้แป้งนิ่มเป็นเนื้อเดียวกัน ปั้นเป็นก้อนกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร วางบนถาดที่ทาน้ำมันเพื่อไม่ให้ขนมติดกัน อบที่อุณหภูมิ 300 องศาฟาเรนไฮด์ นาน 20 นาที เมื่อขนมเย็นเก็บขนมไว้ในภาชนะปิดสนิท

ภาคผนวก ง
การวิเคราะห์ความชื้น

การวิเคราะห์ความชื้น

1. เครื่องมือ

- กระจกอะลูมิเนียม
- ตู้อบลมร้อน
- เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง

2. การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างถูกบดให้เป็นชิ้นเล็กๆ

3. วิธีวิเคราะห์

อบกระจกอะลูมิเนียมพร้อมฝาในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 ถึง 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาใส่ในโถดูดความชื้น ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วชั่งน้ำหนักกระจก ใสตัวอย่างประมาณ 2 กรัม ชั่งน้ำหนักกระจกพร้อมตัวอย่างก่อนอบ แล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 ถึง 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำออกมาใส่โถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักหลังอบเมื่อกระจกเย็น อบซ้ำจนกระทั่งน้ำหนักต่างกันไม่เกิน 2 มิลลิกรัม น้ำหนักที่น้อยที่สุดถือเป็นน้ำหนักหลังอบที่จะนำไปคำนวณ

4. วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)} = \frac{100 \times (W_1 - W_2)}{(W_1 - W)}$$

เมื่อ

W = น้ำหนักของกระจกอะลูมิเนียม (กรัม)

W_1 = น้ำหนักของกระจกอะลูมิเนียมและตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของกระจกอะลูมิเนียมและตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

ภาคผนวก จ
การทำนายอายุการเก็บ

การทำนายอายุการเก็บ

1. การทำนายอายุการเก็บแบบดั้งเดิม

การทำนายโดยใช้ค่า P ที่อุณหภูมิ 38±1 องศาเซลเซียส

1.1 ถุง LDPE

สมการที่ (14)

$$t = \frac{ql}{AP\Delta p} \quad (14)$$

เมื่อ

t = เวลา

P = สัมประสิทธิ์สภาพให้ซึมผ่านได้

= 0.27854 กรัม มิลต่อตารางเมตร วัน มิลลิเมตรปรอท

q = น้ำหนัก x (ความชื้นวิกฤติ- ความชื้นเริ่มต้น)

= 52.0653 x (0.06-0.04096)

= 0.9911 กรัม

l = ความหนา

= 1.9685 มิล

A = พื้นที่

= 0.103 x 0.156

= 0.01607 ตารางเมตร

$\Delta p = \frac{\text{ความดันไอน้ำอิ่มตัว (ความชื้นสัมพัทธ์ด้านนอก- ความชื้นสัมพัทธ์ด้านใน)}}{100}$

= $\frac{31.824}{100} \times \frac{50}{100} - \frac{(0.040964+0.06)}{2}$

= 14.30546038 มิลลิเมตรปรอท

แทนค่า

$$t = \frac{0.9911 \times 1.9685}{0.01607 \times 0.27854 \times 14.30546038}$$

$$= 30.4721 \text{ วัน}$$

อายุการเก็บของขนมฝงที่บรรจุในถุง LDPE ที่ทำนายได้โดยใช้ค่า P ที่อุณหภูมิ 38 ± 1 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน จะมีอายุการเก็บ 30 วัน

1.2 ถุง OPP

เมื่อ

t = เวลา
P = 0.0861 กรัม มิลต่อตารางเมตร วัน มิลลิเมตรปรอท ที่ 38 ± 1 องศาเซลเซียส

$$q = 51.682 \times (0.06 - 0.04096)$$

$$= 0.98382 \text{ กรัม}$$

$$l = 1.9685 \text{ มิล}$$

$$A = 0.103 \times 0.156$$

$$= 0.01607 \text{ ตารางเมตร}$$

$$\Delta p = \frac{31.824}{100} \times \frac{(50 - (0.040964 + 0.06))}{2}$$

$$= 14.30546038 \text{ มิลลิเมตรปรอท}$$

แทนค่า

$$t = \frac{0.98382 \times 1.9685}{0.01607 \times 0.0861 \times 14.30546038}$$

$$= 97.8498 \text{ วัน}$$

อายุการเก็บของขนมฝิงที่บรรจุในถุง OPP ที่ทำนายได้โดยใช้ค่า P ที่อุณหภูมิ 38±1 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน จะมีอายุการเก็บ 98 วัน

2. การทำนายอายุการเก็บโดยใช้ E_a เป็นตัวปรับค่า

การปรับค่า P

จากสมการที่ (13)

$$P_2 = P_1 e^{-E_a/R(1/T_2-1/T_1)} = P_1 e^{E_a/R(1/T_1-1/T_2)} \quad (13)$$

2.1.1 ถุง LDPE

เมื่อ

$$E_a = \text{พลังงานก่อกัมมันต์}$$

$$= 21.317096 \text{ กิโลจูลต่อโมล (ค่า } E_a \text{ ของฟิล์ม LDPE ในตารางที่ 4)}$$

$$R = \text{ค่าคงที่ก๊าซ}$$

$$= 8.314 \text{ จูลต่อโมล เคลวิน}$$

$$T_1 = 25 \text{ องศาเซลเซียส} = 273+25 \text{ เคลวิน}$$

$$T_2 = 30 \text{ องศาเซลเซียส} = 273+30 \text{ เคลวิน}$$

$$P_1 = P_{25^\circ\text{C}} = 0.19856 \text{ กรัม มิลต่อตารางเมตร วัน มิลลิเมตรปรอท}$$

$$P_2 = P_{30^\circ\text{C}}$$

แทนค่า

$$\frac{E_a}{R} = \frac{(21.317096 \times 1000)}{8.314}$$

$$= 2564 \text{ เคลวิน}$$

$$\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} = \frac{1}{25+273} - \frac{1}{30+273}$$

$$= 5.53747E-05 \text{ เคลวิน}^{-1}$$

$$e^{E_p/r(1/T_1-1/T_2)} = e^{2564(5.53747E-05)}$$

$$= 1.152554336$$

$$P_{30^{\circ}\text{C}} = P_{25^{\circ}\text{C}} \times 1.152554336$$

$$= 0.19856 \times 1.15255433$$

$$= 0.22885 \text{ กรัม มิลต่อตารางเมตร วัน มิลลิเมตรปรอท}$$

หลังปรับเปลี่ยนค่าจะได้ค่า P ของถุง LDPE ที่อุณหภูมิ 30±1 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.22885 กรัม มิล ต่อตารางเมตร วัน มิลลิเมตรปรอท

2.1.2 ถุง OPP

เมื่อ

$$E_p = 21.3910906 \text{ กิโลจูลต่อโมล (ค่า } E_a \text{ ของฟิล์ม OPP ในตารางที่ 2)}$$

$$R = 8.314 \text{ จูลต่อ โมล เคลวิน}$$

$$T_1 = 20 \text{ องศาเซลเซียส} = 273+20 \text{ เคลวิน}$$

$$T_2 = 30 \text{ องศาเซลเซียส} = 273+30 \text{ เคลวิน}$$

$$P_1 = P_{25^{\circ}\text{C}} = 0.5145 \text{ กรัม มิลต่อตารางเมตร วัน มิลลิเมตรปรอท}$$

$$P_2 = P_{30^{\circ}\text{C}}$$

แทนค่า

$$\frac{E_p}{R} = \frac{(21.3910906 \times 1000)}{8.314}$$

$$= 2572.9 \text{ เคลวิน}$$

$$\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} = \frac{1}{20+273} - \frac{1}{30+273}$$

$$\begin{aligned}
&= 0.000112639 \\
e^{Ep/r(1/T1-1/T2)} &= e^{2572.9(0.000112639)} \\
&= 1.336172959 \\
P_{30^{\circ}\text{C}} &= P_{25^{\circ}\text{C}} \times 1.336172959 \\
&= 0.05145 \times 1.336172959 \\
&= 0.06874 \text{ กรัม มิลต่อตารางเมตร วัน มิลลิเมตรปรอท}
\end{aligned}$$

หลังปรับค่าจะได้ค่า P ของถุง OPP ที่อุณหภูมิ 30±1 องศาเซลเซียสเท่ากับ 0.06874
กรัม มิลต่อตารางเมตร วัน มิลลิเมตรปรอท

2.2 การคำนวณอายุการเก็บ

2.2.1 การคำนวณอายุการเก็บในถุง LDPE

จากสมการที่ (14)

$$t = \frac{ql}{AP\Delta p} \quad (14)$$

เมื่อ

t = เวลา

P = 0.2288 กรัม มิลลิเมตรต่อตารางเมตร วัน มิลลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิ
30±1 องศาเซลเซียส ซึ่งปรับค่าจากค่า P ที่อุณหภูมิ 25±1 องศาเซลเซียส โดยใช้ E_u

$$\begin{aligned}
q &= 52.0653 \times (0.06 - 0.04096) \\
&= 0.9911 \text{ กรัม}
\end{aligned}$$

$$l = 1.9685 \text{ มิล}$$

$$A = 0.103 \times 0.156$$

$$= 0.01607 \text{ ตารางเมตร}$$

$$\begin{aligned}
\Delta p &= \frac{31.824}{100} \times \left(\frac{50}{100} - \frac{(0.04096+0.06)}{2} \right) \\
&= 14.30546038 \text{ มิลลิเมตรปรอท}
\end{aligned}$$

แทนค่า

$$t = \frac{0.991 \times 1.9685}{0.01607 \times 0.2288 \times 14.30546038}$$

$$= 37.085 \text{ days}$$

อายุการเก็บของขนมปังที่บรรจุในถุง LDPE ที่ทำนายได้หลังจากใช้ E_a ปรับค่า P ให้เป็นค่าที่อุณหภูมิเก็บจริง จะมีอายุการเก็บ 37 วัน

2.2.2 การคำนวณอายุการเก็บในถุง OPP

จากสมการที่ (14)

$$t = \frac{ql}{AP\Delta p} \quad (14)$$

เมื่อ

t = เวลา

P = 0.06874 กรัม มิลต่อตารางเมตร วัน มิลลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิ 30±1 องศาเซลเซียส ซึ่งปรับค่าจากค่า P ที่อุณหภูมิ 20±1 องศาเซลเซียส โดยใช้ E_a

$$q = 51.682 \times (0.06 - 0.04096)$$

$$= 0.98382 \text{ กรัม}$$

$$l = 1.9685 \text{ มิล}$$

$$A = 0.103 \times 0.156$$

$$= 0.01607 \text{ ตารางเมตร}$$

$$\Delta p = \frac{31.824}{100} \times \left(\frac{50}{100} - \left(\frac{0.040964 + 0.06}{2} \right) \right)$$

$$= 14.30546038 \text{ มิลลิเมตรปรอท}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned}t &= \frac{0.98382 \times 1.9685}{0.01607 \times 0.06874 \times 14.30546038} \\ &= 122.562 \text{ วัน}\end{aligned}$$

อายุการเก็บของขนมปังที่บรรจุในถุง OPP ที่ทำนายได้หลังจากใช้ E_a ปรับค่า P ให้เป็นค่าที่อุณหภูมิเก็บจริง จะมีอายุการเก็บ 123 วัน

ภาคผนวก จ
ความดันไอน้ำอิ่มตัว

ตารางผนวกที่ ๑1 ความดันไอน้ำอิ่มตัว

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8
-15	1.436	1.414	1.390	1.368	1.345	43	64.80	65.48	66.16	66.86	67.56
-14	1.560	1.534	1.511	1.485	1.460	44	68.26	68.97	69.69	70.41	71.14
-13	1.691	1.665	1.637	1.611	1.585	45	71.88	72.62	73.36	74.12	74.88
-12	1.834	1.804	1.776	1.748	1.720	46	75.65	76.43	77.21	78.00	78.80
-11	1.987	1.955	1.924	1.893	1.863	47	79.60	80.41	81.23	82.05	82.87
-10	2.149	2.116	2.084	2.050	2.018	48	83.71	84.56	85.42	86.28	87.14
-9	2.326	2.289	2.254	2.219	2.184	49	88.02	88.90	89.79	90.69	91.59
-8	2.514	2.475	2.437	2.399	2.362	50	92.51	93.5	94.4	95.3	96.3
-7	2.715	2.674	2.633	2.593	2.553	51	97.20	98.2	99.1	100.1	101.1
-6	2.931	2.887	2.843	2.800	2.757	52	102.09	103.1	104.1	105.1	106.2
-5	3.163	3.115	3.069	3.022	2.976	53	107.20	108.2	109.3	110.4	111.4
-4	3.410	3.359	3.309	3.259	3.211	54	112.51	113.6	114.7	115.8	116.9
-3	3.673	3.620	3.567	3.514	3.461	55	118.04	119.1	120.3	121.5	122.6
-2	3.956	3.898	3.841	3.785	3.730	56	123.80	125.0	126.2	127.4	128.6
-1	4.258	4.196	4.135	4.075	4.016	57	129.82	131.0	132.3	133.5	134.7
-0	4.579	4.513	4.448	4.385	4.320	58	136.08	137.3	138.5	139.9	141.2
0	4.579	4.647	4.715	4.785	4.855	59	142.60	143.9	145.2	146.6	148.0
1	4.926	4.998	5.070	5.144	5.219	60	149.38	150.7	152.1	153.5	155.0
2	5.294	5.37	5.447	5.525	5.605	61	156.43	157.8	159.3	160.8	162.3
3	5.685	5.766	5.848	5.931	6.015	62	163.77	165.2	166.8	168.3	169.8
4	6.101	6.187	6.274	6.363	6.453	63	171.38	172.9	174.5	176.1	177.7
5	6.543	6.635	6.728	6.822	6.917	64	179.31	180.9	182.5	184.2	185.8
6	7.013	7.111	7.209	7.309	7.411	65	187.54	189.2	190.9	192.6	194.3
7	7.513	7.617	7.722	7.828	7.936	66	196.09	197.8	199.5	201.3	203.1
8	8.045	8.155	8.267	8.380	8.494	67	204.96	206.8	208.6	210.5	212.3
9	8.609	8.727	8.845	8.965	9.086	68	214.17	216.0	218.0	219.9	221.8
10	9.209	9.333	9.458	9.585	9.714	69	223.73	225.7	227.7	229.7	231.7
11	9.844	9.976	10.109	10.244	10.380	70	233.7	235.7	237.7	239.7	241.8
12	10.518	10.658	10.799	10.941	11.085	71	243.9	246.0	248.2	250.3	252.4
13	11.231	11.379	11.528	11.680	11.833	72	254.6	256.8	259.0	261.2	263.4
14	11.987	12.144	12.302	12.462	12.624	73	265.7	268.0	270.2	272.6	274.8
15	12.788	12.953	13.121	13.290	13.461	74	277.2	279.4	281.8	284.2	286.6
16	13.634	13.809	13.987	14.166	14.347	75	289.1	291.5	294.0	296.4	298.8
17	14.530	14.715	14.903	15.092	15.284	76	301.4	303.8	306.4	308.9	311.4
18	15.477	15.673	15.871	16.071	16.272	77	314.1	316.6	319.2	322.0	324.6
19	16.477	16.685	16.894	17.105	17.319	78	327.3	330.0	332.8	335.6	338.2
20	17.535	17.753	17.974	18.197	18.422	79	341.0	343.8	346.6	349.4	352.2
21	18.650	18.880	19.113	19.349	19.587	80	355.1	358.0	361.0	363.8	366.8
22	19.827	20.070	20.316	20.565	20.815	81	369.7	372.6	375.6	378.8	381.8
23	21.068	21.324	21.583	21.845	22.110	82	384.9	388.0	391.2	394.4	397.4
24	22.377	22.658	22.922	23.198	23.476	83	400.6	403.8	407.0	410.2	413.6
25	23.756	24.039	24.326	24.617	24.912	84	416.8	420.2	423.6	426.8	430.2
26	25.209	25.509	25.812	26.117	26.426	85	433.6	437.0	440.4	444.0	447.5
27	26.739	27.055	27.374	27.696	28.021	86	450.9	454.4	458.0	461.6	465.2
28	28.349	28.680	29.015	29.354	29.697	87	468.7	472.4	476.0	479.8	483.4
29	30.043	30.392	30.745	31.102	31.461	88	487.1	491.0	494.7	498.5	502.2
30	31.824	32.191	32.561	32.934	33.312	89	506.1	510.0	513.9	517.8	521.8
31	33.694	34.082	34.471	34.864	35.261	90	525.76	529.77	533.80	537.86	541.95
32	35.663	36.068	36.477	36.891	37.308	91	546.05	550.18	554.35	558.53	562.75
33	37.729	38.155	38.584	39.018	39.457	92	566.99	571.26	575.55	579.87	584.22
34	39.898	40.344	40.796	41.251	41.710	93	588.60	593.00	597.43	601.89	606.38
35	42.175	42.644	43.117	43.595	44.078	94	610.90	615.44	620.01	624.61	629.24
36	44.563	45.054	45.549	46.050	46.556	95	633.90	638.59	643.30	648.05	652.82
37	47.067	47.582	48.102	48.627	49.157	96	657.62	662.45	667.31	672.20	677.12
38	49.692	50.231	50.774	51.323	51.879	97	682.07	687.04	692.05	697.10	702.17
39	52.442	53.009	53.580	54.156	54.737	98	707.27	712.40	717.56	722.75	727.98
40	55.324	55.91	56.51	57.11	57.72	99	733.24	738.53	743.85	749.20	754.58
41	55.34	58.96	59.58	60.22	60.86	100	760.00	756.45	770.93	776.44	782.00
42	61.50	62.14	62.80	63.46	64.12	101	787.57	793.18	798.82	804.50	810.21

ภาคผนวก ข

แบบสอบถามการทดสอบทางประสาทสัมผัส

แบบสอบถามการทดสอบทางประสาทสัมผัส

วันที่.....

ขนมปัง

ชื่อผู้ชิม.....

ประเมินความกรอบและการยอมรับของขนมปังเหล่านี้ โดยการชิม แล้วใส่คะแนนที่มีความหมายตรงกับความรู้สึกของท่านมากที่สุด

รหัส							
ความกรอบ							
การยอมรับ							

คะแนนความกรอบ

1 = นุ่มมากที่สุด

2 = นุ่มมาก

3 = นุ่มปานกลาง

4 = นุ่มเล็กน้อย

5 = กรอบเล็กน้อย

6 = กรอบ

7 = กรอบปานกลาง

8 = กรอบมาก

9 = กรอบมากที่สุด

คะแนนการยอมรับ

1 = ไม่ยอมรับมากที่สุด

2 = ไม่ยอมรับอย่างมาก

3 = ไม่ยอมรับ

4 = ยังยอมรับได้

5 = ยอมรับปานกลาง

6 = ยอมรับมาก

7 = ยอมรับมากที่สุด

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางรัชณีวรรณ กุลจันทร์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	29 ตุลาคม 2513
สถานที่เกิด	จังหวัดราชบุรี
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นักวิชาการ 7
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
การเสนอผลงานทางวิชาการ	เรื่อง “Texture of Glassy Tapioca-Flour-Based Baked Product as a Function of Moisture Content” การประชุมวิชาการ ISOPOW ครั้งที่ 10 ที่โรงแรมมิราเคิล แกรนด์ คอนเวนชัน กรุงเทพฯ ฯ
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนจากกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี