สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประยุกต์ใช้ ไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น เพื่อพัฒนาสูตรอาหารขบเคี้ยว

APPLICATION OF WATER ADSORPTION ISOTHREM FOR DEVELOPMENT OF SNACK FOOD PRODUCTS

โดย

นายณัฐพล แสนยาเจริญกุล

นายสุรเดช สองห้อง

นายอรุณทร ชูเขียว

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ดร. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 62861
วัน,เดือน,ปี 23 ส.ค. 2549
b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอาหาร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การประยุกต์ใช้ ไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น เพื่อพัฒนาสูตร อาหารขบเคี้ยว

APPLICATION OF WATER ADSORPTION ISOTHREM FOR DEVEL0PMENT OF SNACK FOOD PRODUCTS

ผู้จัดทำ

1. นายณัฐพลแสนยา	เจริญกุล	รหัสประจำตัว	46015571
2.นายสุรเดช	สองห้อง	รหัสประจำตัว	46015598
3.นายอรุณทร	ชูเขียว	รหัสประจำตัว	46015603

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. ดร. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้ ไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น เพื่อพัฒนาสูตร อาหารขบเคี้ยว

นาย ณัฐพล แสนยาเจริญกุล 46015571
นาย สุรเดช สองห้อง 46015598
นาย อรุณทร ชูเขียว 46015603
อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์
ปีการศึกษา 2548

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสร้างสูตรผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวโดยการประยุกต์ใช้ไอโซ-เทอร์มแบบดูดความชื้นที่ 25 และ 40 °C ของวัตถุดิบหลักคือ เม็ดมะม่วงหิมพานต์ลูกเดือย เม็ดบัว และงาดำปรุงรส ซึ่งกราฟวัตถุดิบชนิด สามารถอธิบายได้ดีด้วยแบบจำลองของ Halsey พบว่า ผลของอุณหภูมิต่อ การเปลี่ยนแปลงไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น ส่งผลต่อเม็ดมะม่วงหิมพานต์มากที่สุด รองลงมาคืองาดำปรุงรส. เม็ดบัวและลูกเดือยตามลำดับ จากนั้นสร้างผลิตภัณฑ์โดยแบ่งเป็นสามกรณีศึกษาคือ1.ศึกษาผลิตภัณฑ์ ผสมจากถั่วและธัญพืช 2. ศึกษาผลิตภัณฑ์ผสมระหว่างทุเรียนทอดกรอบกับเม็ดมะม่วงหิมพานต์ 3. ศึกษาผลิตภัณฑ์ผสมชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช โดยการประยุกต์ใช้ ไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นและสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อสร้างสูตรผลิตภัณฑ์และทำนายอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ในบรรจุภัณฑ์ปิดสนิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPLICATION OF WATER ADSORPTION ISOTHREM FOR DEVEL0PMENT OF SNACK FOOD PRODUCTS

Mr. Nuttapol Sanyacharoenkul
Mr. Suradach Songhong
Mr. Arunthorn Chukeaw
Asst.Prof.Dr. Pimpen Pornchaloempong
Advisor

ABSTRACT

The aim of this research was to demonstrate the application of water adsorption isotherm for developing snack products formulated by mixing various ingredients. The water adsorption isotherm of main ingredients including cashew nut, tear, lotus seed and sesame at temperature of 25and 40°C were evaluated. The mathematical model of Halsey gave a good explanation of moisture adsorption isotherm for all materials. The model illustrated that temperature change had more effect on moisture adsorption isotherms of cashew nut and sesame seed than lotus seed and tear. Water adsorption isotherms and mathematical models were applied for formulation, package selection and shelf life prediction of product in package. Three snack products sample were demonstrated: 1.the mixture nuts and cereals 2.the product mixed between the durians chips and cashew nut and 3. a nut and cereal bar .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดีด้วยความกรุณาและเมตตาจากบุคคลต่างๆที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้านด้วยความเต็มใจ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ

ผศ. ดร. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ อาจารย์ ที่ปรึกษา ที่ช่วยดูแลการดำเนินงานวิจัยในปริญญานิพนธ์นี้อย่างใกล้ชิด อีกทั้งให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ ช่วยตรวจสอบและแก้ไขปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดี

คณาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหารทุกท่านที่ช่วยกรุณาแก้ไขข้อข้องใจในปัญหาต่างๆทางวิชาการให้ได้รับความกระจ่าง

พี่แป้ง พี่แมน และพี่บุญนำที่ช่วยอำนวยความสะดวกเรื่องการใช้สถานที่และอุปกรณ์ต่างที่ใช้ในการทดลองระหว่างการดำเนินงานวิจัย รวมถึงพี่น้ำ อดีตนักวิทยาศาสตร์ของภาควิชาที่ช่วยให้คำแนะนำเรื่อการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

คุณ เล็ก สำหรับงาดำปรุงรส ที่กรุณาให้มาจากบริษัท โปร – แดรี่ จำกัด

สุดท้ายขอขอบคุณ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมอาหารที่ให้ความร่วมมือในการทดสอบทางประสาทสัมผัสและการสนับสนุนด้านยานพาหนะรวมถึงคำแนะนำด้านภาษาตลอดจนกำลังใจดีๆที่มีให้กับคณะผู้วิจัยเสมอมา

ขอคุณงามความดีทั้งหลายอันใดที่เกิดจากปริญญานิพนธ์เล่มนี้ มอบแด่ พ่อ แม่ และบุพการี อันเป็นที่รักและเคารพยิ่ง คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร ตลอดจนถึงครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้ที่ได้ประสิทธ์ประสาทวิชาความรู้ทั้งหลายมาตลอดชีวิตการศึกษาที่ผ่านมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 ความรู้เกี่ยวกับอาหารขบเคี้ยวประเภทธัญพืช	3
2.2 ความชื้น	6
2.3 วอเตอร์แอกติวิตีใน อาหาร	8
2.4 ไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น	13
2.5 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการผสม	16
2.6 การศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหาร	16
2.7 บรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร	18
บทที่ 3 การทดลอง	22
3.1 การศึกษาไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของวัตถุดิบ	22
3.2 การประยุกต์ใช้ไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของวัตถุดิบ และสมการทาง คณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวแบบผสม	24
3.3 กรณีศึกษาผลิตภัณฑ์ธัญพืชผสมสำเร็จรูปชนิดแท่ง	26
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	29
4.1 ไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น ของวัตถุดิบแต่ละชนิด	29
4.2 ผลจากตัวอย่างการการประยุกต์ใช้ไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของวัตถุดิบ และสมการ ทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวแบบผสม	38
4.3 ผลการศึกษาผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	50
ภาคผนวก	52
ภาคผนวก ก.	53
ภาคผนวก ข.	62
ภาคผนวก ค.	65
ประวัติผู้เขียน	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตัวอย่างจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหารที่รับวอเตอร์แอกติวิตีต่าง ๆ	11
2.2	สมการสำหรับวิเคราะห์ไอโซเทอร์ม	15
3.1	แสดงปริมาณส่วนผสมต่างๆที่กำหนด ต่อหนึ่งหน่วยผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืช	24
3.2	แสดงส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ธัญพืชผสมสำเร็จรูปชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช	27
4.1	ความชื้นของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ ที่อุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลต่างๆ	29
4.2	ความชื้นของลูกเดือย ที่อุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลต่างๆ	30
4.3	ความชื้นของเม็ดบัว ที่อุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลต่างๆ	31
4.4	ความชื้นของงาดำปรุงรส ที่อุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลต่างๆ	32
4.5	เปรียบเทียบค่าประมาณของตัวแปรต่างๆ โดยใช้แบบจำลองของวัตถุดิบชนิดต่างๆ	33
4.6	แสดงระดับคะแนนความชอบเม็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่างๆ	40
4.7	แสดงค่าวอเตอร์แอกติวิตีและความชันของวัตถุดิบที่ใช้เป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืช	41
4.8	แสดงค่าตัวแปรต่างๆเพื่อใช้ทำนายอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืช	42
4.9	แสดงอายุการเก็บของผสมจากถั่วและธัญพืช	43
4.10	แสดงค่าตัวแปรต่างๆและผลการหาวอเตอร์แอกติวิตีเริ่มต้นของทุเรียนทอดกรอบและเม็ดมะม่วงหิมพานต์ที่คำนวณได้	44
4.11	แสดงค่าตัวแปรต่างๆและผลการหาวอเตอร์แอกติวิตีเริ่มต้นของทุเรียนทอดกรอบและเม็ดมะม่วงหิมพานต์ที่คำนวณได้	44
4.12	ความชื้นของผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืชและค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลต่างๆ	45
4.13	แสดงค่าตัวแปรต่างๆเพื่อใช้ทำนายอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช	46
4.14	แสดงอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืชจากการทำนายด้วยสมการ	48
ก.1	ค่า k_1 และ k_2 ของสารละลาย	54
ก.2	ค่าวอเตอร์แอกติวิตีของสารละลาย	54
ก.3	ความชื้นสมดุลของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ เปรียบเทียบกับความชื้นที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองของ Halsey ที่อุณหภูมิ 25 และ 40 องศาเซลเซียส	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ก.4 ความชื้นสมดุลของลูกเดือยเปรียบเทียบกับความชื้นที่ได้จากการทำนาย โดยใช้แบบจำลองของ Halsey ที่อุณหภูมิ 25 และ 40 องศาเซลเซียส 56

ก.5 ความชื้นสมดุลของเมล็ดบัวเปรียบเทียบกับความชื้นที่ได้จากการทำนาย โดยใช้แบบจำลองของ Halsey ที่อุณหภูมิ 25 และ 40 องศาเซลเซียส 57

ก.6 ความชื้นสมดุลของงาดำปรุงรสเปรียบเทียบกับความชื้นที่ได้จากการทำนาย โดยใช้แบบจำลองของ Halsey ที่อุณหภูมิ 25 และ 40 องศาเซลเซียส 58

ก.7 แสดงค่าต่างๆสำหรับหาค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ธัญพืชผสมสำเร็จรูป ที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตี เท่ากับ 0.3 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส 59

ก. 8 แสดงค่าระหว่างความชื้นกับวอเตอร์แอกติวิตีที่ 25 องศาเซลเซียส ของผลิตภัณฑ์ธัญพืชผสมสำเร็จรูปจาก การคำนวณ 60

ก. 9 แสดงค่าระหว่างความชื้นกับวอเตอร์แอกติวิตีที่ 40 องศาเซลเซียส ของผลิตภัณฑ์ธัญพืช ผสมสำเร็จรูปจาก การคำนวณ 60

ก. 10 แสดงค่าต่างๆเพื่อหาค่าความชันเชิงเส้นของไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น (Linear slope) ของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ต่างๆ 62

ข.1 แสดงค่า K ของบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ ในหน่วย ($gH^2O.m/m^2.day.mmHg$) 64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ผลของวอเตอร์แอกติวิตี ต่ออัตราการเสื่อมเสียคุณภาพอาหาร	10
2.2	การสูญเสียความกรอบของอาหารในค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่างๆ กัน	12
2.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี	13
2.4	ตัวอย่างไอโซเทอร์มแบบดูดและคายความชื้น ซึ่งมีรูปแบบ Sigmoidal	14
2.5	ไอโซเทอร์มของผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยว	17
2.6	การถ่ายเทความชื้นผ่านบรรจุภัณฑ์อาหาร	20
4.1	กราฟไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งทำนายโดยแบบจำลองของ Halsey เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง	35
4.2	กราฟไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของเม็ดเมล็ดลูกเดือย ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งทำนายโดยแบบจำลองของ Halsey เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง	35
4.3	กราฟไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของเม็ดบัวที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งทำนายโดยแบบจำลองของ Halsey เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง	36
4.4	กราฟไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของงาดำปรุงรส ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งทำนายโดยแบบจำลองของ Halsey เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง	36
4.5	กราฟไอโซเทอร์มแบบดูดของวัตถุดิบทั้งสี่ ซึ่งทำนาย โดยแบบจำลองของ Halsey เปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	37
4.6	กราฟไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืช ที่อุณหภูมิ 25และ40 องศาเซลเซียส	39
4.7	แสดงค่า M_1 , M_2 และ M_3 บนเส้นกราฟไอโซเทอร์มของผลิตภัณฑ์ธัญพืช ผสมสำเร็จรูป	42
4.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น (EMC) และความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (ERH) ของผลิตภัณฑ์ธัญพืชชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	46
4.9	แสดงค่า Mi , M_2 และ M_3 บนเส้นกราฟไอโซเทอร์มของผลิตภัณฑ์ชนิดแท่ง จากถั่วและธัญพืช	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ผลิตภัณฑ์อาหารจากพืชสำเร็จรูปเป็นอาหารที่ได้รับความนิยมรับประทานของผู้บริโภคเพราะมีสารอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย อร่อยและรับประทานง่ายโดยธัญพืชที่แพร่หลายในปัจจุบันอยู่ในรูปแบบของอาหารสำเร็จรูปที่รับประทานได้ง่ายและสะดวกรวดเร็ว โดยธัญพืชผสมสำเร็จรูปและธัญพืชผสมสำเร็จรูปชนิดแท่งเป็นรูปแบบหนึ่งของอาหารประเภทนี้ ซึ่งผลิตด้วยการนำวัตถุดิบหลายชนิดมาผ่านกรรมวิธีแปรรูปจากนั้นนำมาผสมกันหรืออัดเป็นแท่ง พร้อมรับประทาน ซึ่งมีความน่าสนใจต่อการนำมาพัฒนาสูตรส่วนผสม ให้มีความหลากหลายเพราะสามารถนำวัตถุดิบคือ ธัญพืช รวมทั้งผักผลไม้ต่างๆหรือวัตถุดิบประเภทอื่นที่มีอยู่มากภายในประเทศหรือวัตถุดิบบางประเภทที่ได้จากต่างประเทศแต่แพร่หลายและได้รับความนิยมปัจจุบันมีการผลิตธัญพืชสำเร็จรูปชนิดแท่งออกมาจำหน่ายแต่พบว่าวัตถุดิบที่ใช้ผลิตส่วนใหญ่เป็นของจากต่างประเทศโดยมีส่วนผสมของวัตถุดิบที่มีภายในประเทศเพียงเล็กน้อยแต่หากมีการนำวัตถุดิบที่มีภายในประเทศ มาเป็นส่วนผสมให้มากขึ้น จะเป็นการเพิ่มทางเลือกให้กับผู้บริโภค ให้ได้รับคุณค่าจากสารอาหารที่หลากหลาย และจำเป็นต่อร่างกาย รวมทั้งรสชาติที่อร่อย แปลกใหม่น่ารับประทานและยังเป็นการเพิ่มมูลค่า ให้กับผลผลิตจากการเกษตรอีกด้วย

คณะผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะใช้ประโยชน์จาก ไอโซเทอร์มแบบการดูดความชื้นของอาหารเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างและพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืช และผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษา ไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของวัตถุดิบได้แก่เม็ดมะม่วงหิมพานต์, ลูกเดือย, เม็ดบัวและงาดำปรุงรส

2. เพื่อศึกษาและนำ ไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น มาใช้ประโยชน์ ในการสร้างสูตรอาหารผสมที่เป็นอาหารขบเคี้ยว

3.เพื่อทำนายอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ที่บรรจุภายในบรรจุภัณฑ์ปิดสนิท ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาไอโซเทอร์ม แบบดูด ความชื้นของธัญพืชและถั่วชนิดต่างๆที่ใช้เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 25 และ 40 °C เลือกใช้สมการที่เหมาะสมในการอธิบาย ไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น และสร้างสูตร ผลิตภัณฑ์เพื่อใช้เป็นกรณีศึกษาโดยมี 3 กรณีคือ

1.ผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืช

2 ผลิตภัณฑ์ผสมระหว่างทุเรียนทอดกรอบกับเม็ดมะม่วงหิมพานต์

3. ผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ความรู้เกี่ยวกับอาหารขบเคี้ยวประเภทธัญพืช (วิมลศิริ, 2539)

2.1.1 อาหารเช้าสำเร็จรูปจากพืช

ความหมาย อาหารเช้าสำเร็จรูปจากธัญพืช เป็นอาหารที่ได้จากกระบวนการแปรรูปเมล็ดธัญพืชให้เหมาะสมสำหรับใช้ในการบริโภค โดยเมล็ดธัญพืชหลักที่ใช้ ในระดับอุตสาหกรรมสำหรับอาหารเช้าสำเร็จรูปจากธัญพืชได้แก่ ข้าวโพด ข้าว ข้าวสาลี ข้าวโอ๊ต และข้าวบาร์เล่ต์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะพร้อมที่จะรับประทาน (Ready-to-Eat หรือ Ready-to-Cook หรือ Hot Cereal) (Kadan. 1993)

2.1.2 ประเภทของผลิตภัณฑ์อาหารเช้าสำเร็จรูปจากธัญพืช

Tribelhorn (1991) ได้แบ่งผลิตภัณฑ์อาหารเช้าสำเร็จรูปจากธัญพืชตามวิธีการทำให้สุกก่อนบริโภคได้เป็น 4 ประเภทคือ

1.ประเภทดั้งเดิม (Traditional Cereal) ต้องทำให้สุกโดยใช้เวลาต้มก่อนบริโภค 5-10 นาทีลักษณะเป็นเมล็ดพืชดิบเช่น ข้าวสารหักเป็นชิ้นเล็กๆ เมื่อต้มสุกเรียกว่า โจ๊กโอ๊ตมิล (Oat Meal) ได้จากการบดข้าวโอ๊ตทั้งเม็ดแบบหยาบ หรือโม่ข้าวสาลีอย่างหยาบ เรียกว่า กริต (Grit) ธัญพืชบดหยาบเหล่านี้ต้องต้มนานหลายนาทีจึงจะสุกและบริโภคได้

2. ประเภทต้มเร็ว (Quick Cooking) ใช้เวลาต้มเพียง 1 นาที เช่น โอ๊ตบด (Rolled Oats) นำข้าวโอ๊ตมาบดหยาบ แล้วผ่านเข้าสู่ลูกกลิ้งบด ที่ร้อนด้วยไอน้ำภายในลูกกลิ้งทำให้ข้าวโอ๊ตแบน และสุกไปหนึ่งในสามส่วน เมื่อนำมาบริโภคก็ต้มด้วยเวลาไม่นานก็สุกทั้งหมดรับประทานได้

3. ประเภทสุกทันที (Instant Traditional Hot Cereal) ใช้เติมลงในน้ำร้อนเดือดบริโภคทันทีขณะร้อน ลักษณะเป็นเมล็ดธัญพืชที่ผ่านการทำให้สุกมาแล้ว เช่นนำข้าวบดหยาบมาทำให้สุก ปรุงรส อบแห้ง เป็นโจ๊กสำเร็จรูป

4. ประเภทอาหารเช้าสำเร็จรูป (Ready-to-Eat Cereal) สามารถบริโภคได้ทันที อาจมีการเติมน้ำ น้ำนม หรือโยเกิร์ต ก็ได้เนื่องจากเป็นธัญพืชที่ผ่านกรรมวิธีการผลิต โดยนำเมล็ดพืชมาทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุกและมีการดัดแปลงรูปร่างให้มีความเหมาะสม ปัจจุบันนี้ผลิตภัณฑ์อาหารเช้าสำเร็จรูปจากธัญพืชประเภทนี้ได้รับความนิยมมากที่สุด

นอกจากนี้ สามารถแบ่งได้ตามรูปร่าง และชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์ได้แต่เนื่องจากผลิตภัณฑ์ชนิดนี้ มีหลายลักษณะ ทำให้การแบ่งประเภทไม่ค่อยชัดเจน ตัวอย่างเช่น ผลิตภัณฑ์อาหารเช้าสำเร็จรูปจากธัญพืช ในลักษณะที่บดเป็นผงหยาบ ได้แก่ มิล (meal) และ ฟาริน่า (farina) อัดเป็นแผ่นแบน (flake) ลักษณะพองกรอบ (puff) ลักษณะเป็นชิ้น (shred) และลักษณะเป็นเม็ด (granular) ชนิดธัญพืชที่นิยมนำมาทำผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวโอ๊ต หรือทำมาจากรากของธัญพืชชนิดใดชนิดหนึ่ง หรือหลายชนิดรวมกัน (Kent. 1966 ; อรอนงค์ และ ลินดา, 2535)

ผลิตภัณฑ์อาหารเช้าสำเร็จรูปจากธัญพืช จัดว่าเป็นอาหารขบเคี้ยวชนิดหนึ่งซึ่งเป็นอาหารที่ผ่านกระบวนการแปรรูปมาแล้วพร้อมบริโภคได้ทันที หรือมีการเตรียมเพียงเล็กน้อย เช่น เติมน้ำเดือด สามารถบริโภคได้ระหว่างอาหารแต่ละมื้อ หรือผสมในอาหาร และสามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน 6 สัปดาห์ โดยไม่ต้องอาศัยความเย็น สามารถที่จะแบ่งชนิดของอาหารขบเคี้ยว ได้ 2 ลักษณะคือ อาหารขบเคี้ยวชนิดดั้งเดิม (Conventional Snack) ได้แก่มันฝรั่งทอดกรอบ คอร์นเฟลก และอื่นๆ อาหารคาวหรืออาหารที่ผ่านเครื่องเอ็กทรูเดอร์ พวกถั่วต่างๆ และ อาหารจำพวกแคร็กเกอร์ ที่ให้รสเค็มและมีกลิ่นรสดี และอาหารขบเคี้ยวชนิดใหม่ (Newer Snacks) ได้แก่ อาหารกึ่งสำเร็จรูป อาหารแท่งที่ทำจากธัญพืช เนื้ออาหารจำพวกของหวานที่มีการสอดไส้ชนิดต่างๆ เครื่องดื่มนมที่มีการหมักแล้ว เช่น โยเกิร์ต และขนมอบกรอบที่ให้รสหวาน เช่น คุกกี้ (Blenford, 1982)

สามารถแบ่งกลุ่มของผลิตภัณฑ์อาหารเช้าสำเร็จรูปจากธัญพืชตามลักษณะของผลิตภัณฑ์แบ่งได้เป็น 3 กลุ่มคือ อาหารเช้าสำเร็จรูปจากธัญพืชกลุ่มพื้นฐาน (Staple) ลักษณะของผลิตภัณฑ์จะมีรสจืด เหมาะสำหรับคนทุกกลุ่มตั้งแต่วัยเด็ก ไปจนถึงผู้ใหญ่ ได้แก่ คอร์นเฟลก อาหารเช้าสำเร็จรูปจากธัญพืช กลุ่มสำหรับเด็ก (Child Taste) ลักษณะของผลิตภัณฑ์จะมีรสหวานเหมาะสำหรับเด็กอายุ 6-14 ปี สินค้าในกลุ่มนี้จะเป็นธัญพืชที่หลายบริษัท ใช้ในการทำการตลาด ได้แก่ โกโก้ครั้นซ์ ฟรอสตี้ ฮันนี่คอมพ์ และอาหารเช้าสำเร็จรูปจากธัญพืชประเภทเพื่อสุขภาพ (Health) ผลิตภัณฑ์ในกลุ่มนี้จะมุ่งเน้นในเรื่องสุขภาพที่มีคุณค่าทางโภชนาการที่จำเป็นสำหรับร่างกายครบได้แก่ แบรนเฟลก ผักและผลไม้ ไฟเบอร์ฟิคที่ให้เส้นใยอาหาร (สุทธินี, 2536)

2.1.3 อาหารเช้าสำเร็จรูปแบบผสม (Ready-to-Eat Mixed Cereal)

อาหารเช้าสำเร็จรูปแบบผสม หรือเรียกอีกอย่างว่า "มูสลี่" เป็นอาหารดั้งเดิมของชาวสวิส มีการรับประทานกันมานานแล้วประกอบด้วย ผลไม้ตามฤดูการ เมล็ดข้าวชนิดต่าง เช่นข้าวโอ๊ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้าวฟ่าง ลูกเดือย มาผสมกันแล้วใส่น้ำนมเปรี้ยวลงไปบริโภคได้ทันที (สาโรจน์. 2537) ต่อจากนั้น Geoffrey Greethead Pty Ltd, ได้นำมูสลี่มาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ อาหารเช้าสำเร็จรูปและจำหน่ายในรูปผลิตภัณฑ์ที่มีชื่อว่า Sunflakes ซึ่งมีส่วนผสมประกอบด้วยข้าวสาลี, มะพร้าวอบแห้งและผลไม้เป็นชิ้นกรอบอบแห้งเคลือบด้วยน้ำตาล ผสมรวมกันบริโภคกับนมเปรี้ยวได้ทันทีมีรสหวานและกลิ่นรสที่ดี ผู้บริโภคยอมรับสูงและอุดมไปด้วยวิตามิน เหล็กร้อยละ 100 RDA (Greethead, 1997)

พื้นฐานของการทำอาหารเช้าสำเร็จรูปแบบผสมนั้น ควรจะอุดมไปด้วย ไซรัป น้ำผึ้ง หรือ มอลล์เอ็คซแทร็คท ส่วนผสมทั้งหมด มีการเตรียมโดยผ่านกระบวนการผลิตที่ทำให้เกิด Dextrinization มากกว่าการทำให้เกิดการพองตัวข้นใส (gelatinization) ของแป้ง (Kent, 1966)

2.1.4 อาหารเช้าสำเร็จรูปแบบผสมชนิดแท่ง

ลักษณะทั่วไปของอาหารเช้าสำเร็จรูปแบบผสมชนิดแท่ง เป็นอาหารชนิดหนึ่งที่สะดวกในการบริโภคเหมาะสำหรับสภาวะเศรษฐกิจปัจจุบัน มีคุณค่าทางโภชนาการครบถ้วนครบถ้วน ซึ่ง U.K.Ministry of Agriculture, Fisheries & Food Memorandum ได้สรุปคุณลักษณะทั่วไป ของอาหารเช้าสำเร็จรูปแบบผสมชนิดแท่งไว้ดังนี้ กลิ่นและรสของผลิตภัณฑ์ต้องยังคงปรากฏอยู่ ต้องใช้น้ำลายเป็นตัวกลาง และกลืนกินได้อย่างต่อเนื่อง เนื้อสัมผัสง่ายต่อการเคี้ยว มี รส กลิ่น และได้รับประโยชน์จากการบริโภค ขนาดและรูปร่างต้องง่ายต่อการบรรจุ และขนส่ง ต้องสะดวกสบาย ต่อการกัดกิน (bite) และง่ายต่อการบริโภคต่อบุคลหนึ่ง เก็บได้นาน และรับประทานได้ง่ายไม่ต้องเสียเวลาในการเตรียม (Dalgleish, 1990)

ผลิตภัณฑ์อาหารเช้าสำเร็จรูปแบบผสมชนิดแท่งนี้เป็นอาหารที่พร้อมจะรับประทานเหมือนกับคอร์นเฟลก โดยมีการรวมน้ำตาล ไขมัน และนม อัดเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งในระยะแรกต้องใช้แรงต่ำสุดเพื่อทำให้พวกเฟลก และ แกรนูลต่างๆอยู่ในรูปเดิมโดยผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จะเกาะกันด้วยโครงข่ายของน้ำตาล (sugar lattice) แทนที่การใช้เนยขาว (shortening) อบให้ผลิตภัณฑ์แห้ง ลักษณะแท่งที่ได้นี้จะต้องมีเนื้อสัมผัสที่กรอบมาก และไม่มีไขมันอยู่ น้ำหนักแท่งละ 1-2 ออนซ์ ลักษณะแท่งที่ได้ต้องแข็งแรงไม่ถูกทำลายได้ง่ายด้วยมือระหว่างการบรรจุ และจัดจำหน่าย (Matz, 1962)

การทำผลิตภัณฑ์อาหารเช้าสำเร็จรูปแบบผสมชนิดแท่ง จะใช้ธัญพืชอย่างเดียว หรือหลายชนิดผสมกันก็ได้ เมล็ดธัญพืชได้แก่ ข้าวโอ๊ต ข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ ข้าวไรน์ ข้าวเจ้า และข้าวโพด โดยนำเมล็ดพืชเหล่านี้มาปิ้ง หรือย่าง (toasted) ก่อนจากนั้นนำมาผสมกับสารเชื่อมต่างๆ อาจมีการใส่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลไม้อบแห้ง ถั่วต่างๆผลิตภัณฑ์ที่ได้ จะมีลักษณะของธัญพืช ที่มีขนาดอนุภาคที่หยาบ (coarse particle) และให้เนื้อสัมผัส ที่เหมือนกับธรรมชาติ (Robbins, 1976)

อาหารเช้าสำเร็จรูปแบบผสมชนิดแท่ง เป็นอาหารขบเคี้ยวประเภทหนึ่งที่จัดอยู่ในอาหารขบเคี้ยวชนิดใหม่ มีอายุการเก็บรักษานานและเป็นอาหารหวานมากกว่าอาหารคาว มีหลายชนิด เช่น Granular/muesli bars, Chocolate bars, Minibreak bars, Energy bar โดยGranola bar เป็นอาหารขบเคี้ยวเพื่อสุขภาพจุดขายของผลิตภัณฑ์อยู่ที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง วัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนประกอบคือ ธัญพืช สามารถแบ่งออกได้เป็น 2ชนิดคือ ชนิดเคี้ยวกรอบแห้ง (Crunchy bars) เรียกอีกชื่อว่า มูสลี่บาร์ (muesli bar) ผลิตภัณฑ์นี้จะประกอบด้วย โอ๊ตเฟลก วีตเฟลก ไรน์เฟลก ผลไม้แห้งต่างๆ (แอปเปิ้ลเฟลก เอพบิคอต ลูกเกด) พวกถั่ว(อัลมอนต์ ถั่วลิสง มะพร้าว เฮซีลนัท) พืชเมล็ด (งา เมล็ดทานตะวัน เมล็ดฟักทอง) และสารให้ความหวาน มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดร้อยละ 15-20 ในรูปซูโครส เป็นการเพิ่มกลิ่นรสและเนื้อสัมผัส และชนิดเหนียวนุ่ม มีความชื้นสูง (Chewy bars) ส่วนผสมเหมือนชนิดเคี้ยวกรอบแห้ง มีการเพิ่มจำนวนน้ำตาลให้สัมพันธ์กับส่วนผสม บางครั้งอาจเติมน้ำตาลอินเวิร์ตเพื่อลดการตกผลึกของน้ำตาลและอาจเติมหางนมผงที่มีความหวานทำให้ผลิตภัณฑ์เหนียวนุ่ม มีความชื้น ผลิตภัณฑ์ชนิดนี้มีน้ำตาลทั้งหมดร้อยละ25-30ปริมาณไขมันน้อยกว่าร้อยละ 12-15 จนถึงร้อยละ 18 ซึ่งชนิดเหนียวนุ่ม (Chewy bars) นี้จะมีไขมันมากกว่าชนิดเคี้ยวกรอบแห้ง (Crunchy bars) ถึงร้อยละ 22-24 ปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีพัฒนาส่วนผสม ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาเหนียวนุ่ม (stick) เป็นลักษณะมูสลี่บาร์ที่ปราศจากน้ำตาล หรือไขมัน เป็นการช่วยรักษาสุขภาพได้ (Rice, 1990)

2.2 ความชื้น

2.2.1 ความหมายของความชื้นในอาหาร

ปริมาณความชื้น (Moisture Content) เป็นปริมาณน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในอาหาร ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของน้ำที่เกาะติดกับอาหาร หรือถูกใช้ไปในการสร้างพันธะต่างๆ เช่น พันธะไอออนิก พันธะไฮโดรเจน และอีกส่วนคือ ปริมาณน้ำอิสระที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้ในการเกิดพันธะใดๆ และจะอยู่ภายในช่องว่างของอาหาร (เครือข่ายข้อมูลวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว, 2547)

2.2.2 การหาปริมาณความชื้น ด้วยตู้อบลมร้อน

การหาปริมาณความชื้นสำหรับเมล็ดพืชที่มีความชื้นต่ำกว่า 13 % ทำโดยทำโดยนำวัตถุดิบที่ต้องการหาความชื้นมาบดและชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกค่าไว้เป็นมวลวัตถุเริ่มต้นจากนั้นจึงนำมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อบในตู้อบที่อุณหภูมิ130±1องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างที่อบแห้งแล้วไปวางในโถดูดความชื้นจนเย็น จากนั้นบันทึกค่าไว้เป็นมวลวัตถุที่แห้งแล้วนำมาคำนวณหาความชื้น (สาทิป, 2535)

การคำนวณหาค่าความชื้นสามารถทำได้ดังนี้

$$\%\text{ ความชื้น (โดยน้ำหนักเปียก)} = \frac{(\text{มวลวัตถุเริ่มต้น} - \text{มวลวัตถุที่แห้ง}) \times 100}{\text{มวลวัตถุเริ่มต้น}}$$

$$\%\text{ ความชื้น (โดยน้ำหนักแห้ง)} = \frac{(\text{มวลวัตถุเริ่มต้น} - \text{มวลวัตถุที่แห้ง}) \times 100}{\text{มวลวัตถุวัตถุที่แห้ง}}$$

2.2.3 ความชื้นสัมพัทธ์ (ธนพลวานิช, 2547)

หน่วยวัดที่นิยมใช้ในการวัดระดับความชื้นในอากาศได้แก่ความชื้นสัมพัทธ์(Relative Humidity– RH) ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นที่มีอยู่จริงในอากาศกับปริมาณความชื้นที่อากาศขณะนั้นจะมีได้ อุณหภูมิเดียวกัน

$$\%\text{ ความชื้นสัมพัทธ์} = \frac{\text{ปริมาณน้ำที่มีอยู่จริงในอากาศ} \times 100}{\text{ปริมาณน้ำที่มีอากาศนั้นจะมีได้ ณ อุณหภูมิเดียวกัน}}$$

ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอากาศ หรือ absolute humidity อาจเปลี่ยนแปลงไปได้ตามสภาพพื้นที่และฤดูกาล ส่วนปริมาณน้ำที่อากาศจะพึงมีได้ หรือปริมาณน้ำ ณ จุดอิ่มตัว (saturation) หรืออีกนัยหนึ่งปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอากาศซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์ 100% นั้น จะเป็นค่าคงที่ ณ อุณหภูมิหนึ่ง ๆ หากระดับไอน้ำ ขณะนั้นมากเกินกว่าความสามารถของอากาศจะรองรับได้ (> 100%) ไอน้ำจะควบแน่น (Condensation) และกลายเป็นหยดน้ำในที่สุด แรงดันไอน้ำและความสามารถในการรองรับปริมาณไอน้ำ ณ อุณหภูมิที่สูงกว่า จะมีมากกว่าแรงดันไอน้ำและความสามารถในการรองรับปริมาณไอน้ำ ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่า โดยเหตุนี้ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะมีผลโดยตรงต่อแรงดันไอน้ำและความสามารถดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากเราทราบถึง ระดับความชื้นสัมพัทธ์ ของอากาศในระหว่างการบรรจุ การจัดเก็บ และการขนส่งสินค้า ก็สามารถคำนวณได้ว่าปริมาณไอน้ำ ที่จะส่งผล เสียหายต่อสินค้านั้น มีมากน้อยเพียงไร

2.3 วอเตอร์แอกติวิตีใน อาหาร

2.3.1 ความหมายของวอเตอร์แอกติวิตี (Decagon device, 2004)

วอเตอร์แอกติวิตี (Water Activity) เป็นปริมาณน้ำอิสระที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้ในการเกิดพันธะใด ๆ และจะอยู่ภายในช่องว่างของอาหาร เป็นโมเลกุลของน้ำที่พร้อมจะเปลี่ยนสภาวะจากของเหลวไปเป็นไอ

วอเตอร์แอกติวิตี เป็นอัตราส่วนระหว่างความดันไอในสารละลายหรือวัสดุอาหาร (P_w) และความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ (P_w^0) ที่อุณหภูมิเดียวกัน ดังนั้นที่สภาวะสมดุล วอเตอร์แอกติวิตี จะสัมพันธ์กับ ความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (Equilibrium Relative Humidity: ERH) ของสิ่งแวดล้อมดังสมการ

$$a_w = \frac{p_w}{p_w^0} \quad (2.1)$$

$$a_w = \frac{ERH}{100} \quad (2.2)$$

2.3.2 ความสำคัญของวอเตอร์แอกติวิตี

วอเตอร์แอกติวิตี มีผลต่อการควบคุมอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร (เครือข่ายข้อมูลวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว.2547) เนื่องจากค่าวอเตอร์แอกติวิตี เป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมและป้องกันการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหารจึงมีผลโดยตรงต่อการกำหนดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหาร ในขณะที่อุณหภูมิ ความเป็นกรด - ด่าง (pH) และปัจจัยอื่น ๆ มีผลกระทบต่อความเร็วในการเจริญของจุลินทรีย์ในอาหาร

ในระหว่างการแปรรูป การขนส่ง และการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ อาหาร อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะและคุณภาพ ซึ่งรวมถึงสีกลิ่นรส รูปร่าง ลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารและคุณค่าทางโภชนาการ ผลจากกลไกเหล่านี้อาจก่อให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหาร ทำให้คุณภาพของอาหารเปลี่ยนไปอยู่ในระดับที่ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคหรืออาจเป็นอันตรายต่อผู้บริโภคได้ และทำให้อาหารมีอายุการเก็บลดน้อยลง ดังนั้นผู้ผลิตอาหารจึงพยายามศึกษาและหาสาเหตุที่ก่อให้เกิดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสื่อมเสียกับผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เพื่อทำการออกแบบและควบคุมกระบวนการผลิต เช่น การควบคุมอุณหภูมิ เวลา และความเร็วในกระบวนการผลิตให้มีมาตรฐาน สามารถควบคุมป้องกันการเสื่อมเสียของอาหาร และสามารถประเมินอายุการเก็บของอาหารให้ได้ตามระยะเวลาที่กำหนด

นอกจากการควบคุมค่าวอเตอร์แอเกติวิตีแล้ว สภาวะการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่ต่างกัน เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ยังส่งผลต่ออายุการเก็บด้วยเช่นกัน ตัวอย่าง เช่น การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บของเค้ก กับค่าวอเตอร์แอกติวิตี เมื่อเก็บที่สภาวะอุณหภูมิต่างกัน ถ้าเค้กมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี 0.81 จะสามารถป้องกันการเจริญของเชื้อราได้นาน 14 วัน เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส และ 24 วันเมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส แต่ถ้าเค้กมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเป็น 0.85 จะพบว่าอายุการเก็บจะลดลงจากเดิมมากเหลือเพียง 8 วัน เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส และ 12 วันเมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส

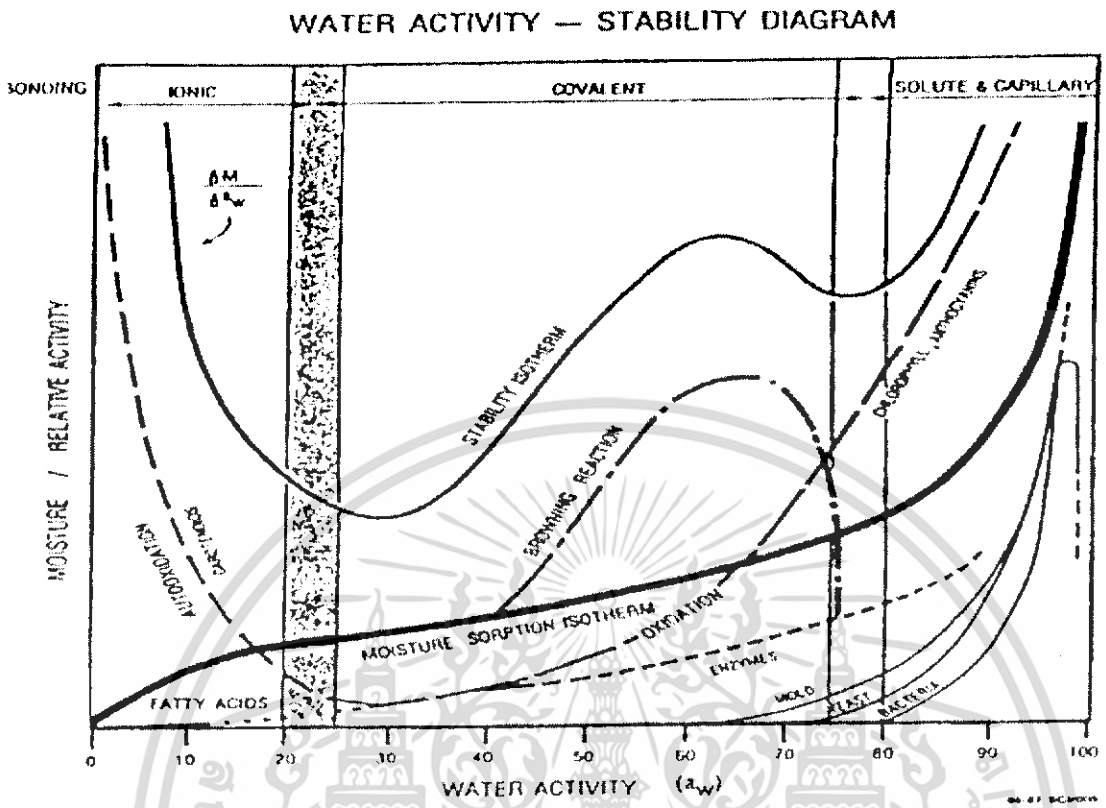
อย่างไรก็ตามเมื่อได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายแล้วก่อนการจำหน่ายผู้ผลิตควรมีการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ในแต่ละขั้นตอน เพื่อให้มั่นใจว่าผลิตภัณฑ์มีคุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนด ดังนั้น เครื่องมือที่ดีในการตรวจสอบคุณภาพดังกล่าว เช่น การวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตีต้องสามารถอ่านผลได้อย่างรวดเร็ว เพื่อให้ผู้ผลิตสามารถกำกับดูแล และควบคุมค่าวอเตอร์แอกติวิตี ณ จุดที่ทำการผลิตทำให้สามารถปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตให้เหมาะสมและทันการณ์ได้ในระหว่างที่กาผลิต ซึ่งการกระทำดังกล่าวถือเป็นความรับผิชอบอย่างหนึ่งของผู้ผลิตที่ควรคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้บริโภค

2.3.3 ผลของวอเตอร์แอกติวิตี ต่อการเสื่อมเสียของอาหาร

2.3.3.1 ความสำคัญของวอเตอร์แอกติวิตีทางด้านชีวเคมี

อาหารธรรมชาติหรือยังไม่ผ่านการแปรรูปมีน้ำประกอบอยู่ในปริมาณมาก เช่น เนื้อสัตว์มีน้ำประกอบอยู่ 50-60 % ผลไม้ 74-95% และผักสด 74-95% น้ำในอาหารดังกล่าวเป็นปัจจัยของการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี ปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในอาหารที่สำคัญ ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันของไขมัน lipid oxidation) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolytic reaction) การเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) รวมทั้งความสารถของเอนไซม์ในการเร่งปฏิกิริยา (enzyme activity) ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลสี รส และกลิ่นของอหารอย่างชัดเจน อัตราการเกิดขึ้นของปฏิกิริยาจะสอดคล้องกับปริมาณความชื้นที่มีในอาหารและค่าวเอเตอร์แอกติวิตี ดังแสดงในรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ผลของวอเตอร์แอกติวิตี ต่ออัตราการเสื่อมเสียคุณภาพอาหาร

ที่มา: Rockland and Beuchat (1987)

2.3.3.2 ความสำคัญของวอเตอร์แอกติวิตีทางด้านจุลินทรีย์

การเสื่อมเสียของอาหารโดยส่วนใหญ่เกิดจากการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ไม่ว่าจะเป็นแบคทีเรีย ยีสต์ และรา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและส่วนประกอบที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละชนิดที่แตกต่างกันจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุดในผลิตภัณฑ์ที่มีวอเตอร์แอกติวิตีในระดับที่พอเหมาะ เรียกว่า Optimal Water Activity เมื่อวอเตอร์แอกติวิตีลดลงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะลดลงไปด้วยจนถึงค่าวอเตอร์แอกติวิตีในระดับหนึ่งซึ่งจุลินทรีย์ไม่สมารถเจริญได้ จุลินทรีย์แต่ละชนิดมีความต้องการปริมาณน้ำที่ใช้ประโยชน์ หรือวอเตอร์แอกติวิตีไม่เท่ากัน ระดับวอเตอร์แอกติวิตีต่ำสุดที่จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้เรียกว่า Minimal Water Activity (Minimal a_w)

เนื่องจากค่าวอเตอร์แอกติวิตีเป็นปัจจัยที่ชี้ระดับปริมาณน้ำต่ำสุดในอาหารที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ต่าง ๆ ดังนั้น จึงสามารถใช้ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ในการประเมินว่าเชื้อจุลินทรีย์ชนิดใดเป็นหรือไม่เป็นสาเหตุที่ทำให้อาหารเสีย ตลอดจนใช้ในการควบคุมและป้องกันการเสื่อมเสียของอาหารที่เกิดขึ้นจากเชื้อจุลินทรีย์ได้ เพราะเชื้อจุลินทรีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเจริญเติบโตได้ภายใต้ค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่จำกัด โดยเราจะทำให้อาหารมีค่าระดับวอเตอร์แอกติวิตีต่ำกว่าที่เชื้อจุลินทรีย์จะเจริญเติบโตได้ การผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีค่าวอเตอร์อิกติวิตีต่ำกว่า 0.6 จะช่วยควบคุมการเสียเนื่องจากจุลินทรีย์นี้ได้ ตัวอย่างของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหารและระดับของวอเตอร์แอกติวิตีที่จุลินทรีย์เหล่านี้สามารถเจริญเติบโตได้แสดงในตารางที่ 2.1 วิธีที่ง่ายที่สุดในการลดวอเตอร์แอกติวิตีในอาหารคือการกำจัดน้ำในอาหาร เช่น การทำให้สุก การอบ หรือการทำให้แห้ง กระบวนการ ที่ใช้อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหารที่รับวอเตอร์แอกติวิตีต่าง ๆ

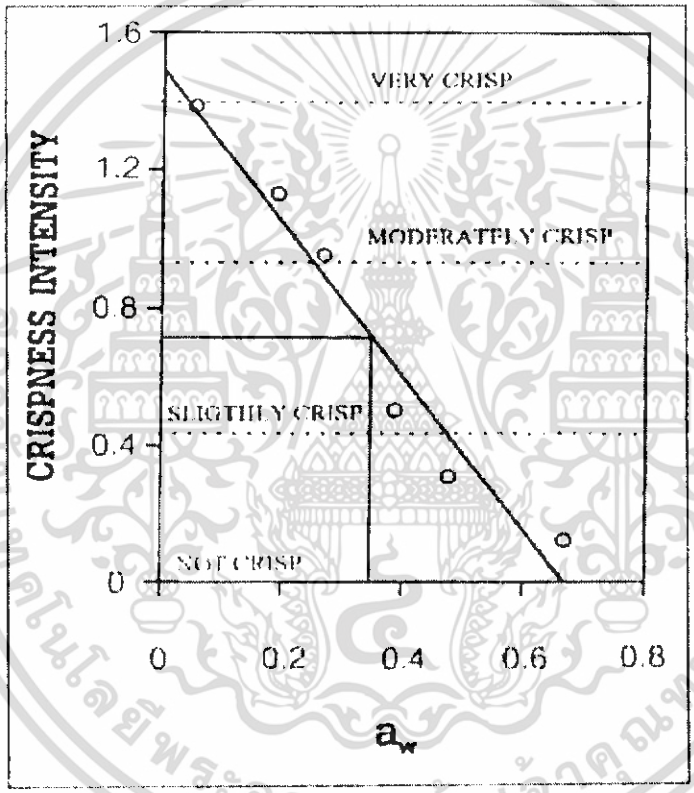
วอเตอร์แอกติวิตี (a_w)	จุลินทรีย์ที่ถูกยับยั้ง	ตัวอย่างอาหาร
0.800	*Mycotoxigenic penicillia, Staphylococcus aureus,*	น้ำผลไม้เข้มข้นเกือบทุกชนิด นมข้นหวาน ข้าว แป้ง เค้กผลไม้ เค้กที่ใส่น้ำตาลมาก
0.75	*Halophilic bacteria, mycotoxigenic aspergilli*	แยม มาร์มาเลด
0.650	Osmophilic yeasts และ ราบางชนิด	ผลไม้แห้งความชื้นประมาณ 15 - 20% น้ำผึ้ง ทอฟฟี่ คาราเมล
0.600	Xerophilic molds	เยลลี่ โมลาส ถั่ว ผลไม้อบแห้งบางชนิด
0.500	จุลินทรีย์ไม่สมารถเจริญเติบโตได้	เครื่องเทศความชื้นประมาณ 10%ก๋วยเตี๋ยวความชื้นประมาณ 12%
0.400		ไข่ผง ความชื้นประมาณ 5%
0.300		คุกกี้ แครกเกอร์ความชื้นประมาณ 3 - 5 %

ที่มา : รัตนันท์ (2547)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.3 ความสำคัญของวอเตอร์แอกติวิตีทางด้านกายภาพ

ค่าวอเตอร์แอกติวิตีนอกจากจะผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาทางชีวเคมีต่าง ๆในอาหารแล้ว ค่าวอเตอร์แอกติวิตียังมีผลต่อคุณสมบัติทางเนื้อสัมผัส ของอาหารด้วย ได้แก่ ในด้านความกรอบ (Crispness) ของผลิตภัณฑ์อาหารจากธัญพืช (Cereal-Base; Product) เช่น แครกเกอร์ ขนมทอดกรอบ (Fried Snacks) และในด้านความเข็ง (Hardness) ของผลิตภัณฑ์ (วิฑูรย์ พิมพ์สวัสดิ์. 2539) แนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอกติวิตีและความกรอบของผลิตภัณฑ์อาหารดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การสูญเสียความกรอบของอาหารในค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่างๆ กัน

ที่มา: Rockland and Beuchat (1987)

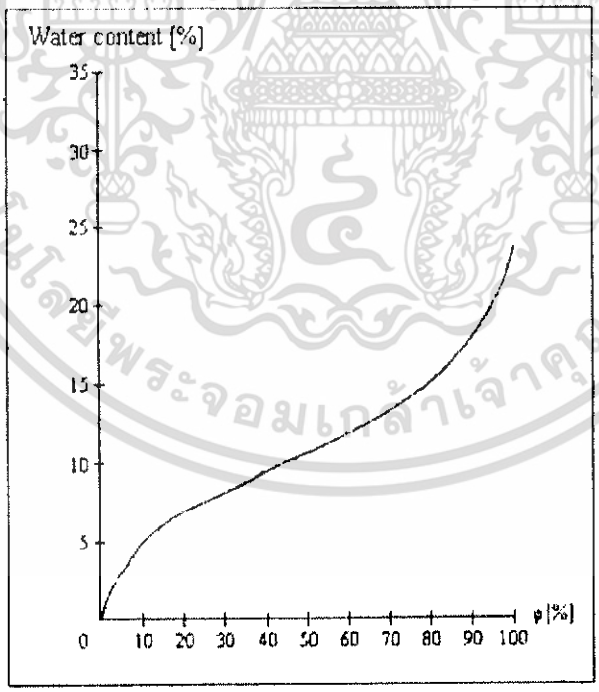
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น

2.4.1 ความหมายของไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น

ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น (Moisture Content) และวอเตอร์แอกติวิตีเป็นเรื่องซับซ้อน เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี ของผลิตภัณฑ์หนึ่ง ๆ จากการทดลองวัดค่าทั้งสองของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด ณ อุณหภูมิคงที่คงที่ค่าหนึ่งเท่านั้นแล้วบันทึกค่าทั้งสองเปรียบเทียบกันในรูปกราฟ เรียกกราฟความสัมพันธ์ที่ได้ว่า โซเทอร์มแบบดูดความชื้น (เครือข่ายข้อมูลวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว, 2547)

วิธีการหากราฟความสัมพันธ์ (สร้างได้จากการทดทดลองเท่านั้น) สามารถทำได้โดยนำอาหารไปใส่ในภาชนะที่ทราบค่าความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งควบคุมความชื้นสัมพัทธ์โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวชนิดต่าง ๆ ใส่ลงไปในภาชนะแต่ละใบ ภาชนะที่ใช้ต้องสามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ได้เป็นอย่างดี เพื่อให้มีความชื้นสัมพัทธ์ ณ จุดต่าง ๆ จากนั้น ตั้งอาหารทิ้งไว้จนเข้าสู่สภาวะสมดุลซึ่ง ณ จุดสมดุลนี้จะทราบค่า วอเตอร์แอกติวิตี จากนั้นวัดค่าปริมาณความชื้น (Moisture Content) แล้วนำค่าทั้งสองไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่2.3



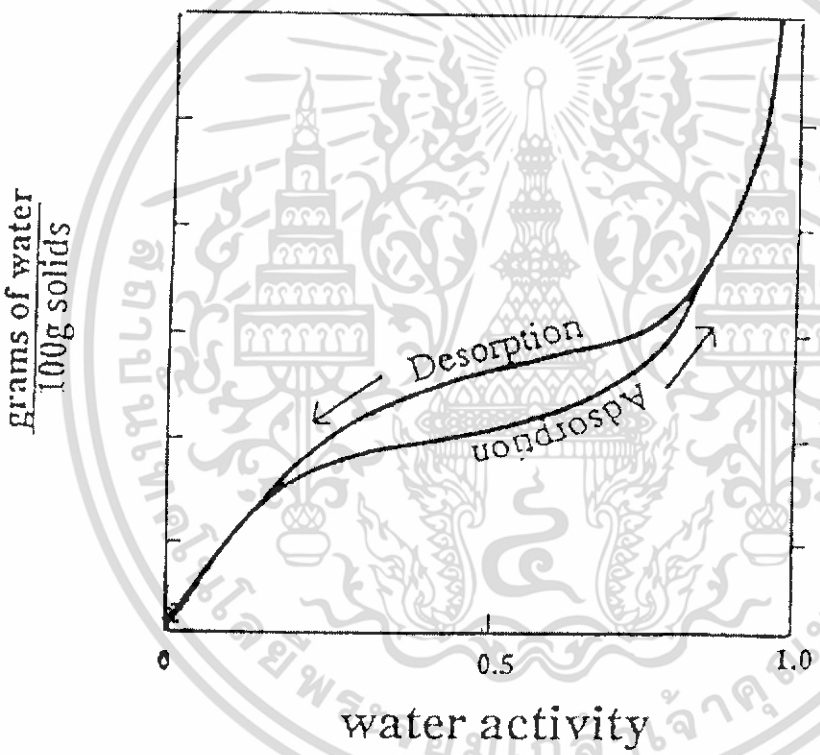
รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี

ที่มา: Transport Information (2004)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะพบว่าเมื่อค่าปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตีมักเพิ่มขึ้นด้วย แต่เป็นเพิ่มแบบไม่เป็นเส้นตรง นอกจากน้ำกราฟไอโซเทอร์ม ของผลิตภัณฑ์ต่างชนิดกันจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความดันไอของโมเลกุลของน้ำในช่องว่างเหนือผลิตภัณฑ์และ พลังงานของการจับพันธะของน้ำในผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด

กราฟไอโซเทอร์มสำหรับอาหาร แทบทุกชนิดจะมีรูปร่างแบบ Sigmoid ดังแสดงในรูปที่ 2.4 แต่อาหารที่มีปริมาณน้ำตาลมากหรือมีโมเลกุลที่ละลายได้น้อย จะได้กราฟไอโซเทอร์มรูปคล้ายตัว J กราฟไอโซเทอร์มจากการทดทดลองซึ่งเริ่มต้นจากผลิตภัณฑ์ที่แห้งแล้วเพิ่มความชื้นมากขึ้นเรื่อย ๆ (Adsorption) ไม่จำเป็นต้องเหมือนกับกราฟไอโซเทอร์มจากการทดลองผลิตภัณฑ์เดียวกันในสภาพชื้นแล้วลดความชื้นลงเรื่อย ๆ (Desorption)



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างไอโซเทอร์มแบบดูดและคายความชื้น ซึ่งมีรูปแบบ Sigmoidal
ที่มา: รัตนันท์ (2547)

2.4.2 สมการที่ใช้วิเคราะห์ไอโซเทอร์ม

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อที่จะสร้างกราฟไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นจะใช้สมการสำหรับวิเคราะห์ไอโซเทอร์ม โดยรูปแบบสมการที่ใช้มี 5 สมการได้แก่ Modified Henderson, Modified

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chung-Pfost, Modified Halsey, Modified Oswin และ Modified GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) ดังแสดงในตารางที่ 2.2

สมการทั้ง 5 สมการถูกยอมรับให้เป็นสามการมาตรฐานโดย The American Society of Agricultural Engineering สำหรับอธิบายไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น (Aviara et al, 2004)

ตารางที่ 2.2 สมการสำหรับวิเคราะห์ไอโซเทอร์ม

Name of model	Equilibrium moisture content model	Water activity model
Modified Henderson	$M \approx \left[\frac{-\ln(1-a_w)}{A(T+B)}\right]^{1/c}$	$a_w \approx 1-\exp\left[-A(T+B)M^c\right]$
Modified Chung - Pfost	$M \approx -\frac{1}{c}\ln\left[-\frac{(T+B)}{A}\ln a_w\right]$	$a_w \approx \exp\left[-\frac{A}{(T+B)}\exp(-CM)\right]$
Modified Halsey	$M \approx \left[\frac{-\ln a_w}{\exp(A+BT)}\right]^{-1/c}$	$a_w \approx \exp\left[-\exp(A+BT)M^{-c}\right]$
Modified Oswin	$M \approx (A+BT)\left[\frac{a_w}{1-a_w}\right]^c$	$a_w \approx \frac{1}{\left[\frac{(A+BT)}{M}\right]^c+1}$
Modified GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer)	$M \approx \frac{AB\left(\frac{C}{T}\right)a_w}{(1-Ba_w)\left[1-Ba_w+\left(\frac{C}{T}\right)Ba_w\right]}$	$a_w \approx \frac{2+\frac{C}{T}\left(\frac{A}{M}-1\right)-\left[\left(2+\frac{C}{T}\left(\frac{A}{M}-1\right)\right)^2-4\left(1-\frac{C}{T}\right)\right]^{1/2}}{2B\left(1-\frac{C}{T}\right)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M – ความชื้น (% โดยน้ำหนักแห้ง)

a_w _ วอเตอร์แอกติวิตี (จำนวนทศนิยม)

T _ อุณหภูมิ , องสาเซลเซียส

A,B และ C – ค่าคงที่ ซึ่งมีค่าเฉพาะตัวของแต่ละสมการ

ที่มา : Aviara et al. (2004)

2.5 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการผสม (Rockland and Beuchat, 1987)

อาหารที่ได้จากการผสมวัตถุดิบหลายชนิดเข้าด้วยกันโดยวัตถุดิบแต่ละชนิดมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) ที่แตกต่างกัน หลังจากการผสมแล้วเมื่ออาหารอยู่ในภาชนะปิดจะเกิดปรากฏการดังนี้

1. ส่วนผสมที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตี ต่ำจะได้รับความชื้นจากส่วนผสมที่มีวอเตอร์แอกติวิตีที่สูงกว่า

2.ส่วนผสมแต่ละส่วนจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความชื้นสูงขึ้นหรือต่ำลงจะขึ้นอยู่กับ ไอโซเทอร์มของการดูดความชื้น

3. การดูดและการคายความชื้นจะทำให้คุณสมบัติและคุณภาพอาหารเปลี่ยนไป

4. หลักการผสมที่อยู่ในรูปภาชนะปิด อาหารทุกตัวจะต้องอยู่ในสภาวะสมดุล

สมการสำหรับหาค่า a_w รวม

$$a_w = \frac{(W_1 S_1 a_{w1}) + (W_2 S_2 a_{w2})}{(W_1 S_1) + (W_2 S_2)} \cdots \frac{+ (W_n S_n a_{wn})}{+ (W_n S_n)} \qquad (2.3)$$

เมื่อ W_n = น้ำหนักของแข็งของส่วนประกอบ (กรัม)

a_w = วอเตอร์แอกติวิตีของส่วนประกอบ

S_n = ความชันเชิงเส้นของไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นส่วนประกอบประมาณได้จากช่วงความเริ่มต้นจนถึงความชื้นวิกฤติ

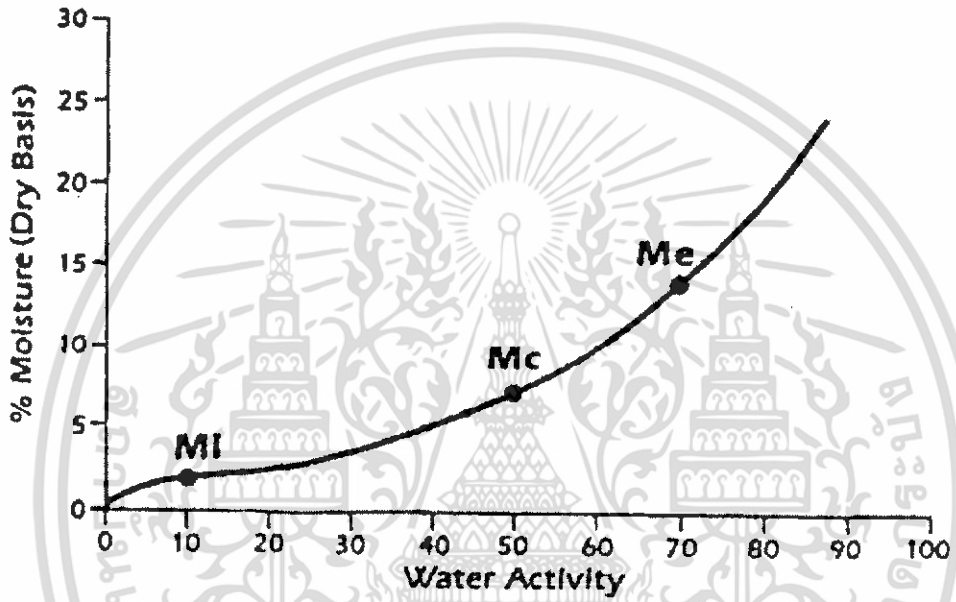
2.6 การศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหาร

ผลิตภัณฑ์อาหารประเภทไวต่อความชื้น เช่น ขนมขบเคี้ยว อาหารอบแห้งเป็นต้น จะดูดความชื้นจากอากาศ ทำให้อาหารมีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นจนทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพจนไม่เป็นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ยอมรับของผู้บริโภค อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และชีววิทยาในอาหารนั้นและอาจเกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ ปริมาณความชื้นของอาหารประเภทนี้เป็นสิ่งกำหนดการยอมรับของผู้บริโภค หรืออายุการเก็บนั่นเอง ค่าของปริมาณความชื้นของอาหาร ณ จุดที่เกิดการเสื่อมคุณภาพจนไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค เรียกว่า ปริมาณความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ไอโซเทอร์มของผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยว

M_i = ปริมาณความชื้นเริ่มแรกเมื่อบรรจุของผลิตภัณฑ์อาหาร

M_c = ปริมาณความชื้นวิกฤตของผลิตภัณฑ์อาหาร

M_e = ปริมาณความชื้นเมื่อสัมผัสกับสภาวะบรรยากาศนอกบรรจุภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์อาหาร

ที่มา : Rockland and Beuchat (1987)

2.6.1 การทำนายอายุการเก็บรักษาด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

สมการที่ใช้ในการทำนายอายุการเก็บของผลติภัณฑ์อาหารขบเคียวในบรรจุภัณฑ์ปิดสนิทที่ระดับความชื้นวิกฤต (Rockland and Beuchat, 1987) เป็นดังนี้

62861
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\theta_c = Daysto M_c = \frac{\ln\left(\frac{M_c - M_i}{M_e - M_c}\right)}{\left(\frac{K}{X}\right)\left(\frac{A}{W_s}\right)\left(\frac{P_o}{S}\right)} \quad (2.4)$$

M_i = ปริมาณความชื้นเริ่มแรกเมื่อบรรจุของผลิตภัณฑ์อาหาร, กรัมของน้ำ / กรัมของอาหารแห้ง

M_e = ความชื้นของอาหารที่ความชื้นสัมพัทธ์สมดุลสาภาวะบรรยากาศ, กรัมของน้ำ / กรัมของอาหารแห้ง

M_c = ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์อาหารเริ่มแรกเมื่อบรรจุ, กรัมของน้ำ / กรัม ของอาหารแห้ง

K = การยอมให้ไอน้ำซึมผ่านได้ (Permeability) ของบรรจุภัณฑ์, $\frac{\text{(กรัมของน้ำ)(เมตร)}}{\text{(วัน) ตารางเมตร) (มิลลิเมตรปรอท)}}$

X = ความหนาของบรรจุภัณฑ์, เมตร

A = พื้นที่ผิวบรรจุของบรรจุภัณฑ์, ตารางเมตร

P_o = ความดันไอน้ำอิ่มตัว ณ สภาวะการเก็บรักษา, มิลลิเมตรปรอท

W_s = น้ำหนักแห้งของผลิตภัณฑ์อาหารที่บรรจุ, กรัม

S = ความชันเชิงเส้นที่ได้จากกราฟไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นประมาณได้จากช่วงความเริ่มต้นจนถึงความชื้นวิกฤติ

θc = อายุการเก็บ เก็บของผลิตภัณฑ์อาหารที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ปิดสนิท ณ จุดเริ่มต้นจนกระทั่งถึงจุดวิกฤต, วัน

2.6.2 การทำนายเกี่ยวกับการบรรจุหีบห่อ

เมื่อทราบค่าวอเตอร์แอกติวิตี สามารถใช้หาค่าความชื้นเพิ่ม หรือ ความชื้นลดสูงสุดจากสภาวะเริ่มต้น ไอโซเทอร์มสามารถใช้หาค่าความชื้นวิกฤต หรือจุดที่ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค และสามารถเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ ที่สมารถเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ได้

2.7 บรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร

ปัจจุบันวัสดุบรรจุภัณฑ์ และเทคโนโลยีการผลิตอาหาร ได้มีการพัฒนาขึ้นสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาในบางผลิตภัณฑ์อาจจะยืดอายุการเก็บรักษาด้วยกรรมวิธีการบรรจุ

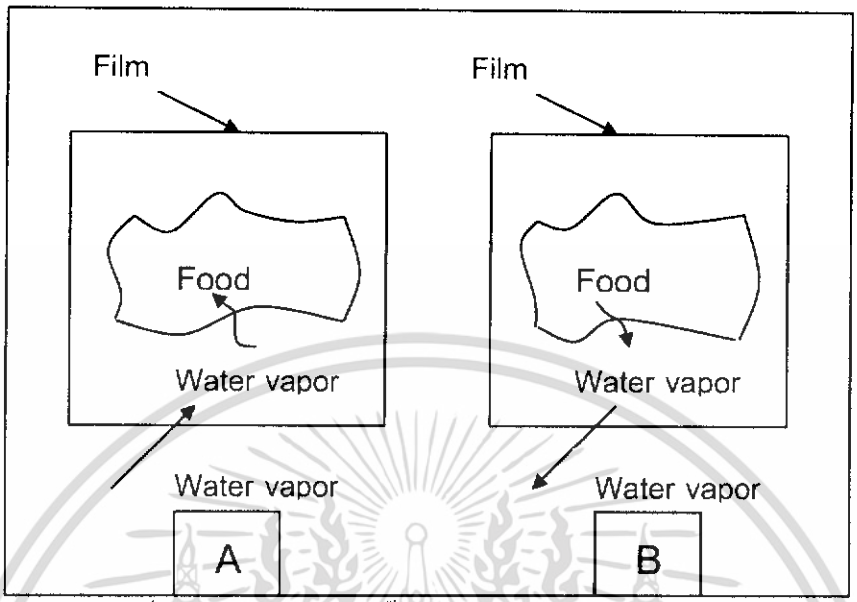
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาหารลงบรรจุภัณฑ์ เช่น การปรับสภาพความดันอากาศ ภายในบรรจุภัณฑ์ของเส้นพาสต้า เพื่อให้ผลิตภัณฑ์นั้นมีลักษณะเหมือนของสดใหม่อยู่ตลอดเวลาซึ่งกรรมวิธีการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารนั้นจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของผลิตภัณฑ์

การไม่ยอมรับผลิตภัณฑ์จากผู้บริโภคเกิดจากคุณภาพของอาหารที่ลดลงเนื่องจากเก็บเป็นระยะเวลานาน โดยไม่คำนึงถึงวิธีการเก็บรักษา และสภาวะที่เหมาะสม คุณภาพของอาหารที่เปลี่ยนแปลงอย่างไม่พึงประสงค์ที่เกิดขึ้นอาจจะส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัส รสชาติ สี ลักษณะที่ปรากฏ โดยรวมทั้งหมด คุณค่าทางโภชนาการ และปลอดภัยของผลิตภัณฑ์อาหาร อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารเหล่านี้สามารถลดลงได้โดยการเลือกบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม เพื่อช่วยควบคุมปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเสื่อมเสียของอาหาร ได้แก่ ความชื้น ออกซิเจน แสง อุณหภูมิ และกลิ่น

การศึกษาอายุการเก็บรักษาจะตั้งอยู่บนพื้นฐานทางการประเมินทางฟิสิกส์ เคมี และ/หรือ การเปลี่ยนแปลงทางประสาทสัมผัสของคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งมักจะถูกเร่งเมื่อเก็บที่อุณหภูมิสูง คุณสมบัติของอาหารที่มีความสำคัญในการเก็บรักษาอาหารคือ การดูดความชื้นของอาหาร ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียเนื่องจาก จุลินทรีย์ ออกซิเจน เอนไซม์ หรือการเสื่อมเสียที่เกิดจาก ปฏิกิริยาที่ไม่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้อง โดยอาหารจะมีความสัมพันธ์กันระหว่างวอเตอร์แอกติวิตี และ ความชื้น ที่เรียกว่า ไอโซเทอร์มของการดูดและ/หรือคายความชื้น เมื่ออาหารถูกเก็บที่อุณหภูมิเดียวกับความชื้นโดยรอบ จะมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของน้ำในอาหารซึ่งจะทำให้อาหารนั้นมีความชื้นถึงความชื้นวิกฤตที่ทำอาหารเสื่อมเสีย การต่อต้านการซึมผ่านของไอน้ำของบรรจุภัณฑ์สารมารถทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นหรือสูญเสียน้ำจากผลิตภัณฑ์ลดลง จึงทำให้โอกาสที่อาหารจะเสื่อมเสียลดลง และทำให้สามารถควบคุมอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้ ดังนั้น ลักษณะทางกายภาพของบรรจุภัณฑ์นั้นเป็นอิทธิพลสำคัญของการทำนายอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารเมื่อเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ในสภาวะที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การถ่ายเทความชื้นผ่านบรรจุภัณฑ์อาหาร

ที่มา : Shafiur (1995)

A: วอเตอร์แอกติวิตี ของอาหารต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม

B: วอเตอร์แอกติวิตี ของอาหารสูงกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม

2.7.1 พลาสติกบรรจุอาหาร

ฟิล์มพลาสติกและบรรจุภัณฑ์พลาสติกมีประโยชน์ในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารมากกว่า แก้ว โลหะ และกระดาษ ในแง่ของรูปร่าง และขนาดที่สมารถเปลี่ยนแปลงได้น้ำหนักเบา ทนทาน ราคาวัสดุต่ำ สามารถนำเข้าเตาไมโครเวฟได้ และใช้ต้นทุนในการผลิตและขนส่งต่ำ แต่ข้อจำกัดในการใช้พลาสติกบรรจุอาหาร และเครื่องดื่ม คือ ค่าการซึมผ่านของไอน้ำ ก๊าซ และแสง เช่น โมเลกุลของก๊าซสามารถแทรกซึมและแพร่กระจายผ่านพลาสติกได้ และสามารถซึมเข้าหรือออกจากบรรจุภัณฑ์ที่ปิดสนิทได้

อย่างไรก็ตามสมบัติการซึมผ่านของก๊าซก็สามารถนำมาใช้ในการออกแบบ บรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารบางประเภทได้ เช่น ผักกาดสด ที่ต้องการให้เกิดการแทรกซึมออกของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ฟิล์มพลาสติกและบรรจุภัณฑ์พลาสติกมีประสิทธิภาพในการรักษาผลิตภัณฑ์แตกต่างกันขึ้นอยู่กับ วัสดุของบรรจุภัณฑ์ จึงได้มีการประยุกต์ใช้บรรจุกัณฑ์พลาสติกอย่างมากมายการใช้วัสดุ mono-layer ได้ถูกทดแทนการใช้ multi-layer ที่ทำเป็นแผ่นบาง ๆ และฟิล์มที่เคลือบด้วยโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ถูกนำมาใช้เพื่อป้องกันแสงและออกซิเจน เทคนิคการผลิตบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ ได้นำมาผลิตพลาสติกแบบ multi- layer เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารสำหับผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการให้มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานกว่าปกติ (Eskin et al..2001) ตัวอย่างเช่นการเคลือบไอโลหะลงบนฟิล์ม Oriented Polypropylene (OPP) สำหรับการบรรจุมันฝรั่งทอดที่ต้องการการป้องกันแสง และออกซิเจนเพื่อป้องกันการเหม็นหืน และป้องกันไอน้ำเพื่อป้องกันความชื้นที่ส่งผลต่อความกรอบของผลิตภัณฑ์ แม้ว่าฟิล์ม OPP จะความหนาสามารถลดการซึมผ่านของไอน้ำ และออกซิเจนได้แล้ว การเคลือบไอโลหะ และ/หรือ เคลือบวัสดุอื่นที่ป้องกันการซึมผ่าน เช่น Polyvinylidence Chloride (PVDC) และ Acrylic Polymers ยังสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการซึมผ่านได้อีกด้วยตัวอย่างฟิล์มพลาสติกบรรจุอาหารว่างได้แก่

- อายุการเก็บสั้น (ประมาณ 2 สัปดาห์) เช่น Low-Density Polyethylene (LDPE), Cast Polypropylene (CPP) เป็นต้น

- อายุการเก็บปานกลาง (ปานกลาง 2 เดือน) เช่น Polyethylene Theraphthalate หรือ Polyester (PET) เคลือบ Polyvinylidence (PVDC) และ Polyvinylidence (PE), Polypropylene (PP) เคลือบด้วย PVDC เป็นต้น

- อายุการเก็บนาน (ประมาณ 5 เดือนหรือมากกว่า) เช่น PP เคลือบไอโลหะ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การทดลอง

3.1 การศึกษาไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่นำมาทดลองได้แก่ เม็ดมะม่วงหิมพานต์, ลูกเดือย, เม็ดบัวซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีจำหน่ายในท้องตลาดและงาดำปรุงรสซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปพร้อมรับประทาน จากบริษัท โปร- แดรี่จำกัด

3.1.1 วิธีการทดลองสำหรับวัตถุดิบ

3.1.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ

1. เตรียมเม็ดบัวแห้งโดยนำมาแช่น้ำเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปต้มด้วยเตาแก๊สในหม้อต้มความดันนาน 5 นาที และทำแห้งด้วย เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง ที่อุณหภูมิ 120 °C ความเร็วรอบลูกกลิ้ง 1.12 รอบต่อนาที

2. เตรียมลูกเดือย โดย นำลูกเดือยแห้ง แช่น้ำเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปต้มด้วยเตาแก๊สในหม้อต้มความดันนาน 15 นาที และทำแห้งด้วย เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง ที่อุณหภูมิ 120 °C ความเร็วรอบลูกกลิ้ง1.12 รอบต่อนาที

3. เตรียมเม็ดมะม่วงหิมพานต์โดย นำเม็ดมะม่วงหิมพานต์ อบแห้ง มาขั้วที่ด้วยไฟอ่อน เป็นเวลา 10 นาที

4. งาดำปรุงรสเลือกใช้ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปพร้อมรับประทาน จากบริษัทโปร-แดรี่จำกัด

เมื่อเตรียมวัตถุดิบเสร็จ เก็บวัตถุดิบแต่ละชนิดไว้ในถุงพลาสติกโพลีเอททีลีนที่อุณหภูมิ ต่ำกว่า4 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.2 การหาไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของวัตถุดิบ

นำวัตถุดิบที่ผ่านการเตรียมแล้ว มาอบในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 131°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อหาความชื้นเริ่มต้นหลังจากนั้นชั่งตัวอย่างละ 5 ± 0.05 กรัม ใส่ในภาชนะที่วางไว้ในขวดโหลปิดสนิทที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัว 6 ชนิด ได้แก่ LiCl, CH_3COOK, $MgCl_2$, K_2CO_3, NaCl และ $(NH_4)_2SO_4$ (ปริมาตร 100 มิลลิลิตร) ภายในขวด โหลมีหลอดแก้วขนาด 10 มิลลิลิตร บรรจุสารละลายโทลูอีน 1.5 มิลลิลิตร เพื่อป้องกันการเกิดราบนตัวอย่าง วางขวดโหลในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25และ40 องศาเซลเซียส ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างทุก 10 วัน จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (±0.001กรัม) ตัวอย่างจะเข้าสู่ความชื้นสมดุล

3.1.1.3 การหาสมการที่เหมาะสมของไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น

นำค่าวอเตอร์แอกติวิตี และปริมาณความชื้นมาแทนในสมการดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยเลือกใช้สี่สมการแรก เพื่อวิเคราะห์หาค่าคงที่ของบสมการโดยใช้วิธี non-linear regression ในโปรแกรม STATISTIC A/w 5.0 และเลือกสมการที่ให้ค่า coefficient of determination, R^2 สูงสุด ค่า mean relative percent deviation, P (%) และ standard error of estimate, E_s ต่ำสุด มาใช้ในการสร้างกราฟไอโซเทอร์ม ค่าทั้งสามแสดงในสมการที่ (3.1) ถึง (3.3)

$$P = \frac{100}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{M_i - \overline{M_i}}{M_i}\right) \tag{3.1}$$

$$E_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(M_i - \overline{M_i}\right)^2}{df}} \tag{3.2}$$

$$e_i = M_i - \overline{M_i} \tag{3.3}$$

เมื่อ M_i และ $\overline{M_i}$ คือ ความชื้นที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการทำนายโดยสมการ คิด เป็นมาตรฐานแห้ง (I = 1...7 RH), N คือ จำนวนค่าสังเกต และ df คือ degree of freedom (จำนวนค่าสังเกตลบด้วยจำนวนค่าคงที่ในสมการ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การประยุกต์ใช้ไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของวัตถุดิบและสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวแบบผสม

3.2.1 กรณีศึกษาผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืช

ใช้ไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของวัตถุดิบ ที่เลือกมาใช้เป็นส่วนผสม 4 ชนิดคือ เม็ดบัว, ลูกเดือย, เม็ดมะม่วงหิมพานต์และงาดำปรุงรส กำหนดสูตรปริมาณส่วนผสมต่างๆต่อหนึ่งหน่วยผลิตภัณฑ์ดังตารางที่ 3.1 จากนั้น คำนวณไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ และหาอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ด้วยสมการที่ใช้ทำนายอายุการเก็บ

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณส่วนผสมต่างๆที่กำหนด ต่อหนึ่งหน่วยผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืช

องค์ประกอบ	น้ำหนักแห้ง(g)
เม็ดมะม่วงหิมพานต์	25
ลูกเดือย	25
เม็ดบัว	25
งาดำปรุงรส	25

3.2.1.1 การหาไอโซเทอร์มของการดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืช

นำไอโซเทอร์มของการดูดความชื้นที่ 25และ40 องศาเซลเซียส ของวัตถุดิบแต่ละชนิดมาใช้หา ไอโซเทอร์มของการดูดความชื้น ของผลิตภัณฑ์ การสร้างจุดต่างๆบนกราฟ ไอโซเทอร์มของการดูดความชื้น ของผลิตภัณฑ์ ทำโดยคำนวณหาค่าความชื้นของวัตถุดิบทุกตัวที่เป็นองค์ประกอบที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีเท่ากัน นำค่าความชื้นที่ได้คำนวณหาเป็นค่าความชื้นรวมของผลิตภัณฑ์ ณ ค่า วอเตอร์แอกติวิตี นั้น โดยกำหนดค่า วอเตอร์แอกติวิตีเป็น 0.1, 0.3, 0.5, 0.7และ 0.9 ตามลำดับ นำค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์รวมที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ต่างๆมาสร้างเป็นกราฟ ไอโซเทอร์มของการดูดความชื้นและแบบจำลองของไอโซเทอร์มของการดูดความชื้นที่ 25และ40 องศาเซลเซียส

3.2.1.2 การหาความชื้นวิกฤตของผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืช

เลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นตัวแทนของผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืชเพื่อหาค่าความชื้นวิกฤต โดยการปรับค่า a_w เป็น 5 ระดับ คือ 0.476, 0.491, 0.523, 0.561 และ0.597 โดยนำเม็ดมะม่วงหิมพานต์ผ่านการเตรียมดังหัวข้อที่ 3.1แล้วมาวางในภาชนะปิดสนิทที่มีน้ำบริสุทธิ์อยู่ด้านล่างทิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จนได้ระดับความชื้นตามที่ต้องการ จากนั้นนำไปทดสอบทางประสาทสัมผัส โดยทดสอบการยอมรับจากความชอบผลิตภัณฑ์ของผู้ทดสอบ โดยอาศัยกลุ่มตัวแทนผู้ทดสอบจำนวน 10 คน ให้คะแนนการยอมรับผลิตภัณฑ์ ในด้านความชอบ หลังจากนั้นนำคะแนนที่ได้มาประเมินเพื่อหาค่าความ วอเตอร์แอกติวิตี ที่ผู้บริโภคไม่ยอมรับ แทนค่า วอเตอร์แอกติวิตีนั้นลงในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ ไอโซเทอร์มของเม็ดมะม่วงหิมพานต์เพื่อหาค่าความชื้นวิกฤต สำหรับใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณหาอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์

3.2.1.3 การทำนายอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืช

นำค่าความชื้นเริ่มต้น ความชื้นวิกฤติและความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์มาใช้แทนในสมการที่ใช้ทำนายอายุการเก็บ ของผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวในบรรจุภัณฑ์ปิดสนิทดังนี้

$$\theta_c = DaystoM_c = \frac{\ln\left(\frac{M_c - M_i}{M_e - M_c}\right)}{\left(\frac{K}{X}\right)\left(\frac{A}{W_s}\right)\left(\frac{P_a}{S}\right)} \qquad (3.4)$$

ซึ่งค่าความชื้นทั้งสามนี้ได้จาก

- ความชื้นเริ่มต้น (M_i) ได้จากการหาปริมาณความชื้น (มาตรฐานแห้ง) ของผลิตภัณฑ์ซึ่งประมาณได้จากสมการ

$$a_w = \frac{(W_1 S_1 a_{w1}) + (W_2 S_2 a_{w2})}{(W_1 S_1) + (W_2 S_2)} \cdots \frac{+ (W_n S_n a_{wn})}{+ (W_n S_n)} \qquad (3.5)$$

โดยการแทนค่า วอเตอร์แอกติวิตี (a_{wn}), น้ำหนักแห้ง (W) และค่าความชันของไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น (S) ของส่วนผสมต่างๆทั้งสี่คือเม็ดมะม่วงหิมพานต์, ถูกเดือย, เม็ดบัวและงาดำปรุงรสลงในสมการเพื่อหาค่า วอเตอร์แอกติวิตีของผลิตภัณฑ์ (a_w) และนำค่าวอเตอร์แอกติวิตีของผลิตภัณฑ์ไปหาความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์

- ค่าความชื้นวิกฤต (M_c) ได้จากการทดสอบการยอมรับผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภค
- ค่าความชื้นสมดุล (M_e) คือค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลเท่ากับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศเท่ากับ 75 % RH (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2549)

3.2.2 กรณีศึกษาผลิตภัณฑ์ผสมระหว่างทุเรียนทอดกรอบกับเม็ดมะม่วงหิมพานต์

ประยุกต์ใช้สมการที่ (1) เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการกำหนดปริมาณส่วนผสมและค่า วอเตอร์แอกติวิตี (a_w) เริ่มต้นของส่วนผสม

$$a_w = \frac{(W_1S_1a_{w1})+(W_2S_2a_{w2})}{(W_1S_1)+(W_2S_2)} \cdots\cdots \frac{+(W_nS_na_{wn})}{+(W_nS_n)} \quad (3.5)$$

ทำโดยกำหนด ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) รวมของผลิตภัณฑ์ให้เท่ากับค่า วอเตอร์แอกติวิตี ณ ความชื้นวิกฤติของผลิตภัณฑ์ ซึ่งต้องเลือกค่าความชื้นวิกฤติของส่วนผสมตัวใดตัวหนึ่งเป็นเกณฑ์ เราสามารถสร้างสูตรผลิตภัณฑ์ได้ 2 ลักษณะคือ

1.สามารถหาค่า วอเตอร์แอกติวิตี เริ่มต้น ของส่วนผสมทั้งสอง (a_{w1}, a_{w2}) โดยกำหนดปริมาณส่วนผสมโดย น้ำหนักแห้ง ของส่วนผสมทั้งสอง วิธีนี้เป็นประโยชน์เมื่อต้องการทราบว่าควรกำหนดให้ส่วนผสมทั้งสองมีค่า วอเตอร์แอกติวิตี เป็นเท่าใดบ้างในกรณีที่ทราบปริมาณส่วนผสมโดยน้ำหนักแห้ง

2. สามารถหาปริมาณส่วนผสมโดยน้ำหนักแห้ง โดยกำหนด วอเตอร์แอกติวิตี เริ่มต้นของส่วนผสมทั้งสอง จะทำให้ทราบค่าปริมาณส่วนผสมโดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งสองเมื่อทราบวอ-เตอร์แอกติวิตี เริ่มต้นของส่วนผสมนั้นๆ

3.3 กรณีศึกษาผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช

นำองค์ประกอบส่วนที่เป็นของแข็งคือ เม็ดมะม่วงหิมพานต์,ลูกเดือย, เม็ดบัวและงาดำปรุงรส ซึ่งได้จากการเตรียมในหัวข้อที่3.1 และ ลูกเกด ซึ่งเป็นสำเร็จรูปจากท้องตลาดมาผสมเป็นแท่งด้วยตัวเชื่อมประสารได้แก่ กลูโครสไซรัป (แบะแซ) ตามสูตรที่กำหนดในตารางที่ 3.2 จากนั้น ทดลองหาไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นและทำนายอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ตามสมการ โดยกำหนดค่าความชื้นวิกฤติของเม็ดมะม่วงหิมพานเป็นตัวแทน ความชื้นวิกฤติของผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช

วัตถุดิบ	น้ำหนัก (g)
เม็ดมะม่วงหิมพานต์	3.8
ลูกเดือย	7.2
เม็ดบัว	3.2
งาดำ ปรุงรส	1.6
ลูกเกด	4.5
กลูโครสไซรัป	13.05
รวม	33.80

3.3.1 วิธีการทดลองสำหรับ ผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช

3.3.1.1 ขั้นตอนการผลิต ผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช

เตรียมวัตถุดิบ เม็ดบัว,ลูกเดือย, เม็ดมะม่วงหิมพาน, งาดำปรุงรส, ลูกเกด และกลูโครสไซรัป ตามปริมาณที่กำหนดในตารางที่ 3.2 ใส่กลูโครสไซรัป ลงในภาชนะที่มีการให้ความร้อนด้วยไฟอ่อนใส่ส่วนผสมต่างๆทั้งหมดลงในภาชนะแล้วคลุกเคล้าให้เข้ากันขึ้นรูปเป็นแท่ง ด้วยมือ และบรรจุผลิตภัณฑ์ใส่ถุงพลาสติกโพลีเอททีลีนไล่อากาศออกแล้วปิดผนึกปากถุงนำไปเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ4° องศาเซลเซียส

3.3.1.2 การหาไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช

แบ่งผลิตภัณฑ์ที่ผสมแล้วเป็น 9 ตัวอย่างๆละ 33.80 g นำมาเติมน้ำบริสุทธิ์ โดยปรับปริมาณน้ำให้แตกต่างกัน ตัวอย่างละ 0.5 g และคลุกเคล้าให้ทั่ว แล้วใส่ในถุงพลาสติกโพลีเอททีลีนไล่อากาศออกแล้วปิดผนึกปากถุงนำไปเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 7วัน จากนั้นนำมาวางไว้ไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นำไปหาค่า วอเตอร์แอกติวิตี กับค่าความชื้น เพื่อสร้างไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.3 การทำนายอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช

นำค่าความชื้นเริ่มต้น ความชื้นวิกฤติและความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์มาใช้แทนในสมการที่ใช้ทำนายอายุการเก็บ

ซึ่งค่าความชื้นทั้งสามนี้ได้จาก

- ความชื้นเริ่มต้น (M_i) ได้จากการวัดปริมาณความชื้น (มาตรฐานแห้ง) ของผลิตภัณฑ์หลังผสมเป็นแท่ง

- ค่าความชื้นวิกฤต (M_c) ได้จากการทดสอบการยอมรับผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภคต่อวัตถุดิบที่เลือกใช้เป็นตัวแทนผลิตภัณฑ์

- ค่าความชื้นสมดุล (M_e) คือค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลเท่ากับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศ

ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศเท่ากับ 75 % RH (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2549)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น ของวัตถุดิบแต่ละชนิด

ผลของการทดลองหาค่าความชื้นกับค่าวอเตอร์แอกติวิตี ณ.อุณหภูมิ 25และ 40 องศาเซลเซียส ของวัตถุดิบทั้งสี่ชนิดคือ เม็ดมะม่วงหิมพานต์, ลูกเดือย, เม็ดบัวและงาดำปรุงรส สามารถแสดงค่าต่างๆดังตารางที่ 4.1, 4.2, 4.3และ 4.4

ตารางที่ 4.1 ความชื้นของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ที่อุณหภูมิ และค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลต่างๆ

Temperature (°C)	Formular	Equilibrium Relative Humidity (decimal)	Equilibrium Moisture Contents (%d.b.)
25	LiCl	0.1125	5.5928
	CH_3COOK	0.2117	5.5435
	$MgCl_2$	0.3183	6.5281
	K_2CO_3	0.4318	5.8786
	NaCl	0.7506	10.054
	$(NH_4)_2SO_4$	0.7996	14.6293
40	LiCl	0.1127	5.4476
	CH_3COOK	0.2234	7.4396
	$MgCl_2$	0.3261	8.2906
	K_2CO_3	0.4317	9.1179
	NaCl	0.7534	10.8457
	$(NH_4)_2SO_4$	0.8095	13.1104

หมายเหตุ : ค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลได้จากการคำนวณหาวอเตอร์แอกติวิตีของสารละลายเกลือตามภาคผนวก ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่4.2 ความชื้นของลูกเดือย ที่อุณหภูมิ และค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลต่างๆ

Temperature (°C)	Formular	Equilibrium Relative Humidity (decimal)	Equilibrium Moisture Contents (%d.b.)
25	LiCl	0.1125	5.9469
	CH_3COOK	0.2117	6.906
	$MgCl_2$	0.3183	7.7227
	K_2CO_3	0.4318	8.0284
	NaCl	0.7506	13.2762
	$(NH_4)_2SO_4$	0.7996	17.2018
40	LiCl	0.1127	6.5433
	CH_3COOK	0.2234	6.5078
	$MgCl_2$	0.3261	8.3198
	NaCl	0.4317	13.4275
	$(NH_4)_2SO_4$	0.8095	19.2302

หมายเหตุ : ค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลได้จากการคำนวณหาวอเตอร์แอกติวิตีของสารละลายเกลือตามภาคผนวก ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ความชื้นของเม็ดบัวที่อุณหภูมิ และค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลต่างๆ

Temperature (°C)	Formular	Equilibrium Relative Humidity (decimal)	Equilibrium Moisture Contents (%d.b.)
25	LiCl	0.1125	5.8019
	CH_3COOK	0.2117	6.3592
	$MgCl_2$	0.3183	7.2214
	K_2CO_3	0.4318	7.6511
	NaCl	0.7506	14.9353
	$(NH_4)_2SO_4$	0.7996	19.0876
40	LiCl	0.1127	6.8716
	CH_3COOK	0.2234	7.1814
	$MgCl_2$	0.3261	7.51
	NaCl	0.7534	15.5325
	$(NH_4)_2SO_4$	0.8095	21.8062

หมายเหตุ : ค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลได้จากการคำนวณหาวอเตอร์แอกติวิตีของสารละลายเกลือตามภาคผนวก ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ความชื้นของงาดำปรุงรสที่อุณหภูมิ และค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลต่างๆ

Temperature (°C)	Formular	Equilibrium Relative Humidity (decimal)	Equilibrium Moisture Contents (%d.b.)
25	LiCl	0.1125	3.279
	CH_3COOK	0.2117	3.5712
	$MgCl_2$	0.3183	3.8788
	K_2CO_3	0.4318	2.6689
	NaCl	0.7506	9.0631
	$(NH_4)_2SO_4$	0.7996	14.2075
45	LiCl	0.1127	3.5758
	CH_3COOK	0.2234	3.6483
	$MgCl_2$	0.3261	4.4552
	K_2CO_3	0.4317	6.1366
	NaCl	0.7534	9.1776
	$(NH_4)_2SO_4$	0.8095	13.5108

หมายเหตุ : ค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลได้จากการคำนวณหาวอเตอร์แอกติวิตีของสารละลายเกลือตามภาคผนวก ก.

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.1, 4.2, 4.3และ4.4 มาหาความสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในบทที่ 2 โดยในที่นี้เลือกแบบจำลองสี่สมการแรกตามตารางที่ 2.2 ได้ผลเปรียบเทียบในแต่ละแบบจำลองสำหรับอธิบายไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของวัตถุดิบต่างๆเพื่อเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบด้วยค่า coefficient of determination (R^2) ที่ให้ค่ามากที่สุด standard error of estimate (E_s) และ Mean relative percent deviation (%P) น้อยที่สุด ซึ่งพบว่าแบบจำลองของ Halsey ให้ค่า R^2 มากที่สุด ให้ค่า %P น้อยที่สุด และค่า E_s น้อยที่สุด สำหรับวัตถุดิบทุกชนิด ดังนั้นแบบจำลองของ Halsey น่าจะเป็นสมการที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายค่าความชื้นสมดุลและสามารถเขียนเป็นสมการในรูปของวอเตอร์แอกติวิตี โดยแสดงในตารางที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าประมาณของตัวแปรต่างๆ โดยใช้แบบจำลองของวัตถุดิบชนิดต่างๆ

วัตถุดิบ	Parameter	Modified Henderson	Modified Chung-Pfost	Modified Halsey	Modified Oswin
มะม่วงหิมพานต์	A	0.00174	10679600	4.24681	-0.0035
	B	-0.11434	816187.8	0.043887	0.000165
	C	2.046559	0.334633	2.852189	-0.0285
	R^2	0.7771	0.898	0.9487	-
	P	-980.9437	-1.8174588	-0.35047	99.97664
	E_s	190.11191	2.47171865	2.615744	18.07661
	$a_w \approx \exp\left[-\exp(4.24681 + 0.043887T)M^{\frac{-1}{2.852189}}\right]$ (4.1)				
เมล็ดลูกเดือย	A	0.000155	7594795	4.603038	0.010884
	B	-0.161639	1243788	0.008336	-0.00023
	C	2.111173	0.211147	2.308876	-0.02821
	R^2	0.92343	0.97157	0.98747	-
	P	-2372.888	3.64307056	1.238	99.95943
	E_s	518.96104	2.7154082	2.08994	21.47124
	$a_w \approx \exp\left[-\exp(4.603038 + 0.008336T)M^{\frac{-1}{2.308876}}\right]$ (4.2)				

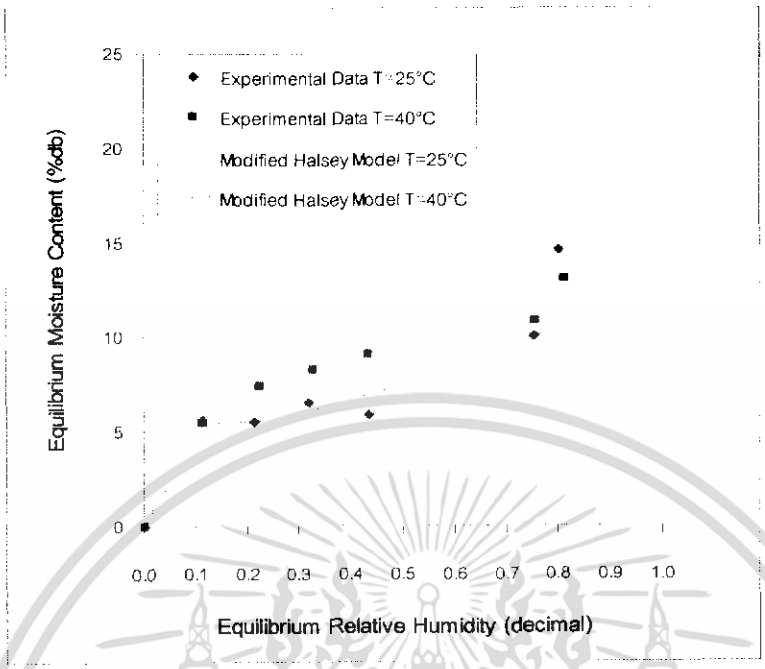
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่4.5 (ต่อ) เปรียบเทียบค่าประมาณของตัวแปรต่างๆ โดยใช้แบบจำลองของวัตถุดิบชนิดต่างๆ

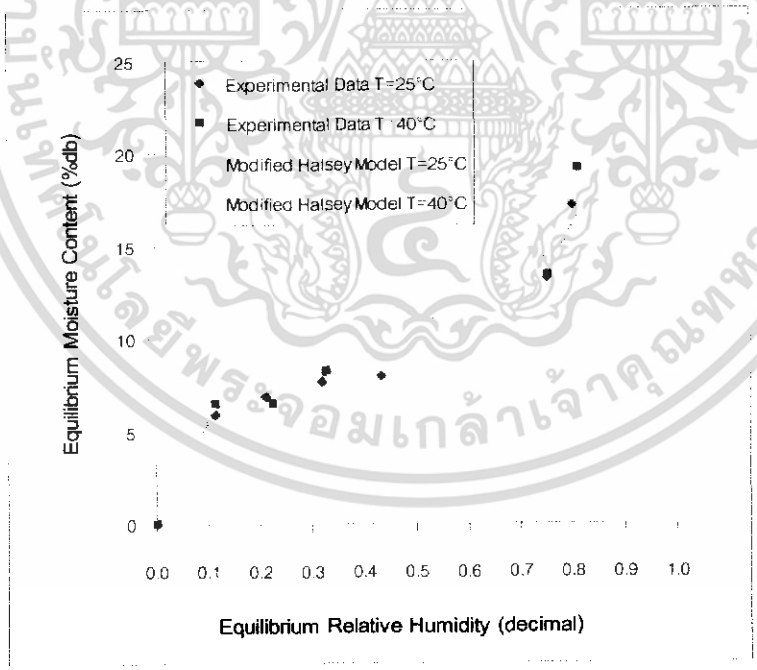
วัตถุดิบ	Parameter	Modified Henderson	Modified Chung-Pfost	Modified Halsey	Modified Oswin
เม็ดบัว	A	0.000329	17045400	3.656482	-0.00179
	B	-0.175842	3735408	0.016292	0.000121
	C	1.678198	0.171988	1.981199	-0.02949
	R^2	0.89065	0.96139	0.984	-
	P	-6212.057	3.7148666	2.110953	99.97669
	F_s	1536.0573	3.41936021	2.355104	23.40689
	$a_w \approx \exp\left[-\exp(3.656482 + 0.016292T)M^{\frac{-1}{1.981199}}\right]$ (4.3)				
งาดำปรุงรส	A	0.001064	13965800	1.596494	0.000972
	B	-0.136529	3750422	0.018211	0.000034
	C	1.555542	0.256889	1.444145	-0.02693
	R^2	0.86695	0.91659	0.91916	-
	P	-9077.208	-1343.5273	-3.49453	99.95599
	F_s	1302.341	182.744538	2.707363	15.05236
	$a_w \approx \exp\left[-\exp(1.596494 + 0.018211T)M^{\frac{-1}{1.444145}}\right]$ (4.4)				

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองระหว่างค่าความชื้นกับความชื้นสัมพัทธ์สมดุลที่อุณหภูมิ 25 และ 40 องศาเซลเซียสนำมาสร้างเป็นกราฟไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของวัตถุดิบทั้งสี่ชนิด ร่วมกับไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองของ Halsey ตามสมการที่ 4.1, 4.2, 4.3และ4.4 แสดงดังรูปที่4.1, 4.2, 4.3และ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

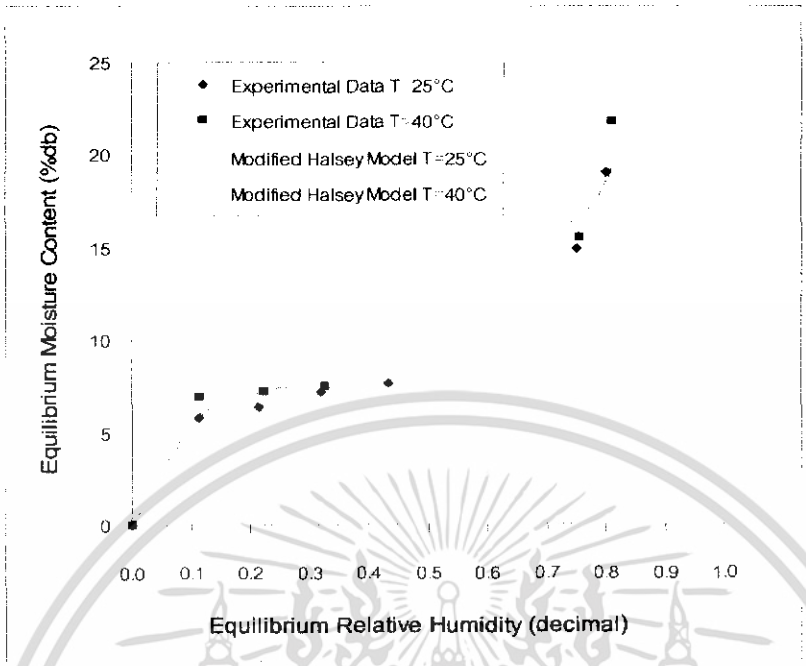


รูปที่ 4.1 กราฟไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งทำนายโดยแบบจำลองของ Halsey เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง

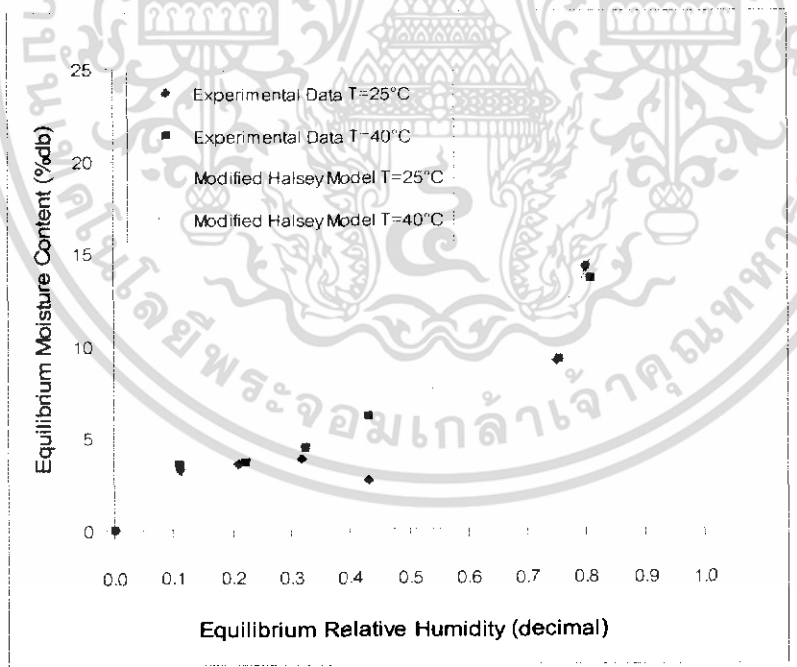


รูปที่ 4.2 กราฟไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของเม็ดเมล็ดลูกเดือย ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งทำนายโดยแบบจำลองของ Halsey เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

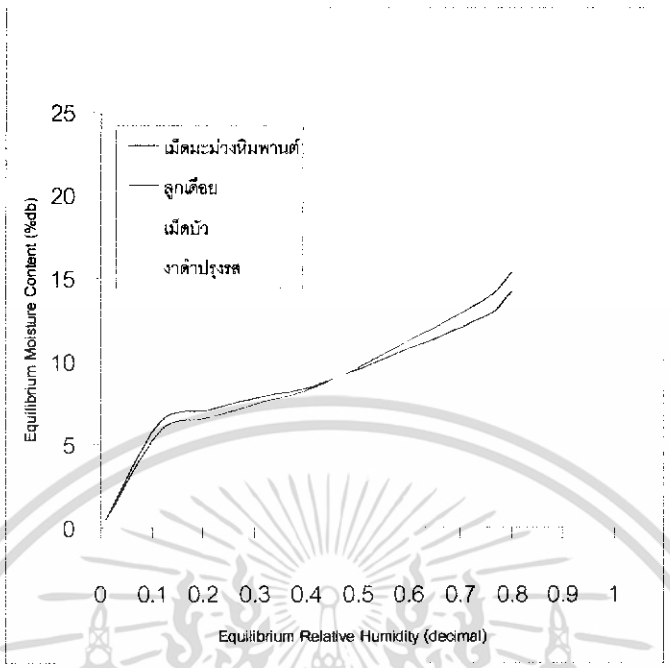


รูปที่ 4.3 กราฟไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของเม็ดบัวที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งทำนายโดยแบบจำลองของ Halsey เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.4 กราฟไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของงาคำปรุงรส ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งทำนายโดยแบบจำลองของ Halsey เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟไอโซเทอร์มแบบดูดของวัตถุดิบทั้งสี่ ซึ่งทำนาย โดยแบบจำลองของ Halsey เปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.1,4.2,4.3 และ 4.4 ซึ่งพบว่ากราฟไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น ซึ่งทำนายโดยใช้แบบจำลองของ Halsey เป็นแบบ Sigmoidal Curve (Transport Information Service.2004) และที่อุณหภูมิคงที่ ความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (ERH) เพิ่มขึ้น และที่ค่าความชื้นคงที่ ความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (ERH) เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลต่อการเสื่อมเสียของอาหาร โดยเฉพาะการเสื่อมเสียทางด้านจุลินทรีย์

เมื่อนำกราฟไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ ลูกเดือย เม็ดบัวและงาดำปรุงรส มาเปรียบเทียบกันที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งพบว่าเมื่อเริ่มต้นในช่วงวอเตอร์แอกติวิตีต่ำกว่า 0.15 ค่าความชื้นของ เม็ดมะม่วงหิมพานต์ ลูกเดือย และ เม็ดบัวมีค่าแตกต่างจาก งาดำปรุงรส อย่างชัดเจน โดยเม็ดมะม่วงหิมพานต์ เมล็ดลูกเดือย และ เม็ดบัวมีความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อวอเตอร์แอกติวิตี เพิ่มขึ้น และในช่วงวอเตอร์แอกติวิตีมากกว่า 0.15 ขึ้นไป ค่าความชื้นของวัตถุดิบแต่ละชนิดจะค่อยๆเพิ่มขึ้น โดยสังเกตจากความชันของกราฟพบว่าลักษณะแนวโน้มของการเพิ่มความชื้นของเส้นกราฟไอโซเทอร์มเม็ดมะม่วงหิมพานต์ เมล็ดลูกเดือย เม็ดบัว และ งาดำปรุงรส มีลักษณะใกล้เคียงกัน

หากเปรียบไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 25 กับ 40 องศาเซลเซียสของอาหารทั้งสี่จากกราฟพบว่า เม็ดมะม่วงหิมพานต์ และ งาดำปรุงรสมีแนวโน้มของเส้นไอโซเทอร์มที่เปลี่ยนไปตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิชัดเจนกว่าลูกเดือยและเม็ดบัวแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงกราฟไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ และ งาดำปรุงรสมากกว่า ลูกเดือยและเม็ดบัวหรือหากพิจารณาจากแบบจำลองของวัตถุดิบแต่ละชนิดเพื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติในการดูดความชื้น ที่ค่าสัมประสิทธิ์(B) ของตัวแปรอุณหภูมิ (T) หากมีค่ามากแสดงว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลมากต่อคุณสมบัติในการดูดความชื้น จากค่า B ตามตารางที่ 4.5 พบว่าผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปส่งผลต่อคุณสมบัติในการดูดความชื้นของ เม็ดมะม่วงหิมพานต์มากที่สุดโดยมีค่า B เท่ากับ0.043887 รองลงมาคือ งาดำปรุงรสมีค่า B เท่ากับ0.018211, เม็ดบัวมีค่า B เท่ากับ0.016292และ ลูกเดือยมีค่า B เท่ากับ0.008336ตามลำดับ

4.2 ผลจากตัวอย่างการการประยุกต์ใช้ไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของวัตถุดิบและสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวแบบผสม

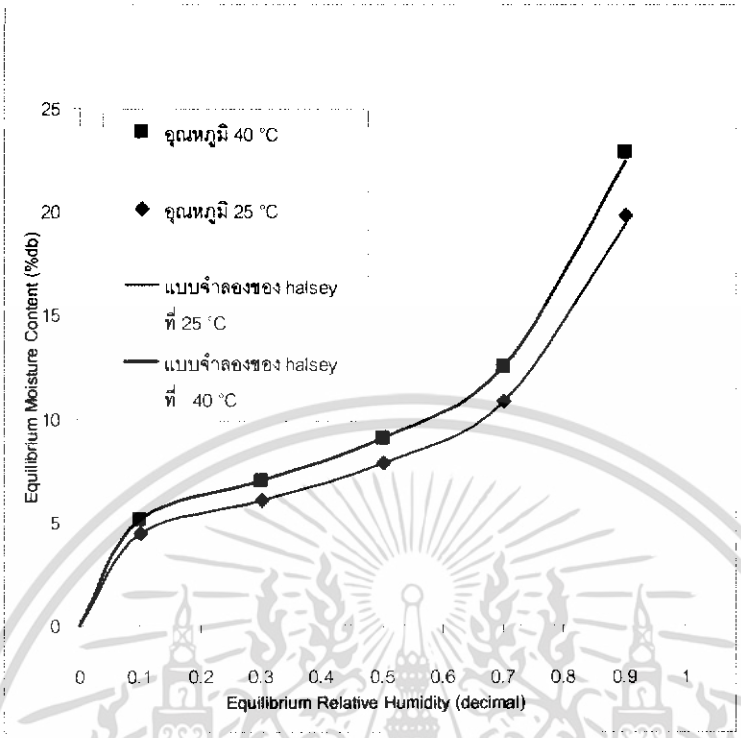
4.2.1ไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืช

เมื่อประยุกต์ใช้ไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นที่ 25 และ40 องศาเซลเซียส ของวัตถุดิบทั้งสี่ชนิดคือ เม็ดมะม่วงหิมพานต์, ลูกเดือย, เม็ดบัวและงาดำปรุงรส เพื่อคำนวณหาไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น ของผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืชตามปริมาณส่วนผสมที่กำหนดไว้ ตามตารางที่ 3.1 ไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น ของผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืชได้แสดงดังรูปที่ 4.6

ซึ่งทำนายได้ด้วยแบบจำลองของ Halsey เป็นแบบจำลองของผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืชดังสมการที่ 4.5

$$a_w \approx \exp\left[-\exp(3.446664 + 0.019795T)M^{\frac{-1}{2.08621}}\right] \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืช ที่อุณหภูมิ 25 และ 40 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง

หมายเหตุ : การหาไอโซเทอร์มของผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืชทำตามวิธีในภาคผนวก ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ความชื้นวิกฤตของผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืช

ผลของการทดสอบทางประสาทสัมผัส โดยการทดสอบการยอมรับจากความชอบผลิตภัณฑ์ที่ใช้เม็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเกณฑ์ในการทดสอบ ด้วยผู้ทดสอบจำนวน10 คนให้คะแนนการยอมรับผลิตภัณฑ์ ผลของคะแนนที่ได้แสดงดัง ตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงระดับคะแนนความชอบเม็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่างๆ

วอเตอร์แอกติวิตี	ระดับความชอบ
0.476	6.1
0.491	7.9
0.523	5.7
0.561	6.1
0.597	6.6

จากตารางที่ 4.6 พบว่าระดับคะแนนความชอบเม็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่างๆในช่วง 0.476-0.597 ไม่สามารถบอกได้ว่าจุดที่ผู้บริโภคไม่ยอมรับผลิตภัณฑ์ว่าอยู่ที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีเท่าใด

ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าความชื้น ที่ ค่าวอเตอร์แอกติวิตีเท่ากับ 0.6 ซึ่งเป็นสภาวะที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้ เป็นค่าความชื้นวิกฤตของผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืช โดยแทนค่าวอเตอร์แอกติวิตีเท่ากับ 0.6 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ลงในแบบจำลองของ Halseyในสมการที่ 4.5 ซึ่งเป็นแบบจำลองของผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืช ได้ค่าความชื้นวิกฤติ ของผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืช เท่ากับ 9.127 % d.b.

4.2.3 การทำนายอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืช

นำค่าความชื้นเริ่มต้น ความชื้นวิกฤติและความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์มาใช้แทนในสมการที่ใช้ทำนายอายุการเก็บ ของผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวในบรรจุภัณฑ์ปิดสนิทดังนี้

$$\theta_c = DaystoM_c = \frac{\ln\left(\frac{M_c - M_i}{M_e - M_c}\right)}{\left(\frac{K}{X}\right)\left(\frac{A}{W_s}\right)\left(\frac{P_o}{S}\right)} \qquad (4.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความชื้นเริ่มต้น(M_i) หาได้จากการ หาค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_W) ของผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืชซึ่งประมาณว่าเป็นค่าวอเตอร์แอกติวิตี เริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ จากสมการ

$$a_w = \frac{(W_1 S_1 a_{w1}) + (W_2 S_2 a_{w2})}{(W_1 S_1) + (W_2 S_2)} \ldots\ldots \frac{+ (W_n S_n a_{wn})}{+ (W_n S_n)} \qquad (4.7)$$

แทนค่าน้ำหนักแห้ง (W_n) จากข้อมูลในตารางที่ 3.1 ค่า วอเตอร์แอกติวิตีของส่วนประกอบ (a_{wn}) และ ความชันเชิงเส้นของ ไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นส่วนประกอบ (S_n) จากข้อมูลของวัตถุดิบดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงค่า วอเตอร์แอกติวิตี (a_w) และ ความชัน (S) ของวัตถุดิบที่ใช้เป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืช

องค์ประกอบ	a_w	S (%d.b. / %ERH)
เม็ดมะม่วงหิมพานต์	0.4433	0.0795
ลูกเดือย	0.5520	0.1396
เม็ดบัว	0.4823	0.1529
งาดำ	0.2723	0.0950

หมายเหตุ : ค่า a_w ได้จากการทดลองวัดค่าวัตถุดิบ และค่า ความชันเชิงเส้นของไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น(S) ได้จากการคำนวณตามภาคผนวก ก.

เมื่อได้วอเตอร์แอกติวิตีเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืช จากสมการที่ 4.7 นำไปแทนในแบบจำลองไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ในสมการที่ 4.5 เพื่อหาค่าความชื้นเริ่มต้น (Mi) ของผลิตภัณฑ์

ค่าความชื้นสมดุล (M_e) ใช้ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลเท่ากับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศ เท่ากับ 75 % RH (a_w= 0.75) แทนค่า a_w ลงในนำไปแทนในแบบจำลองไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ในสมการที่4.5 เพื่อหาค่าความชื้นสมดุล (M_e) ของผลิตภัณฑ์

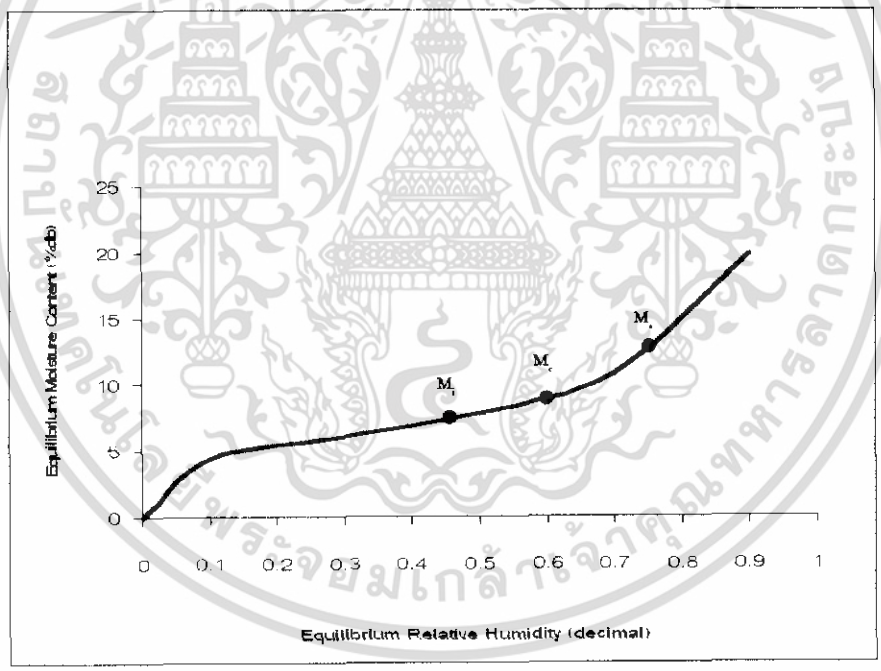
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าตัวแปรต่างๆสำหรับใช้อายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ด้วยสมการแสดงดังตารางที่4.8 ส่วนค่า Kหรือค่า การยอมให้ไอน้ำซึมผ่านของบรรจุภัณฑ์ เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของบรรจุภัณฑ์แต่ละชนิด

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าตัวแปรต่างๆเพื่อใช้ทำนายอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืช

M_i (%d.b)	M_c (%d.b)	M_e (%d.b)	W_s (g_{solid})	S (%d.b. / %ERH)	P_0 (mmHg)	X (m)	A (m^2)
7.399	9.130	12.023	100	0.1177	19.015	0.00006	0.051

หมายเหตุ : ค่า ความชันเชิงเส้นของไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น (S) ได้จากการคำนวณในภาคผนวก ก.



รูปที่ 4.7 แสดงค่า M_i, M_c และ M_e บนเส้นกราฟไอโซเทอร์มของผลิตภัณฑ์ธัญพืชผสมสำเร็จรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงอายุการเก็บของผสมจากถั่วและธัญพืช จากการทำนาย

ชนิดของบรรจุภัณฑ์	พื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์ หรือ A (m^2)	ความหนาของบรรจุภัณฑ์ หรือ X (m)	การยอมให้ไอน้ำซึมผ่านของบรรจุภัณฑ์ หรือ K (gH2O*m/m2*day*mmHg)	อายุการเก็บที่ได้จากการทำนาย (Day)
Low-density Polypropylene(LDPE)	0.051	0.00006	$20.2031*10^{-6}$	17
Cast Polypropylene (CPP)	0.051	0.00006	$7.7704*10^{-6}$	43
High- density Polypropylene(LDPE)	0.051	0.00006	$2.0721*10^{-6}$	162

4.2.4 ผลการประยุกต์ใช้ สมการทางคณิตศาสตร์กับผลิตภัณฑ์ผสมระหว่างทุเรียนทอดกรอบกับเม็ดมะม่วงหิมพานต์

โดยประยุกต์ใช้สมการ

$$a_w = \frac{(W_1 S_1 a_{w1}) + (W_2 S_2 a_{w2})}{(W_1 S_1) + (W_2 S_2)} \cdots \frac{+ (W_n S_n a_{wn})}{+ (W_n S_n)} \qquad (4.7)$$

กำหนดค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) รวมของผลิตภัณฑ์เท่ากับค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่ความชื้นวิกฤติของทุเรียนทอดกรอบ 4.9 % d.b.วอเตอร์แอกติวิตีคือ 0.323 (คนกวรรรณ, 2547) เนื่องจากมีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤตของเม็ดมะม่วงหิมพานต์

ประยุกต์ใช้สมการที่ 1 โดยแบ่งเป็นสองกรณีคือกรณีที่1.เพื่อหาค่าวอเตอร์แอกติวิตีเริ่มต้นของทุเรียนทอดกรอบ และของเม็ดมะม่วงหิมพานต์(a_{w1}, a_{w2}) เมื่อทราบค่าน้ำหนักแห้งของผลิตภัณฑ์ทั้งสอง (W_1, W_2) กรณีที่2.เพื่อหาส่วนผสมโดยน้ำหนักแห้ง(W_1, W_2) เมื่อทราบค่า วอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอกติวิตีเริ่มต้นของทุเรียนทอดกรอบ และของเม็ดมะม่วงหิมพานต์(a_{w1}, a_{w2})แสดงผลการคำนวณดังตารางที่4.10และ4.11

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าตัวแปรต่างๆและผลการหาวอเตอร์แอกติวิตีเริ่มต้นของทุเรียนทอดกรอบ และเม็ดมะม่วงหิมพานต์ที่คำนวณได้

วัตถุดิบ	W_n ที่ทราบค่า (g_{solid})	S (%d.b. / %ERH)	a_{wn} ที่คำนวณหาได้
ทุเรียนทอดกรอบ	20	0.134	0.280
เม็ดมะม่วงหิมพานต์	20	0.079	0.394

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าตัวแปรต่างๆและผลการหาวอเตอร์แอกติวิตีเริ่มต้นของทุเรียนทอดกรอบ และเม็ดมะม่วงหิมพานต์ที่คำนวณได้

วัตถุดิบ	a_{wn} ที่ทราบค่า	S (%d.b. / %ERH)	W_n ที่คำนวณหาได้ (g_{solid})
ทุเรียนทอดกรอบ	0.250	0.134	43.200
เม็ดมะม่วงหิมพานต์	0.500	0.079	30.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการศึกษาผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช

4.3.1 ไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น ของผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช

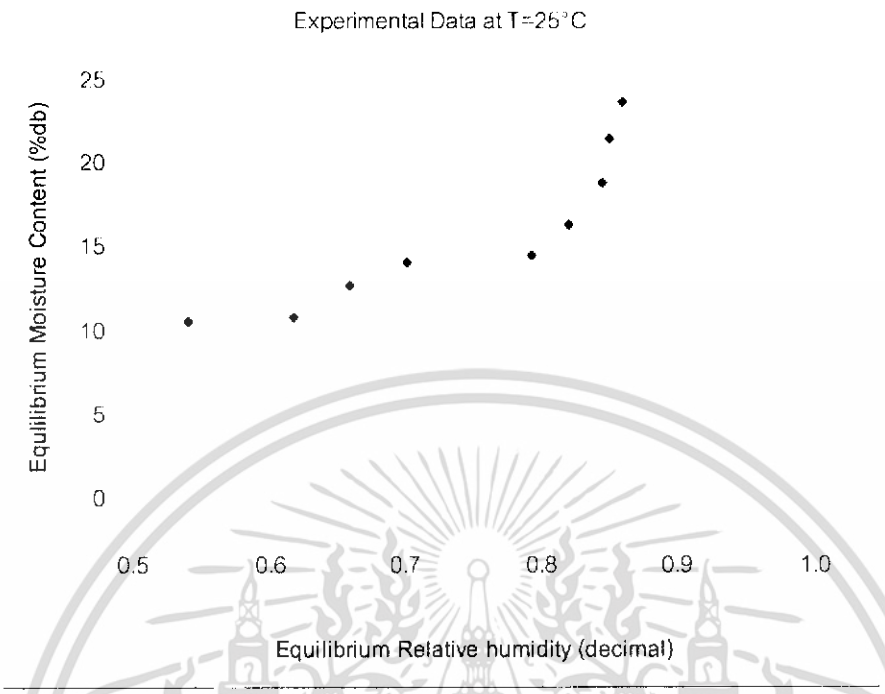
ผลการทดลองค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืชและสภาวะการเก็บต่างๆแสดงค่าในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ความชื้นของผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืชและค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุล

Temperature (°C)	Equilibrium Relative Humidity (decimal)	Equilibrium Moisture Contents (%d.b.)
25	0.5407	10.4683
	0.6177	10.7404
	0.6590	12.6436
	0.7013	14.0000
	0.7933	14.4343
	0.8200	16.2204
	0.8450	18.7243
	0.8500	21.4208
	0.8597	23.6424

จากข้อมูลที่ได้นำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและความชื้นสัมพัทธ์สมดุลที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังรูป 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น (EMC) และความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (ERH) ของผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.8 พบว่ากราฟไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส การเพิ่มขึ้นของค่าและความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (ERH) ในช่วง 0.540 ถึง 0.617 ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้น (EMC) น้อยมากเช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุล ในช่วง 0.701 ถึง 0.793 ส่วนการเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมพัทธ์สมดุล ในช่วง 0.617 ถึง 0.7013 ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้นอย่างชัดเจน และค่าความชื้น จะมีการเปลี่ยนแปลงโดยเพิ่มขึ้นสูงมากเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลมีค่าตั่งแต่ 0.793 ขึ้นไป

4.3.2 การทำนายอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช

นำค่าความชื้นเริ่มต้น ความชื้นวิกฤติและความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์มาใช้แทนในสมการที่ใช้ทำนายอายุการเก็บ ของผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวในบรรจุภัณฑ์ปิดสนิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\theta_c = DaystoM_c = \frac{\ln\left(\frac{M_c - M_i}{M_e - M_i}\right)}{\left(\frac{K}{X}\right)\left(\frac{A}{W_s}\right)\left(\frac{P_o}{s}\right)} \quad (4.6)$$

- ค่าความชื้นเริ่มต้น(M_i) หาได้จากการวัดค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์หลังผสม

- ค่าความชื้นวิกฤต (M_c) หาได้จากกราฟค่าไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืชที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีเท่ากับ 0.6 เนื่องจากไม่สามารถระบุค่าความชื้นวิกฤตของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ซึ่งเป็นตัวแทนผลิตภัณฑ์ได้

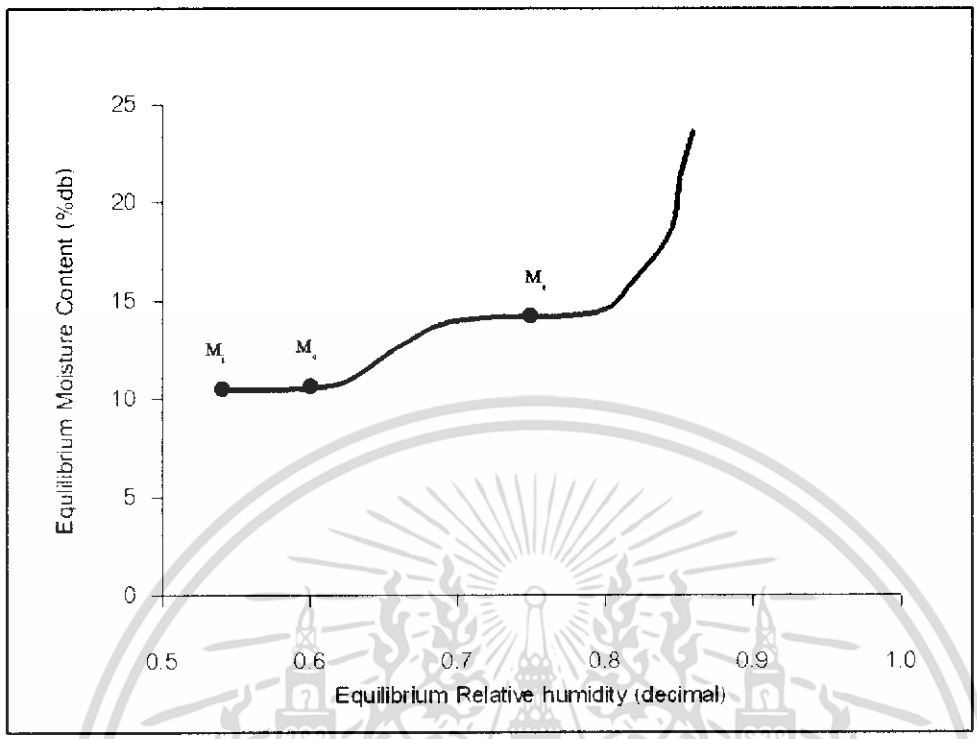
- ค่าความชื้นสมดุล (M_e) หาได้จากกราฟค่าไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลเท่ากับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศ เท่ากับ 75 % RH (a_w= 0.75)

ค่าตัวแปรต่างๆสำหรับใช้อายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ด้วยสมการแสดงดังตารางที่4.13 ส่วนค่า Kหรือค่า การยอมให้ไอน้ำซึมผ่านของบรรจุภัณฑ์ เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของบรรจุภัณฑ์แต่ละชนิด

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าตัวแปรต่างๆเพื่อใช้ทำนายอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช

M_i (%d.b)	M_c (%d.b)	M_e (%d.b)	W_s (g_{solid})	S (%d.b. / %ERH)	P_0 (mmHg)	X (m)	A (m^2)
10.468	10.6	14.2	30.6	0.022	19.015	0.00006	0.03565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงค่า M_1, M_c และ M_c บนเส้นกราฟไอโซเทอร์มของผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช

ตารางที่ 4.14 แสดงอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช จากการทำนายด้วยสมการ

ชนิดของบรรจุภัณฑ์	พื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์ หรือ A (m^2)	ความหนาของบรรจุภัณฑ์ หรือ X (m)	การยอมให้ไอน้ำซึมผ่านของบรรจุภัณฑ์ หรือ K (g_{H2O} *m/m2*day* mmHg)	อายุการเก็บที่ได้จากการทำนาย (Day)
High- density Polypropylene(LDPE)	0.03565	0.00006	$2.0721*10^{-6}$	1
Aluminum metallized Polyethylenetere phthalate / polyethylene	0.03565	0.00006	$0.6475 * 10^{-6}$	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่5

สรุปผลการทดลอง

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ของผลิตภัณฑ์ผสมจากถั่วและธัญพืช และผลิตภัณฑ์ชนิดแท่งจากถั่วและธัญพืช เมื่อนำมาทำนายอายุการเก็บโดยใช้แบบ จำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งพบว่า อายุการเก็บรักษาจะ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักๆ คือ ค่าความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี เริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ ขนาดความหนาและค่าการซึมผ่านของบรรจุภัณฑ์ปิดสนิท ในส่วนของ ธัญพืชผสมสำเร็จรูปแบบชนิดแท่ง พบว่าอายุการเก็บสั้นมาก เป็นเพราะค่าความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ สูงเกินไปเพราะมีส่วนผสมของสารเชื่อมประสารคือกลูโครสไซรัป อยู่มาก ดังนั้นในการผลิต ผลิตภัณฑ์ควรใช้ สารเชื่อมประสารชนิดที่เหมาะสม หรือลดปริมาณสารเชื่อมประสารลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

กนกวรรณ บัวจันทร์, กฤษชัย ถนอมสุข และณัฏฐาพร จิระกิจกุล "การทำนายอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวบรรจุถุงปิดสนิท: กรณีศึกษาทุเรียนทอดกรอบ" ปีการศึกษา 2547 ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กรมอุตุนิยมวิทยา. 2549. ความรู้ด้านอุตุนิยมวิทยา ภูมิอากาศของประเทศไทย Available : http://www.tmd.go.th/knowledge/know_weather02.html

เครือข่ายข้อมูลวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว. 26 สิงหาคม 2547. Water Activity กับการควบคุมอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร. Available : http://www.phtnet.org/article/View Article.asp %3Fid%3D12+water+activity&hl=th.

ธนพลวานิช. 28 กันยายน 2547. ความชื้นสัมพัทธ์.[Online]. Available : http://www.tanapolvanich.com/humidity.htm.

รัตนันท์ พรรณนารุโณทัย. 26 สิงหาคม 2547. บทบาทของ Water Activity (A_w) ในอุตสาหกรรมอาหาร. Available : http://www.charpra.co.th/bulletin/ water_activity.html.

รศ.สาทิป รัตนภาสกร.2535.การอบแห้งและการเก็บรักษาเมล็ดพืช.

วิฑูรย์ พิมพ์สวัสดิ์.2539. "เครื่องมือวัด Water Activity ของผลิตภัณฑ์อาหาร".ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วิมลศิริ ธนะสูติ "การพัฒนาอาหารเช้าสำเร็จรูปแบบผสมชนิดแท่ง" วิทยานิพนธ์ ปีการศึกษา 2539ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Aviara N.A., O.O. Ajibola and S.A.Oni.2004. Sorption Equilibrium and Thermodynamic Characteristics of Soya Bean. **Biosystms Engineering** 87(2),179-190

Decagon device, inc. 1 October 2004. About Water Activity. Available : http://www. Wateractivity.org/theory.htm

Eskin N.A., Michael and David S. Robinson . **Packing Consideration: Food shelf Life Stability** . Boca Raton: CRC Press. 370 p.

Rockland Louis B. and Larry R. Beuchat. 1986. **Water Activity: Theory and Applications to Food**. New York:Marcel Dekker. 404 p.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

Labuza Theodore. 29 August 2004. Water Activity of Saturated Salt Solution . [Online] Available : http://www.users.bigpond.com/webbtech/salt.html.

Transport Information Service. 4 October 2004. Hygroscopicity/Sorption behavior. [Online]. Available : http://www.tis-gdv.de/tis_e/misc/hygro.htm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

วิธีการคำนวณ

1. การคำนวณหาค่าวอเตอร์แอกติวิตีของสารละลายเกลืออิ่มตัว
2. การคำนวณหาไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ธัญพืชผสมสำเร็จรูป
3. การคำนวณหาความชันเชิงเส้นของไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. คำนวณหาค่าวอเตอร์แอกติวิตีของสารละลายเกลืออิ่มตัว

ความสัมพันธ์ระหว่างวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) และอุณหภูมิ ของสารละลายเกลืออิ่มตัว โดยทั่วไปจะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$\ln a_w = \frac{k_1}{T} - k_2$$

เมื่อ k_1 และ k_2 คือ ค่าคงที่ของเกลือแต่ละชนิด

T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (^{0}K)

ตารางที่ ก.1 ค่า k_1 และ k_2 ของสารละลาย

Saturated salt solution	Formular	k_1	k_2	Mean relative % error
Lithium Chloride	LiCl	10.8233	2.2193	0.2040
Potassium Acetate	CH_3COOK	333.9001	2.6185	-
Magnesium Chloride	$MgCl_2$	151.0652	1.6271	0.4059
Potassium Carbonate	K_2CO_3	-3.0240	0.8300	0.0046
Sodium Chloride	NaCl	23.1092	0.3607	0.1631
Ammonium Sulfate	$(NH_4)_2SO_4$	76.8191	0.4690	0.0337

ที่มา : Labuza (2004)

ตารางที่ ก.2 ค่า วอเตอร์แอกติวิตีของสารละลาย

สารละลายเกลือ	วอเตอร์แอกติวิตี	
	25 °C	45°C
LiCl	0.1127	0.1125
CH_3COOK	0.2234	0.2117
$MgCl_2$	0.3261	0.3183
K_2CO_3	0.4317	0.4318
NaCl	0.7534	0.7506
$(NH_4)_2SO_4$	0.8095	0.7996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ความชื้นสมดุลของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ เปรียบเทียบกับความชื้นที่ได้จากการทำนาย โดยใช้แบบจำลองของ Halsey ที่อุณหภูมิ 25 และ 40 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ C°	สารละลายเกลือ	ความชื้นสัมพัทธ์สมดุล(ERH)	ความชื้นที่ได้จากการวัด(%ฐานแห้ง)	ความชื้นที่ได้จากการทำนาย(%ฐานแห้ง)
25	LiCl	0.1125	5.5928	6.2384
	CH_3COOK	0.2117	5.5435	7.1176
	$MgCl_2$	0.3183	6.5281	7.8817
	K_2CO_3	0.4318	5.8786	8.7191
	NaCl	0.7506	10.0540	12.7666
	$(NH_4)_2SO_4$	0.7996	14.6293	14.1455
40	LiCl	0.1127	5.4476	4.9512
	CH_3COOK	0.2234	7.4396	5.5812
	$MgCl_2$	0.3261	8.2906	6.2105
	K_2CO_3	0.4317	9.1179	6.9231
	NaCl	0.7534	10.8457	10.0890
	$(NH_4)_2SO_4$	0.8095	13.1104	11.0094

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ความชื้นสมดุลของลูกเดือยเปรียบเทียบกับความชื้นที่ได้จากการทำนาย โดยใช้แบบจำลองของ Halsey ที่อุณหภูมิ 25 และ 40 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ C°	สารละลายเกลือ	ความชื้นสัมพัทธ์สมดุล(ERH)	ความชื้นที่ได้จากการวัด(%ฐานแห้ง)	ความชื้นที่ได้จากการทำนาย(%ฐานแห้ง)
25	LiCl	0.1125	5.9469	5.7282
	CH_3COOK	0.2117	6.9060	6.6416
	$MgCl_2$	0.3183	7.7227	7.5786
	K_2CO_3	0.4318	8.0284	8.6669
	NaCl	0.7506	13.2762	13.8005
	$(NH_4)_2SO_4$	0.7996	17.2018	15.3722
40	LiCl	0.1127	6.5433	6.0491
	CH_3COOK	0.2234	6.5078	7.1191
	$MgCl_2$	0.3261	8.3198	8.0748
	K_2CO_3	0.43165	13.4275	14.6512
	NaCl	0.8095	19.2302	16.6303

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 ความชื้นสมดุลของเม็ดบัวเปรียบเทียบกับความชื้นที่ได้จากการทำนาย โดยใช้แบบจำลองของ Halsey ที่อุณหภูมิ 25 และ 40 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ C°	สารละลายเกลือ	ความชื้นสัมพัทธ์สมดุล(ERH)	ความชื้นที่ได้จากการวัด(%ฐานแห้ง)	ความชื้นที่ได้จากการทำนาย(%ฐานแห้ง)
25	LiCl	0.1125	5.8019	5.2420
	CH_3COOK	0.2117	6.3592	6.2284
	$MgCl_2$	0.3183	7.2214	7.2640
	K_2CO_3	0.4318	7.6511	8.4935
	NaCl	0.7506	14.9353	14.6061
	$(NH_4)_2SO_4$	0.7996	19.0876	16.5623
40	LiCl	0.1127	6.8716	5.9326
	CH_3COOK	0.2234	7.1814	7.1726
	$MgCl_2$	0.3261	7.5100	8.3068
	K_2CO_3	0.43165	15.5325	16.6329
	NaCl	0.8095	21.8062	19.2795

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 ความชื้นสมดุลของงาดำปรุงรสเปรียบเทียบกับความชื้นที่ได้จากการทำนาย โดยใช้แบบจำลองของ Halsey ที่อุณหภูมิ 25 และ 40 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ C°	สารละลายเกลือ	ความชื้นสัมพัทธ์สมดุล(ERH)	ความชื้นที่ได้จากการวัด(%ฐานแห้ง)	ความชื้นที่ได้จากการทำนาย(%ฐานแห้ง)
25	LiCl	0.1125	3.2790	2.4099
	CH_3COOK	0.2117	3.5712	3.0530
	$MgCl_2$	0.3183	3.8788	3.7702
	K_2CO_3	0.4318	2.6689	4.6723
	NaCl	0.7506	9.0631	9.8296
	$(NH_4)_2SO_4$	0.7996	14.2075	11.6795
40	LiCl	0.1127	3.5758	2.9133
	CH_3COOK	0.2234	3.6483	3.7799
	$MgCl_2$	0.3261	4.4552	4.6232
	K_2CO_3	0.4317	6.1366	5.6436
	NaCl	0.7534	9.1776	11.9843
	$(NH_4)_2SO_4$	0.8095	13.5108	14.6755

2. การคำนวณหาไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ธัญพืชผสมสำเร็จรูป

การคำนวณหาจุดต่างๆบนกราฟไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นทำโดยกำหนดค่าวอเตอร์แอกติวิตี คงที่จากนั้นหาความชื้นรวมของผลิตภัณฑ์ผสมโดยหาความชื้นของส่วนผสมต่างๆทั้งสี่ชนิดที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีนั้นด้วยแบบจำลองของวัตถุดิบแต่ละชนิด จากนั้นใช้ความชื้นของวัตถุดิบหาปริมาณน้ำในวัตถุดิบนั้นๆได้ เมื่อทราบปริมาณส่วนผสมโดยน้ำหนักแห้ง และหาความชื้นของผลิตภัณฑ์ผสมได้จากผลรวมของปริมาณน้ำในวัตถุดิบทั้งสี่ชนิดเมื่อทราบน้ำหนักแห้งของผลิตภัณฑ์ จากนั้นกำหนดค่าวอเตอร์แอกติวิตีเป็นหลายค่า และทำตามขั้นตอนดังที่กล่าวมาก็จะได้ค่าความชื้นที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างขั้นตอนการคำนวณ หาค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ธัญพืชผสมสำเร็จรูป ที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีเท่ากับ 0.3 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

- แทนค่า วอเตอร์แอกติวิตีเท่า (a_w) กับ 0.3 และอุณหภูมิ เท่ากับ 25 องศาเซลเซียสลงในแบบจำลองของ เม็ดมะม่วงหิมพานต์, ลูกเดือย, เม็ดบัวและงาดำปรุงรส จะได้ค่าความชื้น(%d.b.) ของวัตถุดิบนั้นๆ

- นำค่าความชื้นที่หาได้จากแบบจำลองคูณกับปริมาณน้ำหนักแห้งของวัตถุดิบทั้งสี่ จะได้ปริมาณน้ำ(g) ในวัตถุดิบนั้นๆ

- รวมค่าปริมาณน้ำของวัตถุดิบทุกชนิดเข้าด้วยกันได้เป็นปริมาณน้ำของผลิตภัณฑ์ธัญพืชผสมสำเร็จรูป

- หาค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ธัญพืชผสมสำเร็จรูป โดยนำค่าปริมาณน้ำของผลิตภัณฑ์ธัญพืชผสมสำเร็จรูปหารกับปริมาณโดยน้ำหนักแห้งของผลิตภัณฑ์

ตารางที่ ก.7 แสดงค่าต่างๆสำหรับหาค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ธัญพืชผสมสำเร็จรูป ที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตี เท่ากับ 0.3 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

องค์ประกอบ	ความชื้นที่ได้จากแบบจำลอง (%d.b.)	น้ำหนักแห้ง (g)	ปริมาณน้ำ (g)
เม็ดมะม่วงหิมพานต์	6.090	25	152.25
ลูกเดือย	7.384	25	184.60
เม็ดบัว	7.078	25	176.95
งาดำปรุงรส	3.630	25	90.75
รวม	-	100	604.55

ดังนั้นที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีเท่ากับ0.3 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ความชื้นของผลิตภัณฑ์ธัญพืชผสมสำเร็จรูป = 604.55 / 100 = 6.0455 (%d.b.)

กำหนดค่าวอเตอร์แอกติวิตีเป็น 0.1, , 0.5, 0.7และ 0.9 เพื่อหาค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ธัญพืชผสมสำเร็จรูปที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีแต่ละค่า ตามขั้นตอนการคำนวณ หาค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ธัญพืชผสมสำเร็จรูป ที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีเท่ากับ 0.3 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะได้ค่าระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นกับวอเตอร์แอกติวิตี ดังแสดงในตารางที่ ก. 8 เพื่อสร้างกราฟไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ธัญพืชผสมสำเร็จรูป

ดังตารางที่ ก. 8 แสดงค่าระหว่างความชื้นกับวอเตอร์แอกติวิตีที่ 25 องศาเซลเซียสของผลิตภัณฑ์ธัญพืชผสมสำเร็จรูปจาก การคำนวณ

วอเตอร์แอกติวิตี	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
ความชื้น (% d.b.)	4.461	6.045	7.860	10.849	19.835

การหาไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ธัญพืชผสมสำเร็จรูปที่อุณหภูมิ 40องศาเซลเซียสสามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน กับที่ 25 องศาเซลเซียส ค่าระหว่างความชื้นกับวอเตอร์แอกติวิตีที่อุณหภูมิ 40องศาเซลเซียส แสดงในตารางที่ ก. 9

ตารางที่ ก. 9 แสดงค่าระหว่างความชื้นกับวอเตอร์แอกติวิตีที่ 40 องศาเซลเซียสของผลิตภัณฑ์ธัญพืชผสมสำเร็จรูปจาก การคำนวณ

วอเตอร์แอกติวิตี	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
ความชื้น (% d.b.)	5.15	6.97	9.06	12.50	22.9

3. การคำนวณหาความชันเชิง (Linear slope) เส้นไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น

ความชันเชิงเส้นของไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น (Linear slope) ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ S สามารถหาได้จาก

$$Linear\ slope = \frac{M_2 - M_1}{ERH_2 - ERH_1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

M = ค่าความชื้น (% d.b.)

ERH = ค่าความชื้นสัมพันธ์สมดุล (%) ซึ่งหาได้จากการปรับค่าวอเตอร์แอกติวิตี ให้เป็นหน่วยเปอร์เซ็นต์

การกำหนดคู่ลำดับของข้อมูลเพื่อหาค่า S ของวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์ทำโดยกำหนดค่าวอเตอร์แอกติวิตีขึ้นมาสองค่า โดยค่าแรกให้เท่ากับค่าวอเตอร์แอกติวิตีเริ่มต้นของวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์นั้นเมื่อเปลี่ยนเป็นหน่วยเปอร์เซ็นต์ จะได้ค่า ERH_1 ส่วนค่าวอเตอร์แอกติวิตีตัวที่สองกำหนดเป็น0.6เมื่อเปลี่ยนเป็นหน่วยเปอร์เซ็นต์จะได้ค่า ERH_2 นำค่า วอเตอร์แอกติวิตีทั้งสองค่าแทนแบบจำลองของวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดเพื่อหาค่า M_1และ M_2 โดยค่าต่างๆแสดงดังตารางที่ ก. 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก. 10 แสดงค่าต่างๆเพื่อหาค่าความชันเชิงเส้นของไอโซเทอร์มแบบดูดความชื้น (Linear slope) ของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ต่างๆ

วัตถุดิบและผลิตภัณฑ์	ERH_1 (%)	ERH_2 (%)	M_1 (%d.b.)	M_2 (%d.b.)	ความชันเชิงเส้น (%d.b./%ERH)
เม็ดมะม่วงหิมพานต์	44.330	60.000	7.022	8.268	0.0795
ลูกเดือย	55.2	60.000	9.95	10.620	0.1396
เม็ดบัว	48.200	60.000	9.152	10.930	0.1528
งาดำปรุงรส	20.720	60.000	3.420	6.536	0.0950
ธัญพืชสำเร็จรูปผสม	45.300	60.000	7.399	9.130	0.1177
ธัญพืชสำเร็จรูปผสมชนิดแท่ง	54.06	60.000	10.468	10.600	0.0222

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (K) ของบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.1 แสดงค่า K ของบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ ในหน่วย ($gH^2O.m/m^2.day.mmHg$)

Film	$K*10^{-6}$ ($gH^2O.m/m^2.day.mmHg$)
Low-density polyethylene (LDPE)	20.2031
High- density polyethylene (HDPE)	2.0721
Cast polyethylene (CPP)	7.7704
Oriented polyethylene (OPP)	5.1803
Polyvinylidene Chloride	5.1803
Saponified Ethylene Vinyl Acetate Copolymer (EVOH)	28.4915
Polyester, Polyethylene Terephthalate (PET)	20.2031
Nylon (0.015 mm thick)	3470.784
Polyvinyl Chloride (PVC)	88.0647
Polyvinylidene chloride, polyvinyl chloride, copolymer	4.1442
Polystyrene	181.3096
Acrylonitrile Butadiene Styrene Copolymer (ABS)	103.6055
Acrylonitrile	12.4327
PVDC-coated cellophane 25 μm / polyethylene 40 μm	11.6556
PVDC-coated oriented Polystyrene 23 μm / polyethylene 40 μm	3.8852
PVDC-coated oriented nylon 18 μm / polyethylene 40 μm	7.7704
PVDC-coated polyester 15 μm / polyethylene 40 μm	5.1803
Moisture-proof cellophane / aluminum foil 70 μm / Polystyrene 40 μm	6.4753
Polyester / aluminum foil 7 μm / Polystyrene 40 μm	6.4753
Oriented polyethylene / ethylene-vinyl alcohol copolymer / polyethylene 60 μm	3.8852
Oriented vinylon / polyethylene 80 μm	3.2377
Aluminum metallized polyethylene terephthalate / polyethylene	0.6475

ที่มา : กนกวรรณ, กฤษชัยและณัฏฐาพร, 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

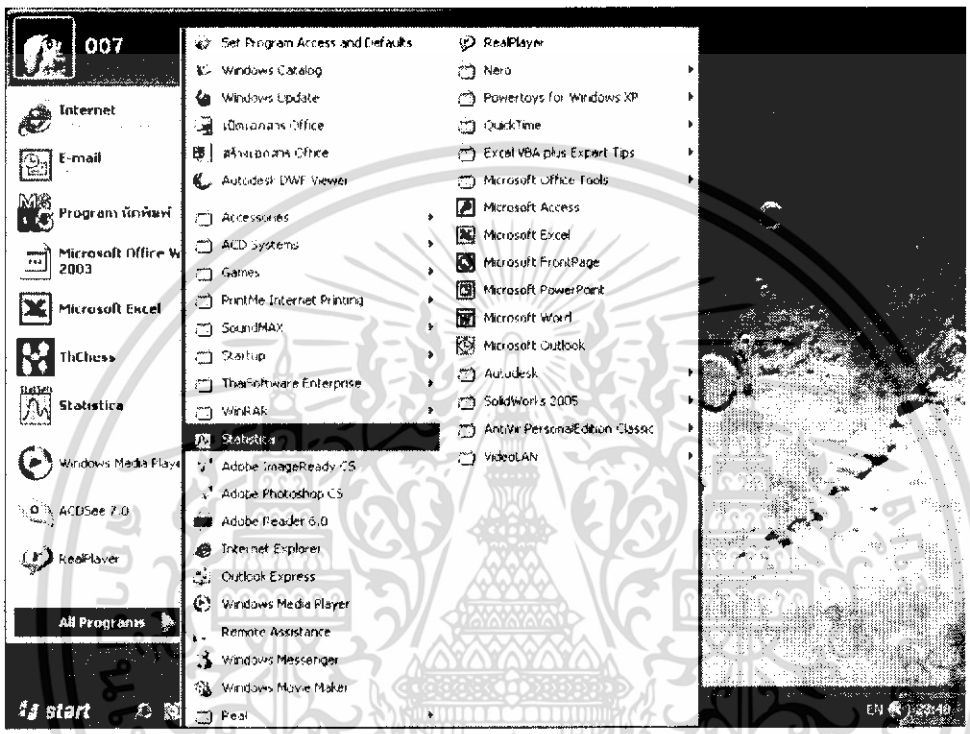
ขั้นตอนการใช้โปรแกรม STATISTICA A/W 5.0 เพื่อวิเคราะห์แบบจำลองหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

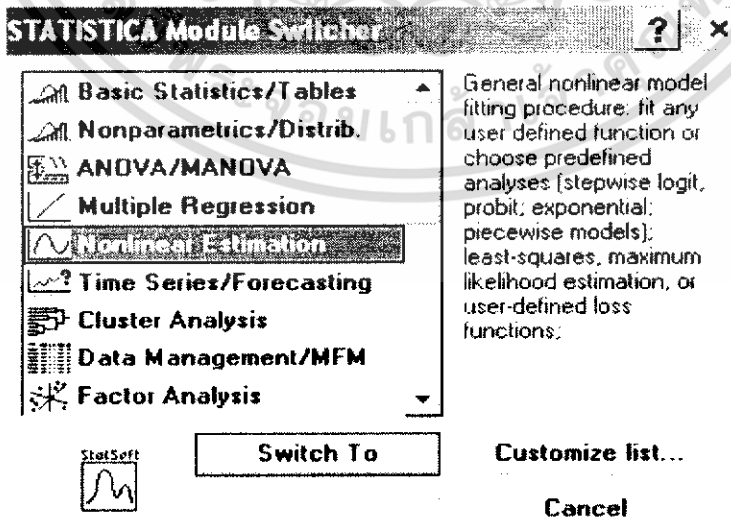
ขั้นตอนแสดงการใช้โปรแกรม STATISTICA A/W 5.0วิเคราะห์แบบจำลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

1.เปิดโปรแกรม STATISTICA A/W 5.0 จากหน้าจอคอมพิวเตอร์ใช้เมาส์คลิกไปที่ Start

⟹All Program ⟹ STATISTICA



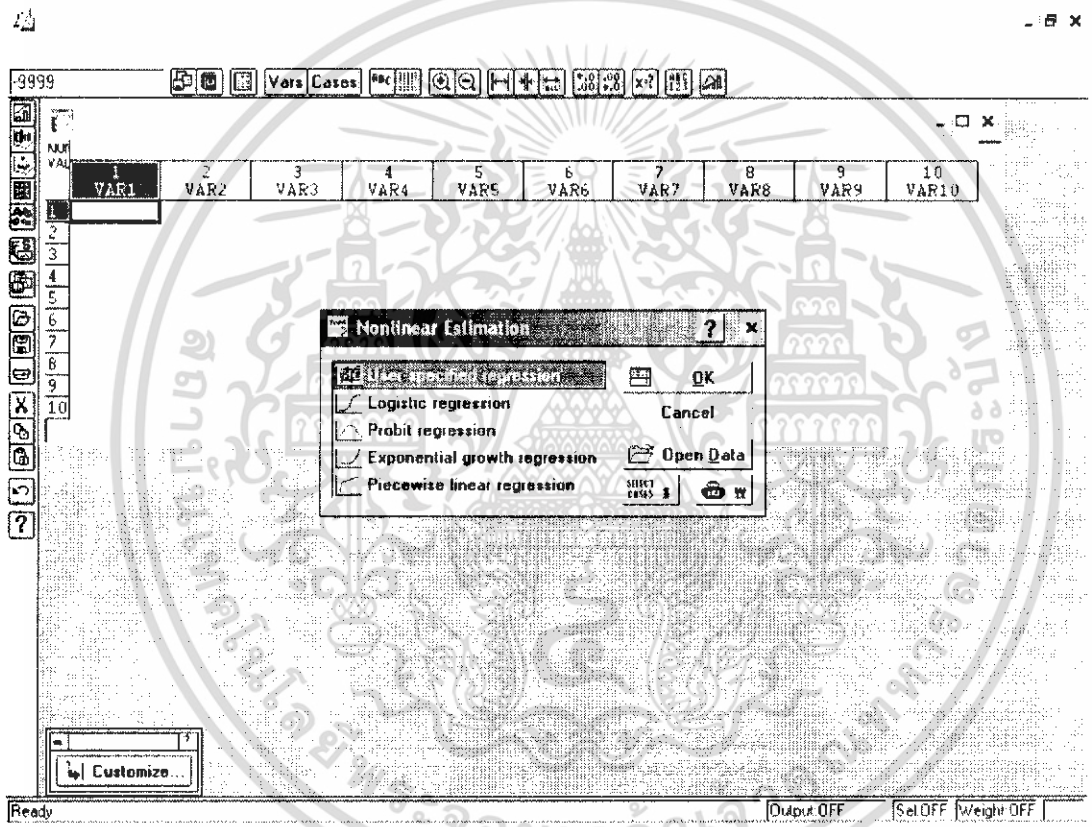
2. จากแถบเมนู STATISTICA Module Switcher คลิกไปที่Nonlinear Estimation Switch To



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

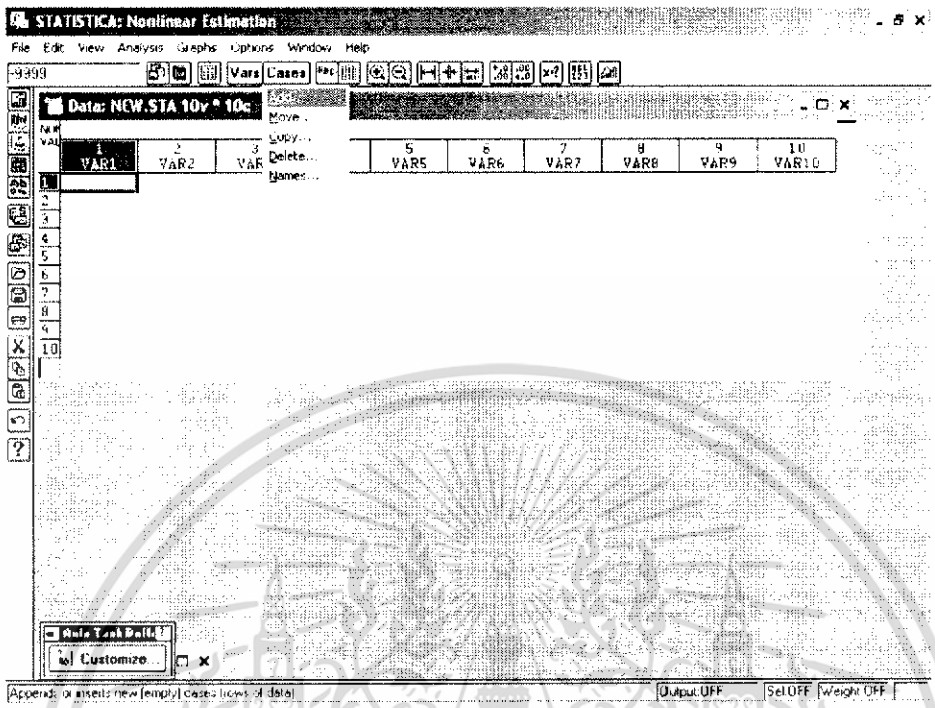
3. จากแถบเมนู STATISTICA: Nonlinear Estimation จะปรากฏหน้าต่าง

Data: New .STA10v*10c หมายความว่า ในช่องตารางจากซ้ายไปขวา var1-var10 คือจำนวนตัวแปร และจากบนลงล่าง คือจำนวน Case1- Case10 ซึ่งเห็นว่าจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีจำนวนตัวแปรทั้งหมด 3 ตังแปร คือ วอเตอร์แอกติวิตี ความชื้น และอุณหภูมิ และจำนวน Case ทั้งหมด 12 Case เนื่องจาก 6 Case แรกทำการทดลองที่ 25 องศาเซลเซียส ที่วอเตอร์แอกติวิตี และค่าความชื้น 6ระดับ และ 6 Case หลังทำการทดลองที่ 40 องศาเซลเซียส ที่วอเตอร์แอกติวิตี และค่าความชื้นอีก 6 ระดับ จึงต้องเพิ่มจำนวน Case เข้าไปอีก 2 Case

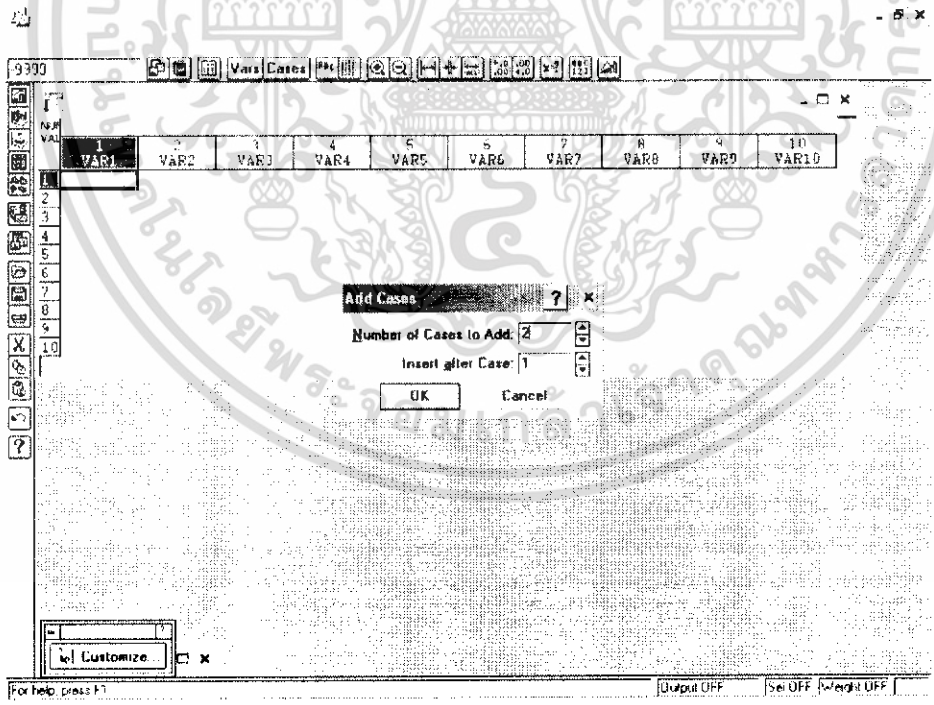


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. คลิกไปที่ ⟹ Cases ⟹ Add.....

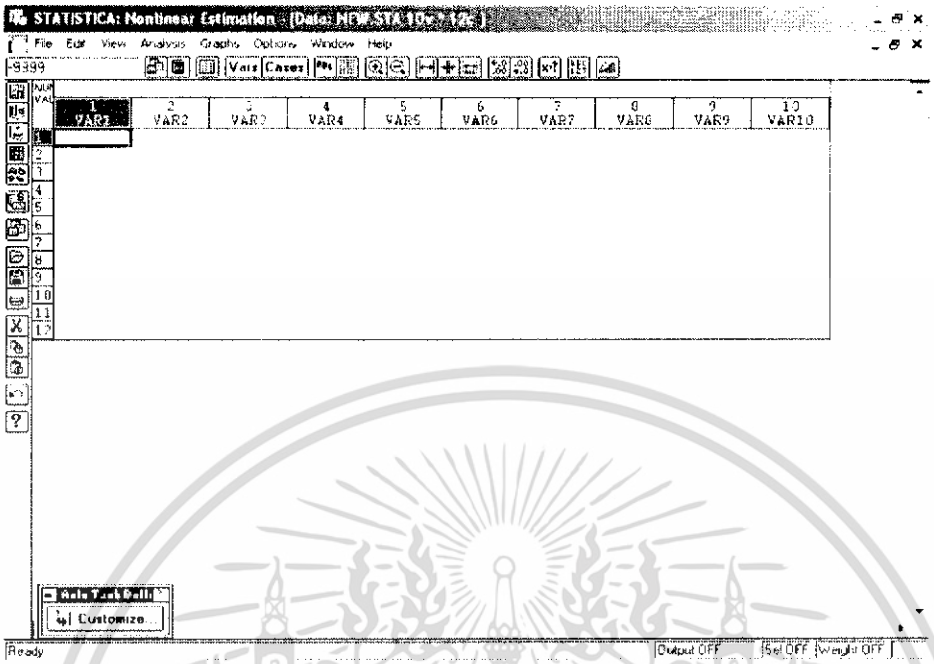


5. ใน Number of cases to add ใส่ค่าเท่ากับ 2 คลิกไป ⟹ OK

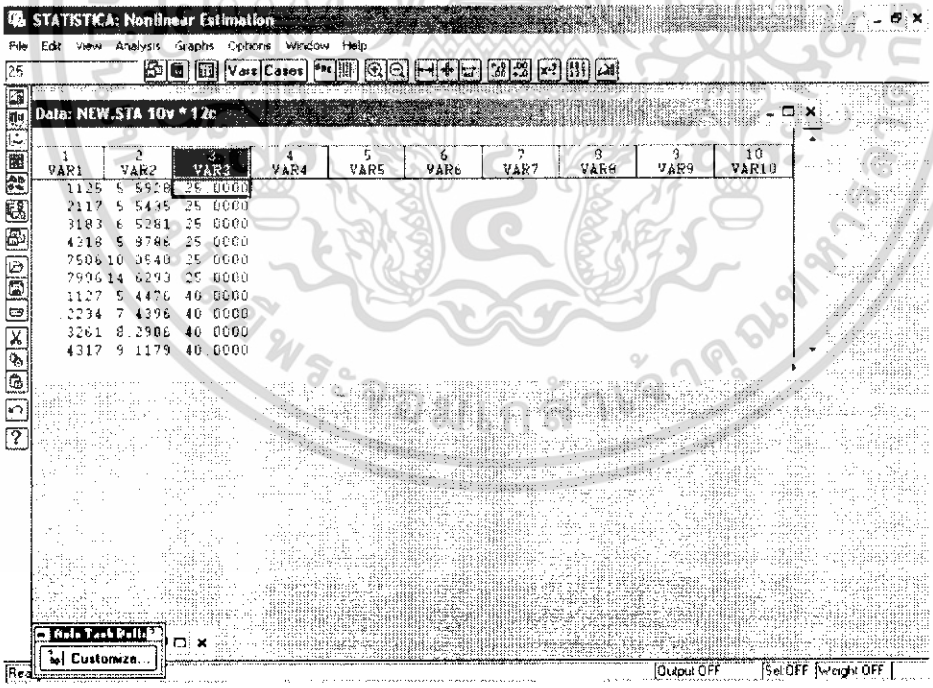


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.จะสังเกตเห็นว่า จะมีจำนวน Cases เพิ่มขึ้นมาเป็น 12 Cases

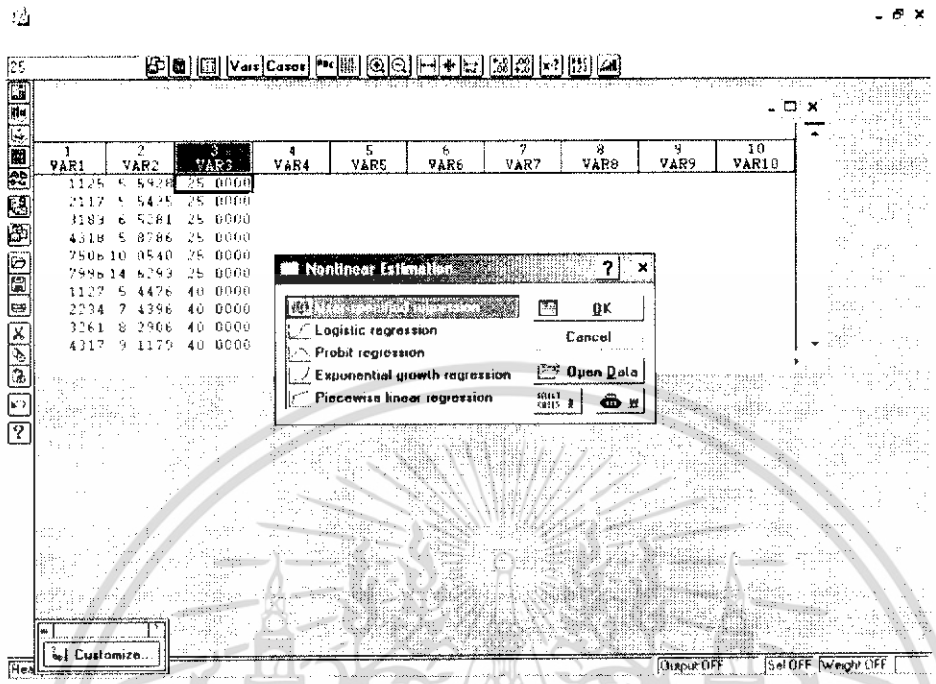


7. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองใส่ลงในตาราง ในช่อง VAR 1 คือค่าวอเตอร์แอกติวิตี VAR 2 คือค่าความชื้น (%d.b.) และ VAR 3 คือค่า อุณหภูมิ

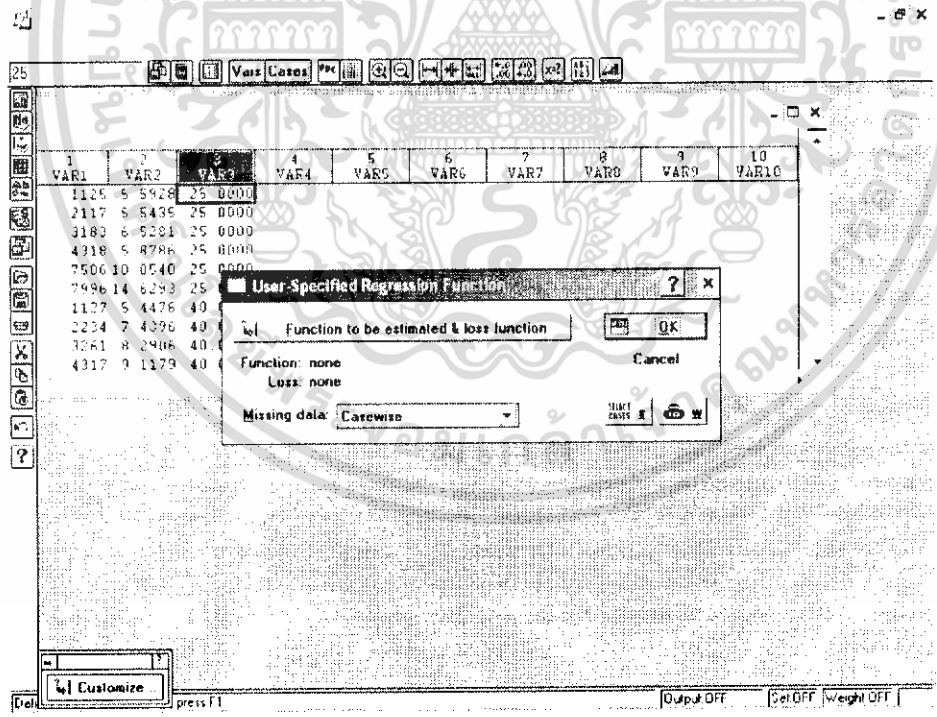


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. จากแถบเมนู Nonlinear Estimation คลิกเมาส์ไปที่ User-Specified Regression คลิก⟹ OK

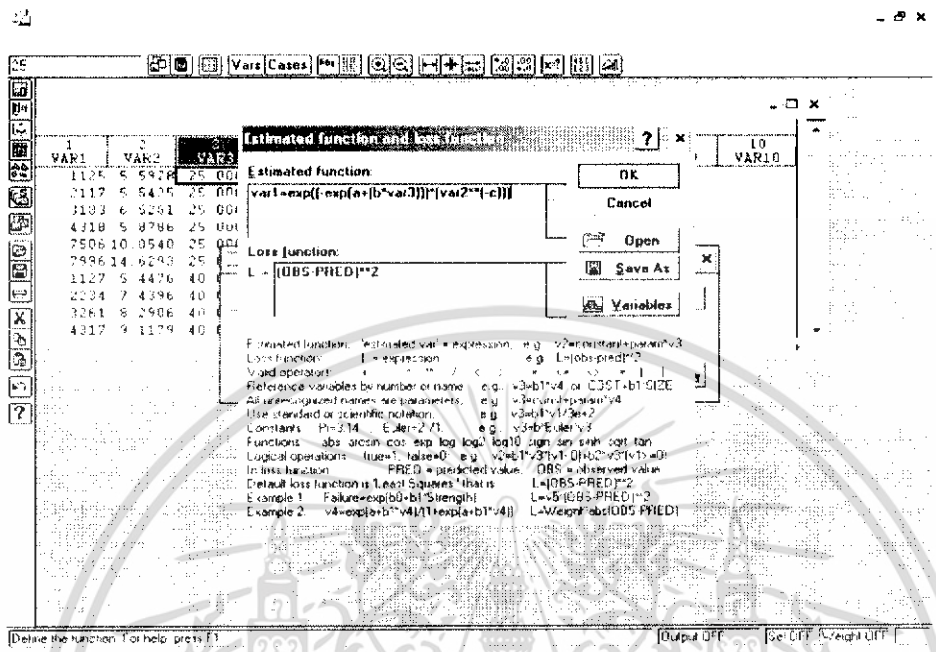


9. บนแถบเมนู User-Specified Regression Function คลิก⟹ OK เพื่อทำการใส่สมการ

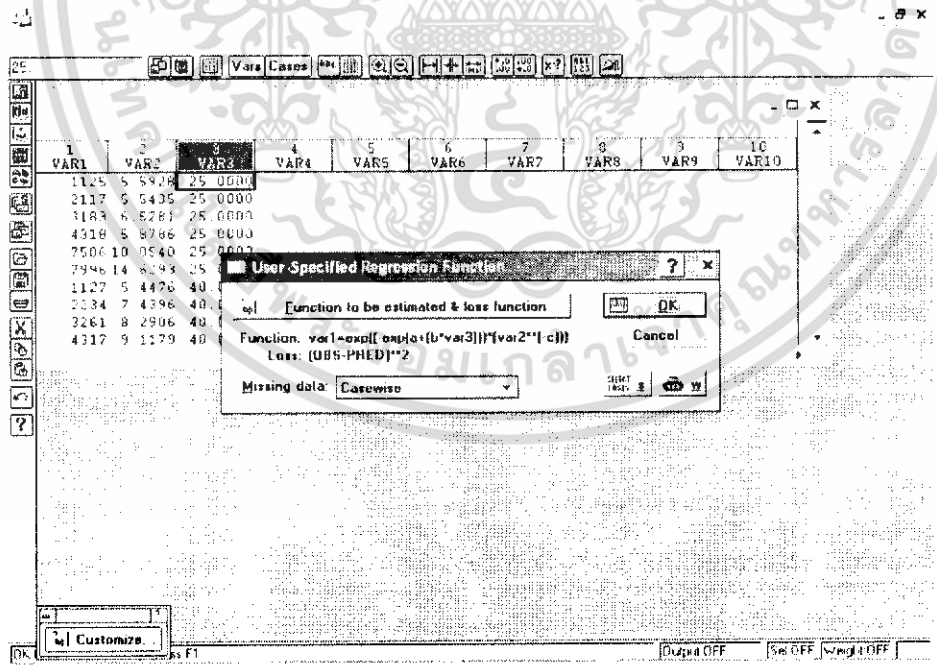


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. บนแถบเมนู Estimated function and loss function ในช่อง Estimated function ใส่สมาการลงแล้ว คลิกปุ่ม ⟹ OK

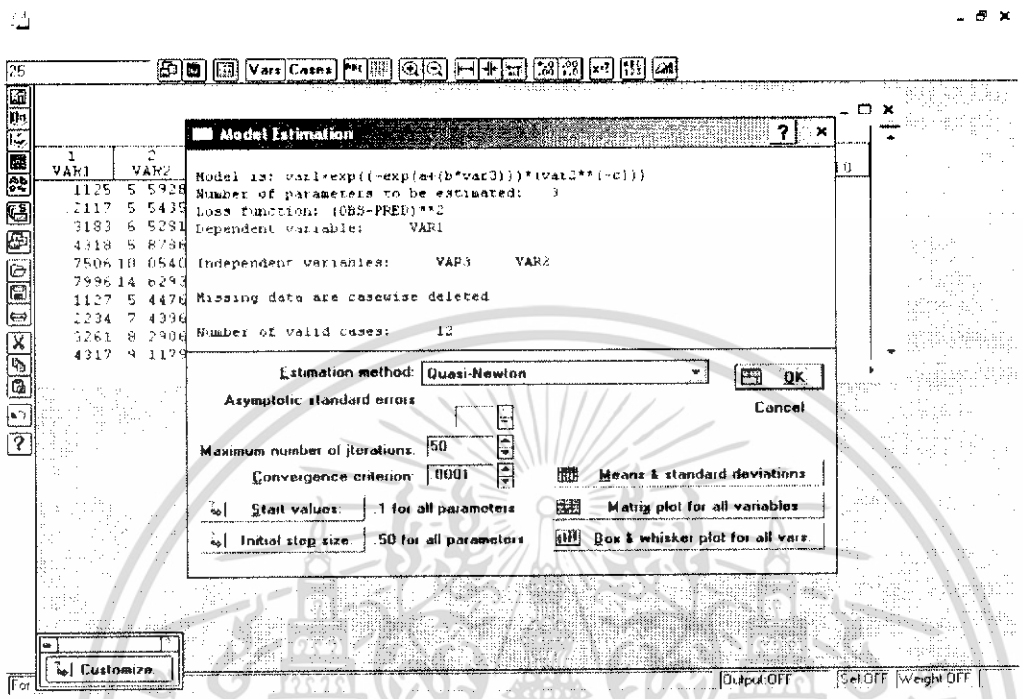


11. บนแถบเมนู User-Specified Regression Function จะปรากฏขึ้นอีกครั้ง แสดงทำการเพิ่มสมา-การเข้าไปแล้ว ต่อไปคลิกปุ่ม ⟹ OK

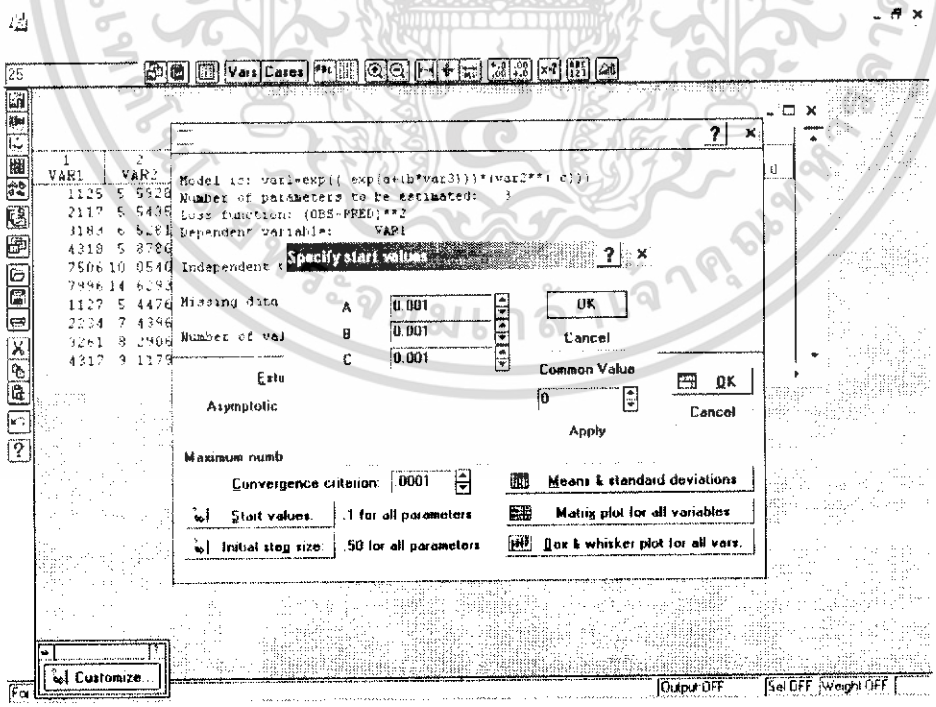


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. จากแถบเมนู Model Estimation ที่ช่อง Estimation method เลือกเป็นแบบ Quasi-Newton จากนั้นคลิกไปที่ Start values

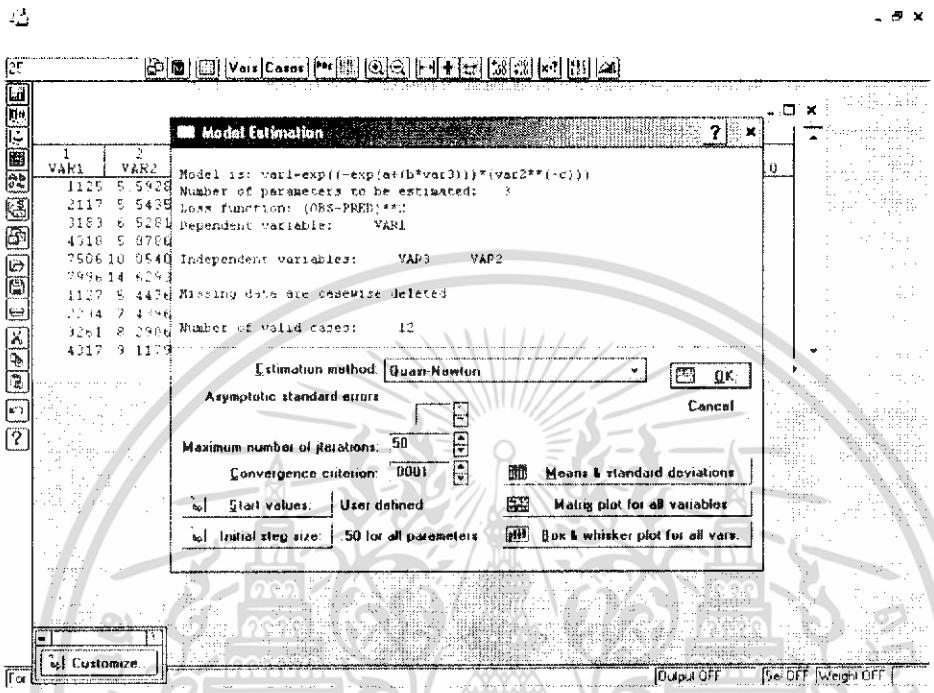


13. จะปรากฏแถบเมนู Specify Start Values ที่ช่อง A, BและC ใส่ค่า 0.001 ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 0 แต่ไม่ใช่ ศูนย์ แล้วคลิกไปที่ ⟹ OK

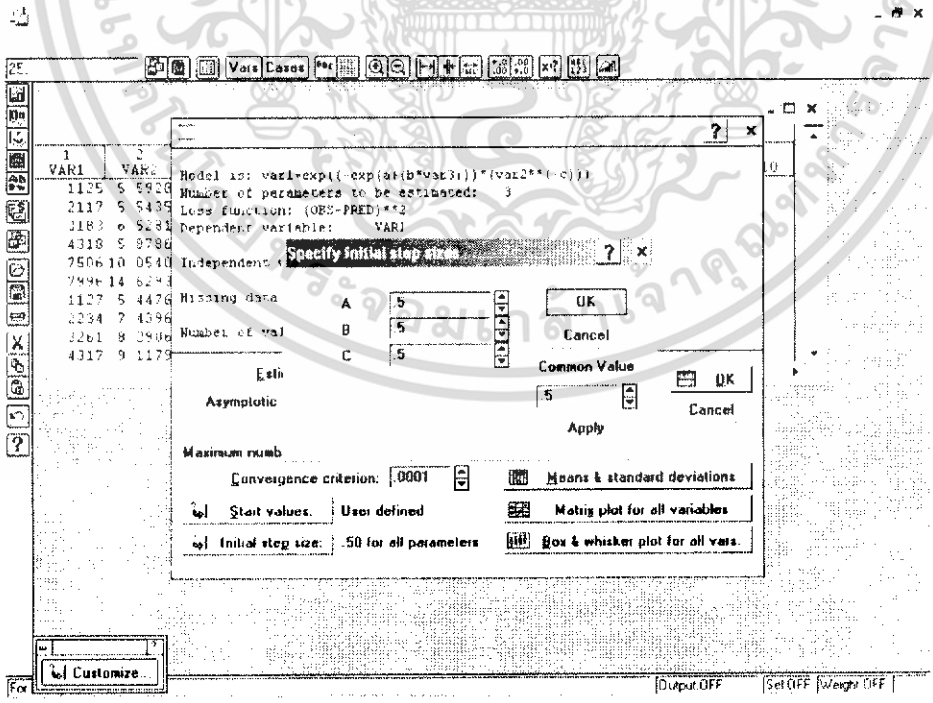


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. จะปรากฏแถบเมนู Model Estimation ขึ้นมาอีกครั้ง จะเห็นว่าที่ Start values: จะเป็น User defined คลิกไปที่ ⟹ Initial Step Size:

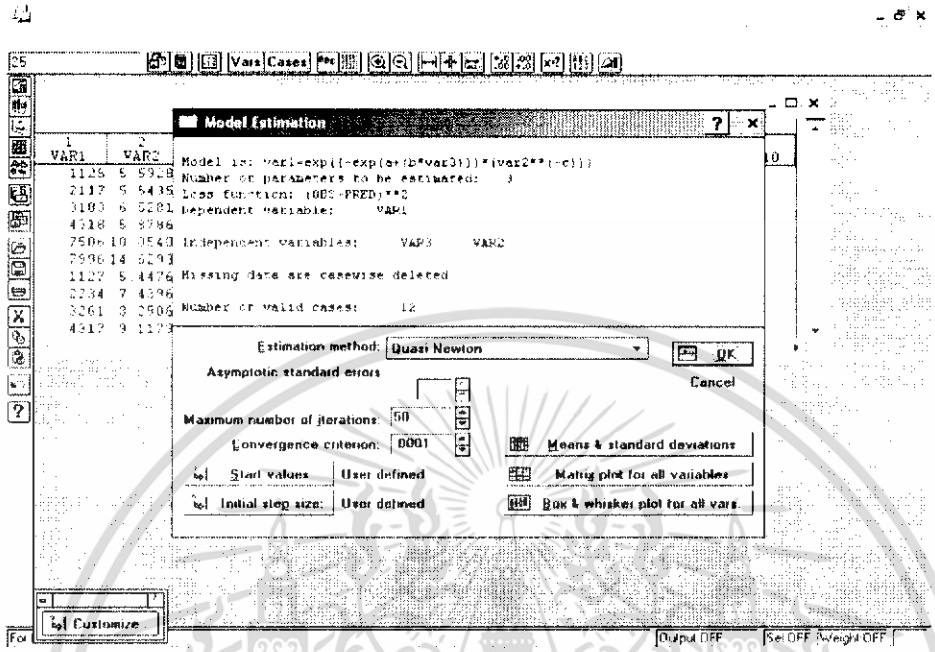


15. หน้าต่าง Specify Initial Step Size: ที่ช่อง A, B และC ใส่ค่า 0.5 แล้วคลิกไปที่ ⟹ OK

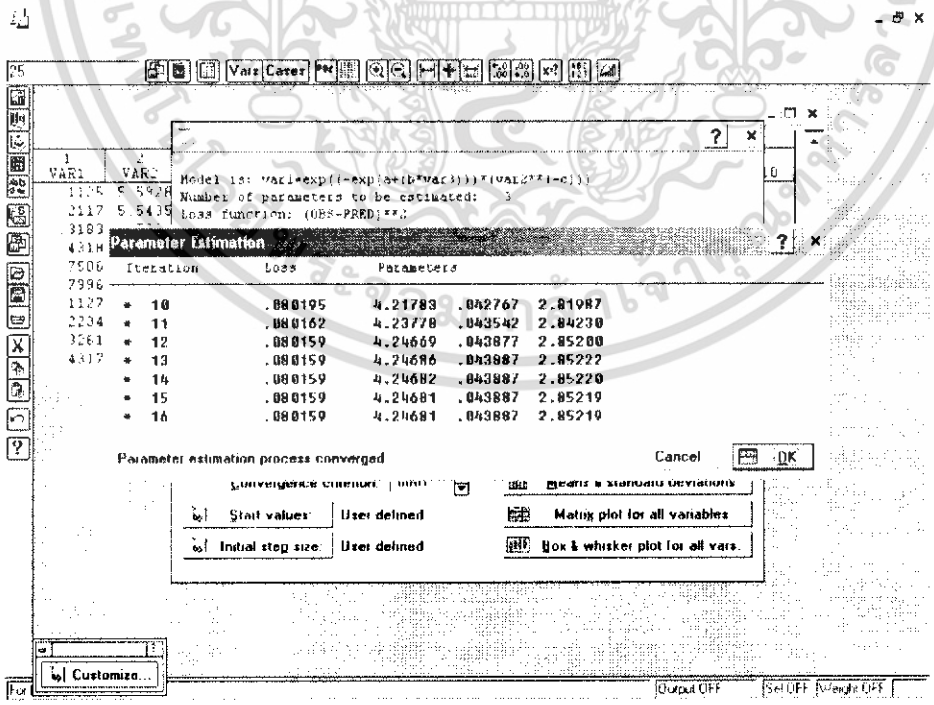


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. จะปรากฏแถบเมนู Model Estimation ขึ้นมาอีกครั้ง จะเห็นว่าที่ Initial Step Size: จะเป็น User defined จากนั้นคลิกไปที่ ⟹ OK

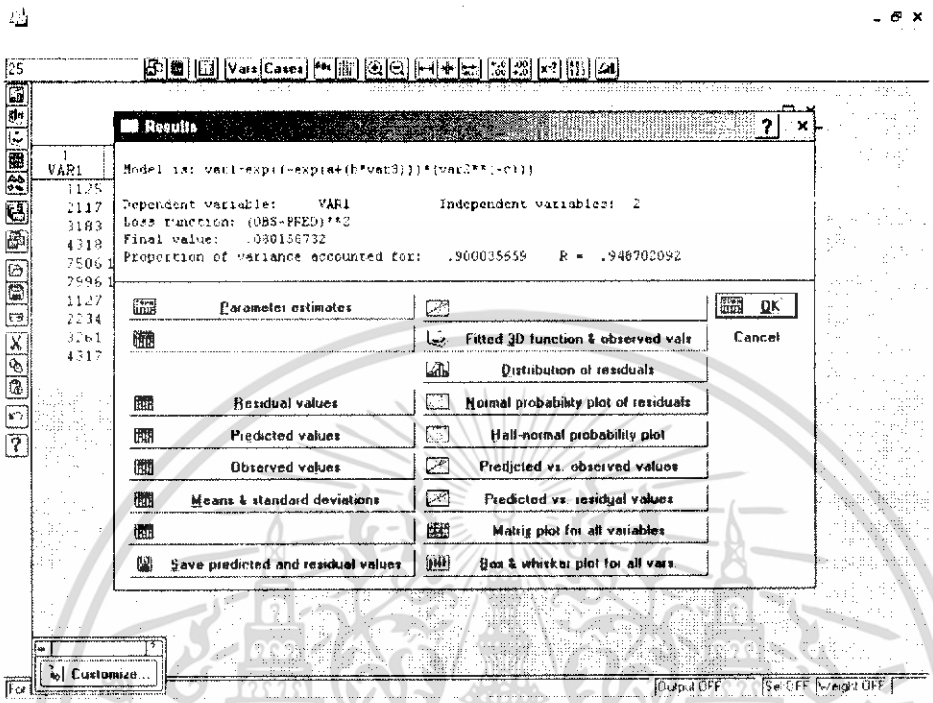


17. บนหน้าต่าง Parameter Estimation จะแสดงผลของการ Run ของโปรแกรมจากนั้นคลิกไปที่ ⟹ OK

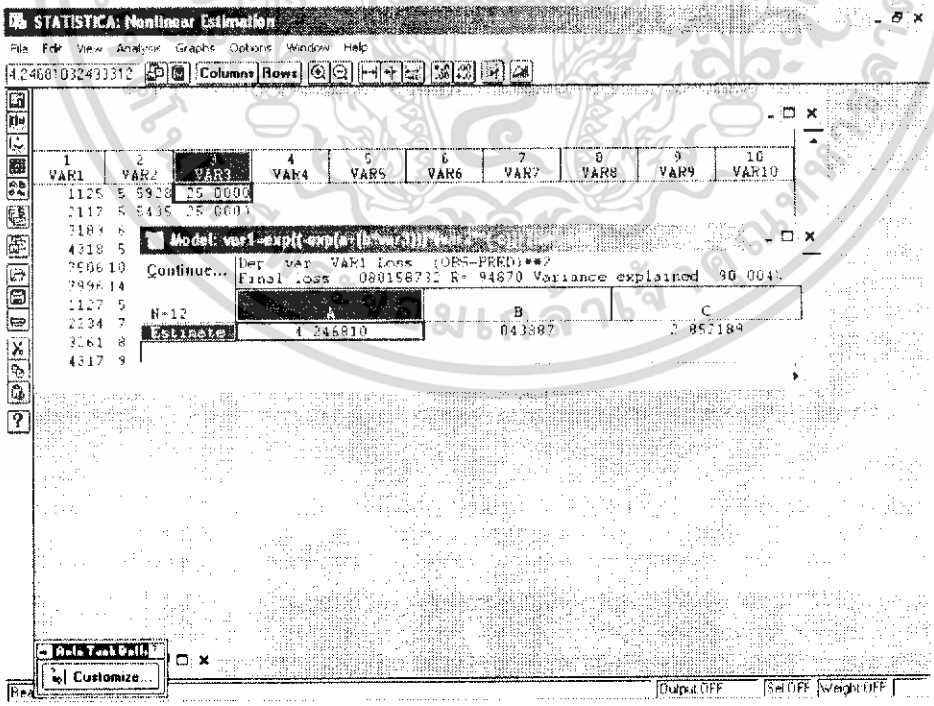


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18. จะปรากฏแถบเมนู Results เพื่อแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ ในช่อง Parameter estimation, Residues values, Predicted values, Observed values และMeans and Standard Deviations

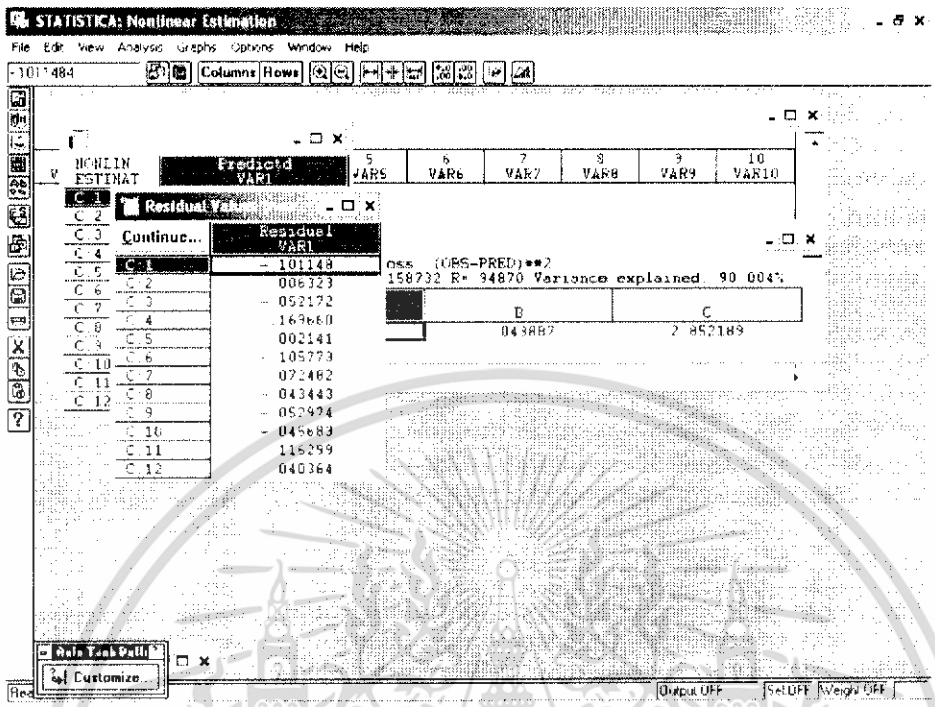


19. เมื่อคลิกไปที่ ⟹ Parameter estimation จะปรากฏค่า A, B, C และค่า Variance ของสมาการเมื่อต้องการดูค่าอื่น ให้คลิกไปที่ ⟹ Continue

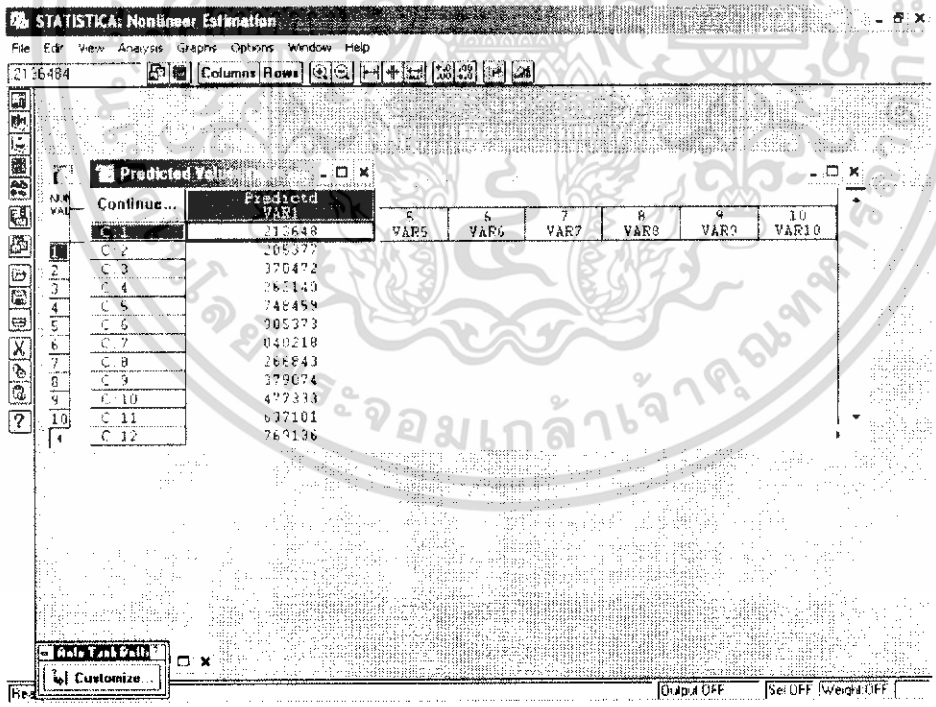


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20. เมื่อคลิกไปที่ ⟹ Residues values จะแสดงค่า Residues ของตัวแปรตาม

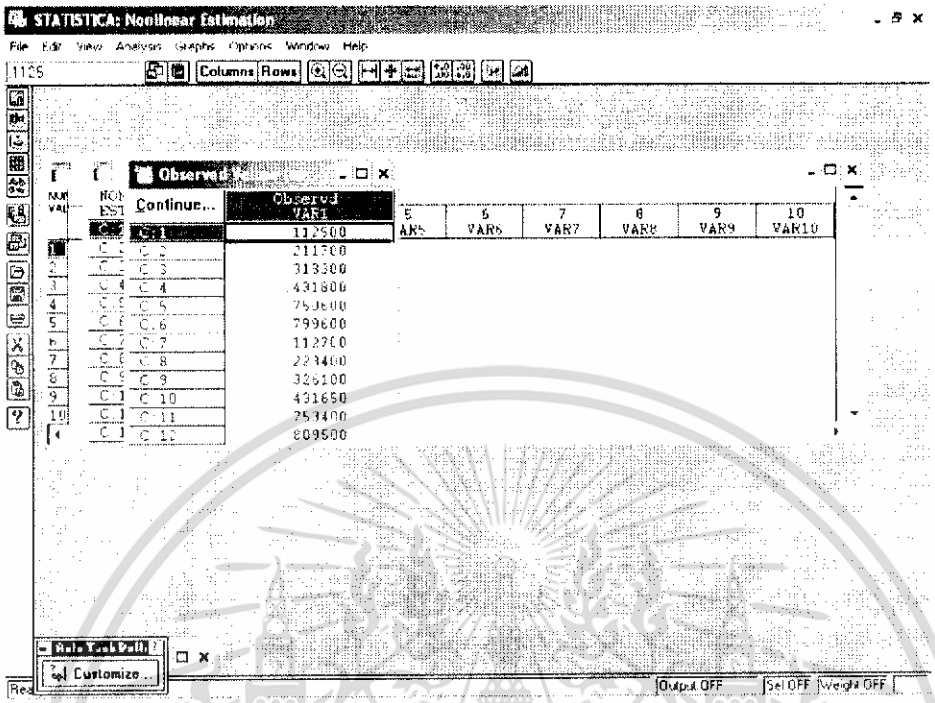


21. เมื่อคลิกไปที่ ⟹ Predicted values จะแสดงค่า Predicted ที่ได้จากการคำนวณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

22. เมื่อคลิกไปที่ $\Sigma \Longrightarrow$ Observed values จะแสดงค่า Observed ที่ได้จากการคำนวณ



23. เมื่อคลิกไปที่ $\Sigma \Longrightarrow$ Means and Standard Deviations จะแสดงค่า mean, standard deviation, minimum และค่า maximum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

1. ชื่อ-นามสกุล	นายณัฐพล แสนยาเจริญกุล
วัน เดือน ปีเกิด	6 สิงหาคม 2525
ที่อยู่	547 หมู่ 16 ต.คลองลาน อ.คลองลาน จ.กำแพงเพชร
	รหัสไปรษณีย์ 62180 โทร 014954798
ประวัติการศึกษา	2545 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิยาเขตพระนครเหนือ
	สาขา เครื่องจักรกลอัตโนมัติ (COMPUTER
	NUMERLICAL CONTROL)
	2548 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
	ลาดกระบัง สาขาวิศวกรรมอาหาร
2. ชื่อ-นามสกุล	นายสุรเดช สองห้อง
วัน เดือน ปีเกิด	18 ธันวาคม 2525
ที่อยู่	81 หมู่ 2 ต.คลองถนน เขตสายไหม จ.กรุงเทพมหานคร
	รหัสไปรษณีย์ 10220 โทร 058334362
ประวัติการศึกษา	2545 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิยาเขตพระนครเหนือ
	สาขา เทคนิคอุตสาหกรรม (INDUSTRIAL
	TECHNOLOYE)
	2548 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
	ลาดกระบัง สาขาวิศวกรรมอาหาร
3. ชื่อ-นามสกุล	นายอรุณทร ชูเขียว
วัน เดือน ปีเกิด	21 พฤษภาคม 2525
ที่อยู่	44 หมู่ 1 ต. โรงหีบ อ.บางคนที จ. สมุทรสงคราม
	รหัสไปรษณีย์ 75120 โทร 034768162
ประวัติการศึกษา	2544 วิทยาลัยเทคนิค สมุทรสงคราม
	สาขา ช่างยนต์
	2548 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
	ลาดกระบัง สาขาวิศวกรรมอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้