สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การหาค่าวอเตอร์แอกทิวิทีและซอร์ปชั่นไอโซเทอร์มของมะขามหวาน พันธุ์ศรีชมภู สีทอง และพันธุ์ขันตี

Water Activity and Sorption Isotherm of Srichumpu, Seethong and Khuntee sweet tamarinds

T 036728

โดย

นายจตุพล ยางสูง

นายสุนันท์ สมวัน

นางสาวดวงใจ ลอสิงห์

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์กันต์กนิษฐ์ ธนศิริวัฒนา

ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอาหาร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....36728
วัน, เดือน, ปี.....28 ส.ค. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2542

ภาควิชา วิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การหาค่าวอเตอร์แอกทิวิทิ และชอร์ปชั่นไอโซเทอร์มของ มะขามหวานพันธุ์ศรีชมภู สีทอง และพันธุ์ขัน

ผู้จัดทำ

1. นายจตุพล ยางสูง
2. นายสุนันท์ สมวัน
3. นางสาวดวงใจ ลอห์สิงห์

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์กันต์กนิษฐ์ ธนศิริวัฒนา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ดร. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าวอเตอร์แอกทิวิทีและไอโซเทอร์ม ของมะขามหวานพันธุ์ศรีชมภู สีทอง และพันธุ์ขันตี

นายจตุพล ยางสูง
นายสุนันท์ สมวัน
นางสาวดวงใจ ลอสิงห์

อาจารย์กันต์กนิษฐ์ ธนศิริวัฒนา อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ปีการศึกษา 2542

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและทดลองหาซอร์ปชั่นไอโซเทอร์มของมะขามหวาน 3 พันธุ์ คือ พันธุ์ศรีชมภู สีทอง และพันธุ์ขันตี โดยวิธี gravimetric method ที่อุณหภูมิ 36, 45 และ 60 องศาเซลเซียส ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 30 – 90 %

พบว่ามะขามพันธุ์สีทองจะมีการดูดซึมน้ำสูงที่สุดที่ความชื้นสัมพัทธ์เดียวกันในทุกอุณหภูมิ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าการดูดซึมน้ำของมะขามทั้ง 3 พันธุ์จะมีค่าลดลง

นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของซอร์ปชั่นไอโซเทอร์มของมะขาม พบว่าแบบจำลองของ Henderson สามารถใช้ในการทำนายผลการทดลองข้างต้นได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Water Activity and Sorption Isotherm of

Srichompu, Seethong and Khuntee Sweet Tamarinds

Mr. Jatupon Yangsoong

Mr. Sunan Somwan

Miss Duangjai Lorsingha

Miss Kankanit Tanasiriwatana Advisor

Dr. Pimpen Pornchaloempong Co-advisor

1999

Abstract

This research aims to study sorption isotherm of three varieties of sweet tamarinds, namely Srichompu, Seethong and Khuntee. By using a gravimetric method at 36, 45 and 60 °C over a range of relative humidity from 30 – 90 %.

The sorption isotherm of Seethong was the highest for all of temperature and relative humidity. Furthermore, the higher temperature, the lower sorption isotherm.

In addition, the experimental is extended to study the mathematical model of sorption isotherm of sweet tamarinds. It was found that the Henderson model can well predict above the sorption isotherm results.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	ก
สารบัญตาราง	ค
สารบัญรูปภาพ	ง
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 มะขามหวาน	3
2.2 ทฤษฎีความชื้น	8
2.3 ทฤษฎีคุณสมบัติของอากาศ – น้ำ	9
2.4 วอเตอร์แอกทิวิที (water activity) ในอาหาร	11
2.5 ไอโซเทอร์ม	15
2.6 วิธีการวัดค่า วอเตอร์แอกทิวิที และไอโซเทอร์ม	21
2.7 สมการที่ใช้ในการทำนาย วอเตอร์แอกทิวิที	26
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
บทที่ 3 การทดลอง	29
3.1 การเตรียมตัวอย่างมะขาม (พันธุ์ศรีชมภู สีทอง และพันธุ์ขันตี)	29
3.2 การเตรียมสารละลายเกลืออิ่มตัว	29
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	29
3.4 วิธีการทดลอง	31
3.5 การหาไอโซเทอร์มของมะขาม	34
บทที่4 ผลการทดลองและวิจารณ์	35
4.1 ผลการทดลองหาปริมาณของแข็งของมะขาม	35
4.2 การหาค่า Total Soluble Solid ของมะขาม	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 ค่าวอเตอร์แอกทิวิทิของมะขามที่อุณหภูมิต่าง ๆ 35
4.4 การทำนายไอโซเทอร์มของมะขามโดยใช้แบบจำลอง
ทางคณิตศาสตร์ของ Henderson 38
4.5 การหาค่าพารามิเตอร์ a และ b ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson 41
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 45
5.1 สรุปผล 45
5.2 ข้อแนะนำ 45
เอกสารอ้างอิง 46
ภาคผนวก 48
ภาคผนวก ก. 49
ภาคผนวก ข. 52
ภาคผนวก ค. 63
กิตติกรรมประกาศ 65
ประวัติผู้เขียน 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกมะขามของไทย	7
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าวอเตอร์แอกทิวิทีของอาหารบางประเภท	12
ตารางที่ 3.1 แสดงค่า %RH ของสารละลายเกลืออิ่มตัว 5 ชนิดที่อุณหภูมิต่าง ๆ	34
ตารางที่ 4.1 แสดง Total Soluble Solid ที่วัดได้	35
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเทียบกับแบบจำลองของ Henderson	37
ตารางที่ 4.3 แสดงการคำนวณค่าพารามิเตอร์ a และ b ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson	42
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการแก้สมการของ Henderson	43
ตารางที่ 4.5 ค่าคลาดเคลื่อนของการทดลองเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากสมการของ Henderson	44
ตารางที่ ข.1 ข้อมูลจากการทดลองหาปริมาณของแข็งของมะขาม	53
ตารางที่ ข.2 การคำนวณหาค่าความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิ 36 องศาเซลเซียส	54
ตารางที่ ข.3 การคำนวณหาค่าความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส	55
ตารางที่ ข.4 การคำนวณหาค่าความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	56
ตารางที่ ข.5 การคำนวณหาค่าวอเตอร์แอกทิวิทีของมะขามที่ 36 องศาเซลเซียส	57
ตารางที่ ข.6 การคำนวณหาค่าวอเตอร์แอกทิวิทีของมะขามที่ 45 องศาเซลเซียส	58
ตารางที่ ข.7 การคำนวณหาค่าวอเตอร์แอกทิวิทีของมะขามที่ 60 องศาเซลเซียส	59
ตารางที่ ข.8 เปรียบเทียบค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการของ Henderson ของพันธุ์ศรีชมภู	60
ตารางที่ ข.9 เปรียบเทียบค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการของ Henderrson ของพันธุ์สีทอง	61
ตารางที่ ข.10 เปรียบเทียบค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการของ Henderson ของพันธุ์ขันตี	62
ตารางที่ ค.1 สารละลายเกลืออิ่มตัวที่ใช้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงการแลกเปลี่ยนความชื้นของผลิตภัณฑ์กับอากาศ	11
รูปที่ 2.2 แสดงอิทธิพลของวอเตอร์แอกทิวิทีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ในอาหาร	13
รูปที่ 2.3 แสดงการสูญเสียความกรอบของอาหารที่ค่าวอเตอร์แอกทิวิที ต่าง ๆ กัน	14
รูปที่ 2.4 แสดงซอร์ปชันไอโซเทอร์มของอาหารโดยทั่วไปที่มีความชื้นสูง	15
รูปที่ 2.5 แสดงซอร์ปชันไอโซเทอร์มของอาหารบางชนิดที่มีความชื้นต่ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	16
รูปที่ 2.6 แสดงซอร์ปชันไอโซเทอร์มที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน	17
รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นน้ำในแต่ละโซน	18
รูปที่ 2.8 แสดงฮีสเทอเรซีสของซอร์ปชั่นไอโซเทอร์ม	19
รูปที่ 2.9 แสดงแผนภาพที่ใช้เทคนิคความดันไอ	22
รูปที่ 3.1 แสดงการแขวนมะขามเพื่อใช้ในการทดลอง	33
รูปที่ 3.2 แสดงการทดลองหาค่าวอเตอร์แอกทิวิที	33
รูปที่ 4.1 ค่าวอเตอร์แอกทิวิทีของมะขามพันธุ์ศรีชมภูที่อุณหภูมิ 36 องศาเซลเซียส	36
รูปที่ 4.2 ค่าวอเตอร์แอกทิวิทีของมะขามพันธุ์สีทองที่อุณหภูมิ 36 องศาเซลเซียส	36
รูปที่ 4.3 ค่าวอเตอร์แอกทิวิทีของมะขามพันธุ์ขันตีที่อุณหภูมิ 36 องศาเซลเซียส	37
รูปที่ 4.4 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับไอโซเทอร์มโดยใช้แบบจำลองของ Henderson กับมะขามพันธุ์ศรีชมภู	38
รูปที่ 4.5 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับไอโซเทอร์มโดยใช้แบบจำลองของ Henderson กับมะขามพันธุ์สีทอง	38
รูปที่ 4.6 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับไอโซเทอร์มโดยใช้แบบจำลองของ Henderson กับมะขามพันธุ์ขันตี	39
รูปที่ 4.7 ไอโซเทอร์มของมะขามที่อุณหภูมิ 36 องศาเซลเซียสโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson	40
รูปที่ 4.8 ไอโซเทอร์มของมะขามที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของ Henderson	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปภาพ หน้า

รูปที่ 4.9 ไอโซเทอร์มของมะขามที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของ Henderson 41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

มะขาม (Tamarind) เป็นไม้ยืนต้นที่มีความสำคัญในเขตร้อน ซึ่งมีอยู่สองประเภทคือ มะขามกลุ่มมะขามหวาน และมะขามกลุ่มมะขามเปรี้ยว เนื้อมะขามอุดมไปด้วยวิตามิน ซึ่งเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อร่างกาย นอกจากนี้ยังมีสรรพคุณป้องกันโรคลักปิดลักเปิด (antiscorbutic) เป็นยาระบาย (laxative) ช่วยย่อยอาหาร (digestive) ขับลม (carminative) เป็นยาสมาน (astringent) และต่อต้านพิษ (antiseptic actions) เนื้อมะขามถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารหลายชนิด เช่น ใช้เป็นส่วนผสมของลูกกวาด ไอศครีม การทำมะขามกวน เป็นต้น [1]

จากการสำรวจเกษตรกรที่ทำไร่มะขามในเขตอำเภอชนแดน อำเภอหนองไผ่ และอำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์ จำนวน 29 ไร่ พบว่าเกษตรกรประสบปัญหาที่คล้าย ๆ กันคือ ปัญหาการกลายพันธุ์ของมะขาม การแตกหัก การเกิดรา มอดและปัญหาเนื้อมะขามแห้ง ซึ่งเป็นผลมาจากการเก็บมะขามไว้ในสภาพที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้รายได้ของเกษตรกรลดลง เนื่องจากไม่สามารถนำมะขามเหล่านั้นออกจำหน่ายได้

ตลาดส่งออกของไทยส่วนใหญ่อยู่ในเอเชียและตะวันออกกลาง สำหรับประเทศในแถบยุโรปนั้นยังไม่ค่อยเป็นที่รู้จักมากนัก เนื่องจากประเทศเหล่านั้นเข้มงวดเรื่องแมลงที่ติดไปกับผลไม้ ประกอบกับมะขามหวานซึ่งขายทั้งเปลือกยังเป็นเชื้อราได้ง่าย เนื่องจากการปฏิบัติก่อนและหลังการเก็บเกี่ยวยังไม่ได้มาตรฐาน [2]

ค่าวอเตอร์แอกทิวิที และไอโซเทอร์มของอาหาร เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร โดยจะบอกถึงความคงตัวในระหว่างการเก็บผลิตภัณฑ์ต่อปฏิกิริยาการเสื่อมเสียทางชีวเคมีต่าง ๆ จากการทำลายของจุลินทรีย์ในอาหาร การสูญเสียคุณสมบัติทางกายภาพของอาหาร รวมทั้งเป็นค่าที่สำคัญในการพัฒนาการแปรรูป และการบรรจุหีบห่อผลิตภัณฑ์อีกด้วย [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. หาค่าวอเตอร์แอกทิวิทิ และไอโซเทอร์ม ของมะขามหวานพันธุ์ศรีชมภู สีทองและพันธุ์ขันตีที่อุณหภูมิ 36 , 45 และ 60 องศาเซลเซียส
2. เปรียบเทียบไอโซเทอร์มที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองของ Henderson

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

หาค่าวอเตอร์แอกทิวิทิ และไอโซเทอร์มของมะขามหวานพันธุ์ศรีชมภู สีทองและพันธุ์ขันตีที่อุณหภูมิ 36 , 45 และ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้วิธี Gravimetric method

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ค่าวอเตอร์แอกทิวิทิของมะขามพันธุ์ศรีชมภู สีทองและพันธุ์ขันตี ที่อุณหภูมิ 36 , 45 และ 60 องศาเซลเซียส
2. ไอโซเทอร์มของมะขามพันธุ์ศรีชมภู สีทองและพันธุ์ขันตี ที่อุณหภูมิ 36 , 45 และ 60 องศาเซลเซียส
3. ใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อเก็บรักษามะขาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มะขามหวาน [4]

มะขามหวานมีชื่อภาษาอังกฤษว่า Sweet tamarind มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *tamarindus indica L.* มีถิ่นกำเนิดทางตอนใต้ของเอเชีย เป็นไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ ทิ้งใบออกมาใหม่ในช่วงฤดูแล้ง (ราวปลายเดือนมกราคม - กุมภาพันธ์) จะแตกใบออกมาใหม่ในช่วงต้นฤดูฝน (กลางเดือนเมษายน - พฤษภาคม) และออกดอกติดฝักในช่วงฤดูฝน ฝักมะขามจะแก่และสามารถเก็บฝักได้ในช่วงเดือนธันวาคม - กุมภาพันธ์ มะขามมีรากที่สำคัญอยู่สามชนิดคือ รากแก้ว รากแขนงและรากฝอย ลำต้นสูงประมาณ 20 - 40 เมตร เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ดอกเป็นดอกสมบูรณ์เพศ ฝักเป็นแบบผลเดี่ยวแต่มีหลายเมล็ด ตั้งแต่ 1 - 8 เมล็ด ความยาวประมาณ 3 - 8 นิ้ว ฝักอ่อนมีสีเขียวปนเทาและเมื่อแก่จะมีสีน้ำตาล เปลือกจะแห้งและแตกง่าย

2.1.1 พันธุ์มะขามหวานที่นิยมปลูกในประเทศไทย [2]

1. พันธุ์หมื่นจง

เป็นต้นตระกูลของมะขามหวาน กำเนิดมาได้กว่า 200 ปี ขนาดของฝักปานกลาง มีทั้งชนิดฝักยาว ฝักสั้น หยักโค้งมน โค้งน้อย โค้งเป็นครึ่งวงกลม และโค้งวงกลม ฝักอ่อน สีน้ำตาลอมเทา เมื่อแก่ฝักจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง เนื้อจะมีสีน้ำตาลเข้ม เรียกว่าสีช้ำ เนื้อล่อนหนาพอสมควร เมล็ดเล็ก เปอร์เซ็นต์น้ำตาล 45.2 % มะขามหวานหนึ่งกิโลกรัมจะมีฝักประมาณ 30 - 38 ฝัก ข้อเสียของพันธุ์นี้คือ ฝักมักจะแตกง่าย ถ้าหากถูกฝนในขณะที่ฝักยังไม่แก่ จะเกิดความเสียหาย เนื่องจากฝักแตกประมาณ 40 - 60 % ปัญหาเรื่องฝักแตกมีผู้ทดลองให้น้ำเมื่อฝนแล้ง โดยให้น้ำทีละน้อย ทำให้ฝักแตกน้อยลง ฝักจะสุกช่วงกลางเดือนมกราคมถึงปลายเดือนมกราคม

2. พันธุ์สีทอง

พันธุ์สีทองกลายพันธุ์มาจากพันธุ์หมื่นจง สีของเนื้อมะขามพันธุ์นี้จะมีสีออกสีทอง เป็นมะขามพันธุ์หนัก ฝักแก่ช้า ฝักค่อนข้างตรง หรือโค้งเล็กน้อย ฝักจะกลมใหญ่ เนื้อดี เปลือกสีขาว ข้อเสียของมะขามพันธุ์นี้คือฝักจะไม่ค่อยดก ฝักจะสุกราวเดือนมกราคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. พันธุ์ศรีชมภู

พันธุ์ศรีชมภูเป็นพันธุ์ที่มีฝักกลมใหญ่รองจากพันธุ์หมื่นจงและสีทอง ฝักเหยียดตรง เปลือกฝักเป็นสีน้ำตาลอ่อนอมเทา เปลือกฝักเบา เนื้อหนา เมล็ดเล็กและล่อน มีสีน้ำตาลอมเหลือง เมื่อสมบูรณ์เต็มที่เนื้อจะตกทราย สาแหรกหุ้มเนื้อมีน้อย เยื่อหุ้มเมล็ดบางไม่เหนียว เป็นพันธุ์เบา ฝักแก่เร็ว จุดอ่อนของพันธุ์นี้ คือรสชาติจะแปรปรวนตามสภาพของสิ่งแวดล้อม

4. พันธุ์ขันตี

ลักษณะฝักจะใหญ่ โค้งเล็กน้อย ฝักค่อนข้างเบา เนื้อค่อนข้างชุ่ม ไม่ร่อน ฝักดกตามธรรมชาติโดยไม่ต้องใส่ฮอร์โมน

5. พันธุ์อินทผาลัม

เดิมชื่อพันธุ์หนองเล เพราะเกิดที่หนองเล ต่อมามีการตั้งชื่อใหม่ ตามสีเนื้อมะขามซึ่งมีสีน้ำตาลไหม้คล้ายเนื้ออินทผาลัม เนื้อค่อนข้างเหนียว เนื้อมาก ฉ่ำ ไม่แห้ง เนื้อตกทราย เป็นพันธุ์เบา แก่เร็ว ฝักตรงโค้งเล็กน้อย เปลือกฝักบาง เมล็ดเล็ก ข้อดีของพันธุ์นี้คือทนทานต่อความแห้งแล้งเป็นพิเศษ

2.1.2 พื้นที่เพาะปลูกและผลผลิตมะขาม [5]

ในปีการเพาะปลูก 2538 มีพื้นที่ปลูกมะขามรวมทุกพันธุ์ 556,477ไร่ โดยแยกปลูกมะขามพันธุ์สีทองสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 39.56 ของพื้นที่ปลูกรวม รองลงมาปลูกพันธุ์มะขามเปรี้ยวร้อยละ 24.92 และพันธุ์ศรีชมภู ร้อยละ 16.88 แหล่งที่ปลูกมากที่สุด 3 จังหวัดแรกคือ จังหวัดเลย, เพชรบูรณ์และนครราชสีมา ซึ่งมีพื้นที่ปลูกคิดเป็นร้อยละของพื้นที่ปลูกรวม 21.58, 15.68 และ 4.84 ตามลำดับ

ผลผลิตรวมทุกพันธุ์ 142,209 ตัน โดยแยกเป็นผลผลิตพันธุ์มะขามเปรี้ยว คิดเป็นร้อยละ 52.21 ของผลผลิตรวม พันธุ์สีทอง 20.92 และพันธุ์ศรีชมภูร้อยละ 10.70 แหล่งที่ให้ผลผลิตมากที่สุด 3 อันดับแรกคือ จังหวัดเพชรบูรณ์ นครราชสีมา และจังหวัดเลย ซึ่งให้ผลผลิตคิดเป็นร้อยละของผลผลิตรวม 11.60, 9.59 และ 9.12 ตามลำดับ

ผลผลิตเฉลี่ยรวม 488 กิโลกรัมต่อไร่ ราคาขายที่เกษตรกรขายได้ที่สวนเฉลี่ย 48.66 บาท พื้นที่เพาะปลูกของพันธุ์สีทองรวม 220,133 ไร่ โดยให้ผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่ 351 กิโลกรัม ราคาเฉลี่ยกิโลกรัมละ 76.32 บาท พันธุ์ศรีชมภูมีพื้นที่เพาะปลูก 93,991 ไร่ ผลผลิตเฉลี่ย 362 กิโลกรัมต่อไร่ ราคาเฉลี่ยกิโลกรัมละ 70.78 บาท พันธุ์ขันตีมีพื้นที่เพาะปลูก 17,322 ไร่ ให้ผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่ 330 กิโลกรัม โดยขายได้ในราคากิโลกรัมละ 62.80 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 การเก็บรักษาและแปรรูปมะขาม [2]

2.1.3.1 การเก็บรักษาฝักมะขาม

ฝักมะขามหลังจากเก็บเกี่ยวไว้นาน ๆ มักจะมีปัญหาเชื้อราขึ้นที่เนื้อ หรือบางครั้งอาจมีหนอนเจาะเมล็ดเจริญเติบโตอยู่ภายในฝัก โดยที่เปลือกฝักภายนอกยังปกติอยู่จึงควรทำการป้องกันการเกิดเชื้อราและแมลงดังนี้

1. การอบไอน้ำหรือนึ่ง ซึ่งอาจใช้ซึ้งนึ่ง โดยนึ่งในไอน้ำเดือดนานประมาณ 5 นาที วิธีนี้จะทำให้ผิวคล้ำลงเล็กน้อย จากนั้นนำมาผึ่งให้เย็นลงจนแห้งอาจใช้พัดลมเป่า หรือผึ่งกลางแดดก็ได้ จากนั้นนำไปบรรจุถุงพลาสติก หรือกล่องเพื่อจำหน่ายต่อไป

2. การอบแห้ง โดยการอบในโรงอบคล้ายกับการอบหรือบ่มใบยาสูบในห้องอบที่มีอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส นานประมาณ 2 ชั่วโมง วิธีนี้ผิวเปลือกจะไม่เปลี่ยนสีแต่เนื้อจะแห้งกว่าปกติเล็กน้อย เมื่อเก็บไว้ประมาณ 2 - 3 เดือน เนื้อก็จะชุ่มเหมือนเดิม

การอบนึ่งฝักมะขามด้วยความร้อนเพื่อให้ความร้อนทำลายตัวมอดและแมลงให้ตายยังมีปัญหาอยู่ จึงต้องให้หน่วยงานราชการที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมส่งเสริมการเกษตรและหน่วยงานราชการอื่น ๆ เข้ามาแก้ไขต่อไป

หากจำหน่ายมะขามได้ไม่หมดตามเวลา (40 - 60 วัน หลังจากเก็บฝักจากต้น) ต้องอบหรือนึ่งเพื่อเก็บรักษามะขามไม่ให้เกิดความเสียหายหรือเสื่อมคุณภาพ หรือไม่ก็ควรทำการแปรรูปมะขามเสีย

2.1.3.2 การแปรรูปมะขาม

การแปรรูปมะขามหวานมักทำเป็นงานเสริมรายได้จากอาชีพหลัก การแปรรูปมะขามหวานหรือมะขามกลายพันธุ์ทำได้หลายอย่างดังนี้

1. มะขามแกะเปลือก เป็นมะขามหวานที่แกะเปลือกที่หุ้มเนื้อมะขามออกแล้วนำมาบรรจุกาชนะ แล้วนำออกจำหน่ายได้เลย

2. มะขามคลุก มะขามที่จะใช้ทำนั้นเป็นมะขามหวานอมเปรี้ยว นำมะขามหวานที่แกะเปลือกแล้ว มาผสมกับน้ำตาล เกลือ และพริก ในอัตราที่เหมาะสม ขึ้นอยู่กับการชิมรสของผู้ทำว่าจะให้ออกรสไหน ซึ่งเป็นการคลุกด้วยมือ เมื่อคลุกเสร็จนำไปบรรจุกล่องพลาสติกใส หลาย ๆ ขนาด เพื่อให้ดูสวยงาม และสะดวกต่อการซื้อไปบริโภค หรือนำไปเป็นของฝากได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. มะขามแก้ว เป็นมะขามเปรี้ยว (มะขามเปียก) โดยนำมากวนและผ่านขั้นตอนต่าง ๆ โดยใช้ส่วนผสมที่สำคัญคือ น้ำตาล เกลือ และพริก ซึ่งส่วนผสมจะให้รสชาติแตกต่างไปตามส่วนที่เติมลงไป

4. มะขามกวน นำมะขามมาแช่น้ำคั้นเอาเนื้อมะขาม จากนั้นนำเนื้อมะขามมาเคี่ยว เพื่อใส่ส่วนผสมต่าง ๆ (มะขามเปรี้ยว, มะพร้าว(กะทิ), น้ำตาล, นมข้นหวาน และเกลือ) เมื่อเคี่ยวเสร็จจึงนำมาทำเป็นแท่ง เพื่อห่อด้วยพลาสติกแล้วนำออกจำหน่าย

5. มะขามแช่อิ่ม ทำได้โดยการใช้ฝักมะขามดิบ ซึ่งเป็นมะขามเปรี้ยวมาดำเนินการตามขั้นตอนต่าง ๆ คือ การลวกน้ำร้อน แช่น้ำปูน ตากแดด แช่น้ำตาล ตากแดด อบน้ำผึ้ง ซึ่งเป็นการใช้เวลาและกรรมวิธีที่ค่อนข้างซับซ้อน เมื่อเสร็จแล้วนำมาบรรจุกล่องพลาสติกใส แล้วนำออกจำหน่ายต่อไป

สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปที่กล่าวมา ปัจจุบันมีการทำกันน้อย ส่วนใหญ่มักจะทำกันในบางช่วงเวลา เช่น ตอนปลายปี อย่างไรก็ตามหากผู้บริโภคหันมานิยมบริโภคสินค้าประเภทนี้กันมากขึ้น มีความเป็นไปได้ที่จะขยายการผลิต ควบคู่ไปกับการส่งเสริมการตลาดอย่างเป็นระบบต่อไป

2.1.4 ตลาดส่งออกมะขามของไทย [2]

1. มะขามที่ส่งออกมีทั้งมะขามเปรี้ยวและมะขามหวาน แต่การจัดเก็บข้อมูลของกรมศุลกากร กระทรวงการคลัง มิได้แยกรหัสมะขามไว้โดยเฉพาะเนื่องจากมูลค่ามีน้อย มะขามเป็นเครื่องเทศที่ประเทศในเอเชียและตะวันออกกลางนิยมบริโภค เนื่องจากมีคุณสมบัติช่วยลดความร้อนของร่างกายและการกระหายได้ การบริโภคจึงมีทั้งการบริโภคในรูปมะขามสด การแปรรูปและใช้ประกอบอาหาร ในระยะปี 2536 - 2541 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกมะขามของไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามผลผลิตที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะมะขามหวานโดยเพิ่มขึ้นจากปริมาณ 14,737 ตัน มูลค่า 131.5 ล้านบาท ในปี 2536 เป็น 22,464 ตัน มูลค่า 269.2 ล้านบาท หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 52.4 และ 104.7 ของปริมาณมูลค่าตามลำดับ ผลผลิตจะส่งออกปีต่อปี เพราะถ้าสินค้าค้างสต็อก จะทำให้มีสีคล้ำและเป็นเชื้อราได้ง่าย หากเก็บรักษาไม่ดี

2. ตลาดส่งออกที่สำคัญของไทย ได้แก่ ปากีสถาน มาเลเซีย สหรัฐอาหรับเอมิเรตส์ ซาอุดิอาระเบีย สิงคโปร์ สหรัฐอเมริกา คูเวต โดยมาเลเซีย สหรัฐอาหรับเอมิเรตส์ สหรัฐอเมริกา ซาอุดิอาระเบีย และสิงคโปร์ เป็นลูกค้าประจำสำคัญของไทย โดยนำเข้ารวมกันคิดเป็นสัดส่วนประมาณ 50 - 70 ของมูลค่าส่งออกทั้งหมดของไทยในปี 2541 ปริมาณและมูลค่าส่งออกเพิ่มขึ้นมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบกับในระยะ 6 ปีที่ผ่านมา เนื่องจาก ผลผลิตที่เพิ่มมากขึ้น ประกอบกับ ปากีสถาน มีความต้องการสูงขึ้น ปริมาณและมูลค่าส่งออกในช่วงปี 2538 - 2541 แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกมะขามของไทย [2]

ประเทศ	2538		2539		2540		2541	
	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า
ปากีสถาน	231	1.4	1,179	7.6	145	0.8	7,620	60.8
มาเลเซีย	5,050	42.9	6,523	50.8	8,135	59.9	6,291	38.4
สหรัฐอาหรับเอมิเรตส์	689	6.7	3,734	37.2	2,524	28.6	3,320	36.5
สหรัฐอเมริกา	141	6.0	355	12.5	427	22.1	632	34.5
ซาอุดิอาระเบีย	279	3.9	472	7.9	427	8.6	923	16.1
สิงคโปร์	2,063	22.9	1,785	15.4	1,307	14.8	867	10.4
อื่น ๆ	1,665	31.1	2,939	50.2	2,422	52.6	2,811	72.5
รวม	10,118	114.9	16,987	181.6	15,407	187.4	22,464	269.2

ปริมาณ : ตัน

มูลค่า : ล้านบาท

3. แนวโน้มการส่งออก

แหล่งตลาดสำคัญของมะขามอยู่ในเอเชียและตะวันออกกลาง โอกาสที่จะขยายไปยังตลาดอื่นยังเป็นไปได้ช้า เพราะยังไม่เป็นที่รู้จักแพร่หลาย ประกอบกับมะขามเป็นผลไม้เมืองร้อนที่มีแหล่งปลูกในเอเชีย นอกจากนี้ มะขามโดยเฉพาะมะขามหวาน ซึ่งขายทั้งเปลือกยังเป็นเชื้อราได้ง่าย เนื่องจากการปฏิบัติก่อนและหลังการเก็บเกี่ยวยังไม่ได้มาตรฐาน ประกอบกับประเทศแถบยุโรป และประเทศพัฒนาแล้วเข้มงวดเรื่องโรคและแมลงที่ติดไปกับมะขามมาก จึงต้องใช้เวลาในการพัฒนาสินค้า และประชาสัมพันธ์ให้ต่างประเทศรู้จักมากขึ้น เพื่อตลาดจะได้กระจายตัวออกไป

2.1.5 ปัญหาด้านราคาและตลาด [2]

ปัญหาที่ส่งผลกระทบด้านราคามะขามที่เกษตรกรประสบคือ

1. ปัญหาด้านรสชาติมะขามที่ไม่สม่ำเสมอ
2. ค่าใช้จ่ายในการหีบห่อสูง เนื่องจากมะขามหวานมีเปลือกที่เปราะบางแตกง่าย การหีบห่อที่ไม่ดีจะทำให้เกิดการเสียหายแตกหักจากการขนส่งเคลื่อนย้าย ทำให้ราคาตก จึงต้องเสียค่าหีบห่อสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การขาดแคลนที่กักเก็บรักษาสินค้า เพื่อรอจำหน่ายนอกฤดู
4. ราคาตกต่ำในช่วงฤดูกาลที่ผลผลิตออกสู่ตลาดพร้อมกันจำนวนมาก
5. เกษตรกรยังขาดความรู้เรื่องการตลาด การรักษาคุณภาพ และการหีบห่อ

การแก้ปัญหา

1. ทำการประชาสัมพันธ์เน้นให้เห็นผลเสียในการปลอมปนมะขาม
2. กาคราชการต้องอบรมให้ความรู้แก่เกษตรกร ในเรื่องการตลาดมะขามหวาน การรักษาคุณภาพสินค้า การเก็บรักษา การหีบห่อ ตลอดจนข่าวสารการค้า และแหล่งรับซื้อให้เกษตรกรมีความรู้เพิ่มขึ้น
3. สำหรับมะขามที่จำเป็นจะต้องมีการแปรรูปควรพัฒนาการแปรรูปมะขามให้มีมาตรฐานเป็นที่ยอมรับ

2.2 ทฤษฎีความชื้น [6]

Jason (1992) ได้ให้นิยามไว้ว่า ความชื้น หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหารหรือวัสดุใด ๆ มักกำหนดเป็นอัตราร้อยละของน้ำหนักต่อน้ำหนักของวัสดุ กำหนดไว้ 2 แบบ คือแบบมาตรฐานเปียก (wet basis) และแบบมาตรฐานแห้ง (dry basis)

1. ปริมาณความชื้นแบบมาตรฐานเปียก (wet basis)

เป็นอัตราร้อยละของน้ำต่อน้ำหนักทั้งหมดของวัสดุ คำนวณจาก

$$\% \text{ ความชื้นมาตรฐานเปียก} = \frac{\text{น้ำหนักของน้ำในวัสดุ} * 100}{\text{น้ำหนักของวัสดุทั้งหมด}}$$

$$= \frac{\text{น้ำหนักของน้ำในวัสดุ} * 100}{\text{น้ำหนักของวัสดุที่แห้ง} + \text{น้ำหนักของน้ำในวัสดุ}}$$

หรือ % ความชื้น $M_w = W_m / W_t * 100$

$$= \frac{W_m}{W_m + W_{dm}} * 100$$

เมื่อ

W_m = น้ำหนักน้ำในวัสดุ

W_t = น้ำหนักของวัสดุทั้งหมด

W_{dm} = น้ำหนักของวัสดุที่แห้ง

หรือ % ความชื้น $M_w = (w - d) / w * 100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

M_w = เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก

w = มวลของของแข็งและน้ำหน่วยเป็นกรัม

d = มวลของของแข็งหน่วยเป็นกรัม

2. ปริมาณความชื้นแบบมาตรฐานแห้ง (Dry basis)

เป็นร้อยละของน้ำหนักน้ำต่อน้ำหนักวัสดุที่แห้ง คำนวณได้จากสูตร

$$\% \text{ ความชื้นมาตรฐานแห้ง} = \frac{\text{น้ำหนักของน้ำในวัสดุ} * 100}{\text{น้ำหนักของวัสดุที่แห้ง}}$$

หรือ % ความชื้น $M_d = W_m / W_{dm} * 100$

เมื่อ

M_d = ความชื้นมาตรฐานแห้งหน่วยเป็นกรัม

W_m = น้ำหนักน้ำในวัสดุ

W_{dm} = น้ำหนักของวัสดุที่แห้ง

หรือ % ความชื้น $M_d = (w - d) / d * 100$

เมื่อ

M_d = เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง

d = มวลของของแข็งหน่วยเป็นกรัม

w = มวลของของแข็งและน้ำหน่วยเป็นกรัม

2.3 ทฤษฎีคุณสมบัติของอากาศ – น้ำ [6]

สมบัติ ขอทวีวัฒนา (2529) ได้ให้นิยามต่าง ๆ ไว้ดังนี้

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry bulb temperature) หมายถึง อุณหภูมิของอากาศซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์โดยตรง ค่าที่อ่านได้จะเป็นอุณหภูมิของอากาศแบบ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง

อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature) หมายถึง อุณหภูมิของอากาศโดยการวัดด้วยเทอร์โมมิเตอร์แบบธรรมดาแต่ตรงปลายหลอดแก้วที่เป็นกระเปาะบรรจุปรอทห่อหุ้มด้วยผ้าชุบน้ำ ดังนั้น อุณหภูมิที่อ่านได้จะเป็นอุณหภูมิของน้ำที่ห่อหุ้มกระเปาะ โดยปรอทภายในหลอดแก้วจะลดลงอย่างรวดเร็วตามอุณหภูมิของน้ำที่ห่อหุ้มปรอท และจะต้องอ่านอุณหภูมิทันที

โดยปกติแล้วค่าอุณหภูมิของกระเปาะเปียก จะอ่านค่าได้ต่ำกว่าค่าของอุณหภูมิกระเปาะแห้ง เนื่องจากเทอร์โมมิเตอร์ที่อ่านค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกนั้นมีผ้าชุบน้ำหุ้มอยู่ ไอน้ำจากถุงผ้าที่

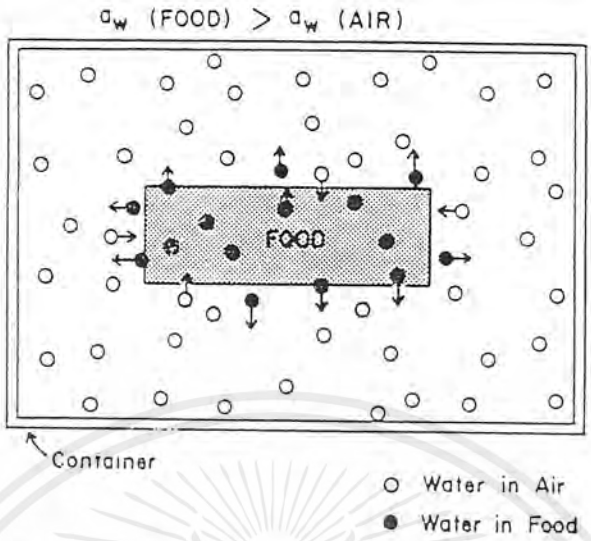
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่รอบ ๆ กระเปาะเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงจะระเหยออกมา ซึ่งไอน้ำที่ระเหยออกมารอบ ๆ กระเปาะนี้จะทำให้ปรอทเย็นลง ทำให้ค่าอุณหภูมิที่อ่านโดยอุณหภูมิกระเปาะเปียกมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้ง ซึ่งความแตกต่างระหว่าง 2 ค่านี้ จะมากน้อยแค่ไหนขึ้นอยู่กับปริมาณไอน้ำในอากาศด้วย ถ้าไอน้ำในอากาศมีมากอัตราการระเหยของน้ำจากถุงผ้าก็จะต่ำ แต่ไอน้ำในอากาศมีน้อยมาก ๆ หรือ สภาพของอากาศแห้งทำให้อากาศดูดไอน้ำในอากาศได้มาก อัตราการระเหยของน้ำจากถุงผ้าจะสูง ทำค่าที่อ่านได้แตกต่างกันมากขึ้น แต่ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเป็น 100 % (100 % Relative Humidity) อุณหภูมิแบบกระเปาะเปียกจะมีค่าเท่ากับของกระเปาะแห้ง เนื่องจากสภาพดังกล่าวอากาศไม่สามารถดูดซึมความชื้น หรือ ไอน้ำได้อีกแล้ว ทำให้การระเหยของไอน้ำจากถุงผ้าไม่มีจึงอ่านอุณหภูมิได้เท่ากัน

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับความชื้นสมดุล

เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุน เช่น เมล็ดพืชไปวางไว้ในอากาศที่มีสภาวะคงที่คือมี อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์คงที่ผลิตภัณฑ์นั้นอาจจะคายความชื้นให้กับอากาศ (Desorption) หรือ ดูดซับความชื้นจากอากาศ (Adsorption) ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของอากาศ และเมื่อวางไว้เป็นเวลานาน ๆ ผลิตภัณฑ์นี้จะมีความชื้นคงที่ค่าหนึ่งเรียกว่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC) ในขณะที่ผลิตภัณฑ์อยู่ในสภาวะสมดุลนั้นอัตราการสูญเสียความชื้นจากผลิตภัณฑ์ไปยังอากาศรอบ ๆ มีค่าเท่ากับ อัตราการได้รับความชื้นจากอากาศ รอบ ๆ หรือ กล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าในขณะที่ผลิตภัณฑ์อยู่ในสภาวะสมดุลนั้นความดันไอที่ผิวของผลิตภัณฑ์จะมีค่าเท่ากับความดันไอของอากาศรอบ ๆ การแลกเปลี่ยนความชื้นของผลิตภัณฑ์กับอากาศแสดงดังรูปที่ 2.1 ค่าความชื้นสมดุลนี้ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และชนิดของผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แสดงการแลกเปลี่ยนความชื้นของผลิตภัณฑ์กับอากาศ [7]

2.4 วอเตอร์แอกทิวิที (water activity) ในอาหาร

วอเตอร์แอกทิวิที (water activity) ใช้สัญลักษณ์ a_w คือปริมาณน้ำในอาหารซึ่งใช้ในการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ในอาหาร และที่จุลินทรีย์ในอาหารสามารถใช้ในการเจริญเติบโตได้

2.4.1 ความหมายของ วอเตอร์แอกทิวิที [3]

ค่า วอเตอร์แอกทิวิที มีความหมายได้สามอย่างดังนี้

1. วอเตอร์แอกทิวิที คืออัตราส่วนระหว่างความดันไอของน้ำในสารละลาย (P) ต่อความดันไอ ของน้ำบริสุทธิ์ (P_o) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$a_w = P / P_o$$ ที่อุณหภูมิเดียวกัน

หรืออีกนัยหนึ่ง P เป็นค่าความดันไอของน้ำในอาหารนั่นเอง

2. วอเตอร์แอกทิวิที ของอาหารมีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ (equilibrium relative humidity) ของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์เป็นอัตราส่วนของความดันไอของความชื้นในอากาศต่อความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิเดียวกัน ความชื้นสัมพัทธ์ใช้สัญลักษณ์ ERH ความสัมพันธ์ระหว่าง วอเตอร์แอกทิวิที และ ความชื้นสัมพัทธ์เป็นดังนี้

$$a_w = ERH / 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้ว่าวอเตอร์แอกทิวิทิ และความชื้นสัมพัทธ์จะมีความสัมพันธ์กัน แต่ทว่าวอเตอร์แอกทิวิทิเป็นสมบัติที่ขึ้นกับปริมาณสารตัวอย่าง ในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นสมบัติของบรรยากาศล้อมรอบ ซึ่งอยู่ในสมดุลกับสารตัวอย่าง

3. วอเตอร์แอกทิวิทิ มีค่าเท่ากับอัตราส่วนจำนวนโมลตัวทำละลายต่อผลรวมของจำนวนโมลตัวทำละลายและตัวถูกละลายเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$a_w = n_1 / (n_1+n_2)$$

n_1 = จำนวนโมลตัวทำละลาย

n_2 = จำนวนโมลตัวถูกละลาย

2.4.2 ความสำคัญของวอเตอร์แอกทิวิทิ [3]

วอเตอร์แอกทิวิทิของอาหารสดโดยเฉพาะอย่างยิ่งผักและผักไม้มีค่าสูง ตรงข้ามกับวอเตอร์แอกทิวิทิ ของอาหารแห้งจะมีค่าต่ำกว่า ตารางที่ 2.2 แสดงค่าวอเตอร์แอกทิวิทิของอาหารบางประเภท

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าวอเตอร์แอกทิวิทิของอาหารบางประเภท [3]

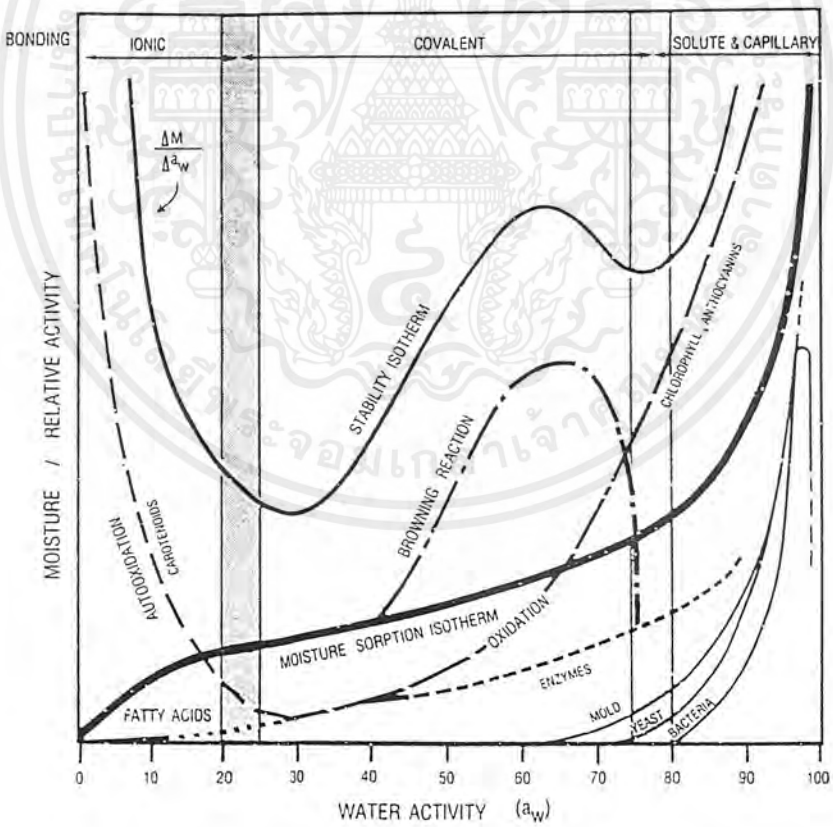
อาหาร	วอเตอร์แอกทิวิทิ	อาหาร	วอเตอร์แอกทิวิทิ
ผักผลไม้สด	0.97 - 1.00	แป้ง	0.67 - 0.87
เนื้อสัตว์ปีกสดและปลาสด	0.98 - 1.00	โมลาส	0.76
เนื้อสด	0.95 - 1.00	น้ำผึ้ง	0.54 - 0.75
ไข่สด	0.97	ผลไม้แห้ง	0.51 - 0.89
น้ำผลไม้คั้น	0.97	ลูกกวาดผสม	0.69
ขนมปัง	0.95 - 0.96	น้ำตาลทราย	0.10
เนื้อหมัก	0.87 - 0.95	ลูกกวาด	0.60 - 0.65
เค้ก	0.90 - 0.94	คาราเมล	0.60 - 0.65
ถั่วเมล็ดแห้ง	0.66 - 0.84	ก๋วยเตี๋ยว	0.50
แยม	0.75 - 0.80	ขนมปังกรอบ	0.30
เยลลี่	0.82 - 0.94	ผักแห้ง	0.20
ข้าวสวย	0.80 - 0.87	ธัญชาติ	0.10 - 0.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่อาหารประเภทต่าง ๆ มีค่า วอเตอร์แอกทิวิทิ แตกต่างกันจะทำให้สมบัติของอาหารอันเนื่องจากน้ำในอาหารเปลี่ยนแปลงไป วอเตอร์แอกทิวิทิ ของอาหารนอกจากมีผลต่อคุณภาพและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในอาหารแล้ว ยังเป็นปัจจัยสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อีกด้วย

2.4.2.1 ความสำคัญของวอเตอร์แอกทิวิทิทางด้านชีวเคมี [8]

จากตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าอาหารในธรรมชาติหรือที่ยังไม่ผ่านการแปรรูปมีน้ำประกอบอยู่ในปริมาณมาก น้ำในอาหารดังกล่าวเป็นปัจจัยของการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในอาหารที่สำคัญ ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของไขมัน (lipid oxidation) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซีส (hydrolytic reaction) ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) รวมทั้งความสามารถของเอนไซม์ในการเร่งปฏิกิริยา (enzyme activity) ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีอัตราการเกิดที่สอดคล้องกับปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอาหารและค่าวอเตอร์แอกทิวิทิ ดังแสดงตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงอิทธิพลของวอเตอร์แอกทิวิทิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ในอาหาร [9]

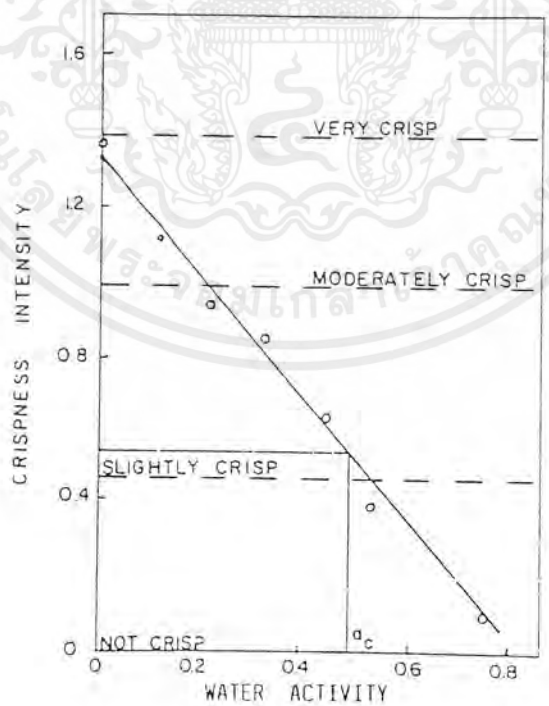
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.2 ความสำคัญของวอเตอร์แอกทิวิทิทางด้านจุลินทรีย์ [8]

จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ในผลิตภัณฑ์ ที่มีค่าวอเตอร์แอกทิวิทในระดับที่พอเหมาะเรียกว่า อ็อบติมอล วอเตอร์แอกทิวิทิ เมื่อวอเตอร์แอกทิวิทิลดลงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะลดลงตามไปด้วย จนถึงค่าวอเตอร์แอกทิวิทิในระดับหนึ่งซึ่งจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ จุลินทรีย์แต่ละชนิดมีความต้องการปริมาณน้ำที่ใช้ประโยชน์หรือวอเตอร์แอกทิวิทิแตกต่างกัน ระดับวอเตอร์แอกทิวิทิต่ำสุด ที่จุลินทรีย์จะเจริญเติบโตได้เรียกว่า มินิมอล วอเตอร์แอกทิวิทิ ซึ่งเชื้อรามีความต้องการวอเตอร์แอกทิวิทิ น้อยกว่า ยีสต์และแบคทีเรีย

2.4.2.3 ความสำคัญของวอเตอร์แอกทิวิทิทางด้านกายภาพ [8]

ค่าวอเตอร์แอกทิวิทิ นอกจากจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และปฏิกิริยาทางด้านชีวเคมีต่าง ๆ ในอาหารแล้วยังมีผลต่อคุณสมบัติทางเนื้อสัมผัสของอาหารด้วย ได้แก่ ในด้านความกรอบ (Crispness) ของผลิตภัณฑ์อาหารจากธัญพืช (Cereal - Base Product) เช่น แครกเกอร์ ขนมทอดกรอบ (Fried Snacks) และในด้านความแข็งของผลิตภัณฑ์ (Hardeness) ซึ่งแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอกทิวิทิและความกรอบของผลิตภัณฑ์อาหารแสดงตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการสูญเสียความกรอบของอาหารที่ค่าวอเตอร์แอกทิวิทิ ต่าง ๆ กัน [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ไอโซเทอร์ม (Isotherm)

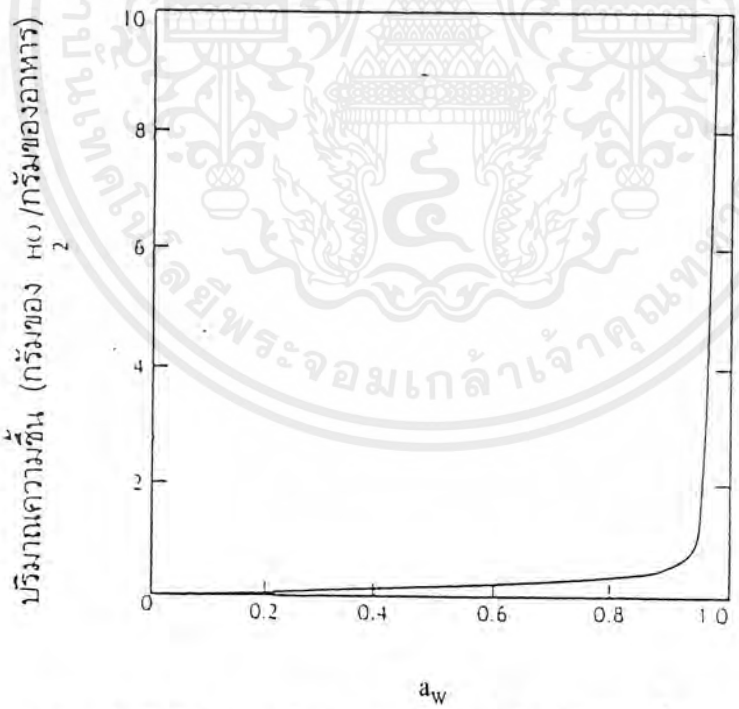
2.5.1 ความหมายของไอโซเทอร์ม

ไอโซเทอร์มคือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับค่าวอเตอร์แอกทิวิทิ ในระหว่างการกำจัดน้ำออกจากอาหาร ณ อุณหภูมิคงที่

2.5.2 ความสำคัญของไอโซเทอร์ม [3]

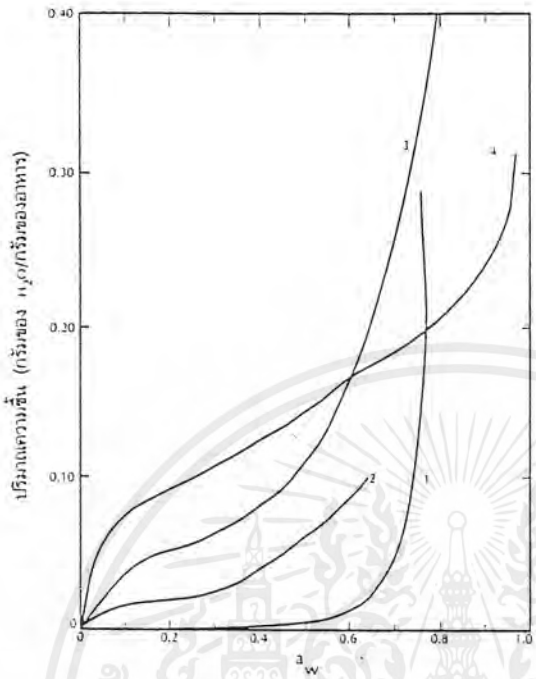
2.5.2.1 การเก็บรักษาอาหาร

การศึกษาไอโซเทอร์มของอาหารทำให้เราทราบว่ามีตัวแปรใดบ้างที่มีอิทธิพลต่อการเก็บรักษาอาหาร ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการเก็บรักษาอาหารเพื่อไม่ให้เสื่อมเสียง่าย อาหารแต่ละชนิดจะมีซอร์ปชันไอโซเทอร์มที่มีลักษณะเฉพาะตัวแตกต่างกันตามชนิดของอาหาร ดังแสดงตามรูปที่ 2.4 และ 2.5



รูปที่ 2.4 แสดงซอร์ปชันไอโซเทอร์มของอาหารโดยทั่วไปที่มีความชื้นสูง [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



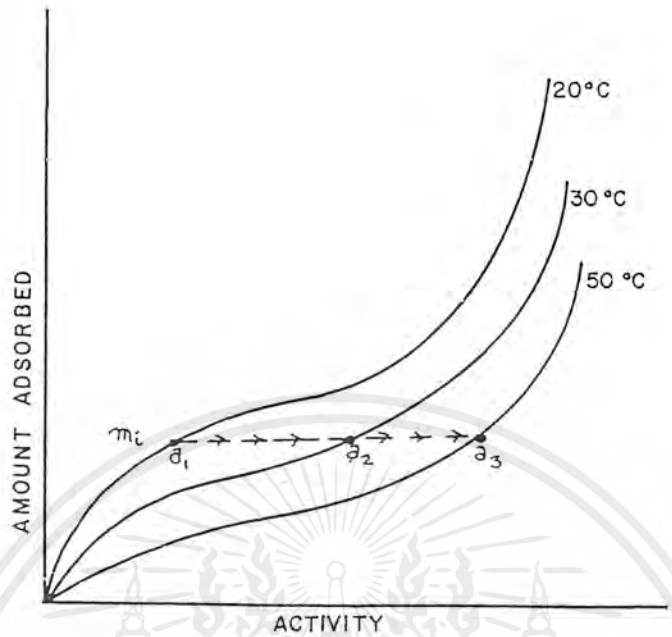
1. ลูกกวาด
2. กาแฟโคลัมเบียคั่ว
3. ผงสกัดจากตับอ่อนหมู
4. แป้ง (starch)

รูปที่ 2.5 แสดงซอร์ปชันไอโซเทอร์มของอาหารบางชนิดที่มีความชื้นต่ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส [3]

รูปที่ 2.5 แสดงซอร์ปชันไอโซเทอร์มของอาหารบางชนิดที่มีความชื้นต่ำเปรียบเทียบกันที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปลักษณะของซอร์ปชันไอโซเทอร์มก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังแสดงตามรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.6 แสดงซอร์ปชันไอโซเทอร์มที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน [10]

นอกจากนี้ปริมาณน้ำในโซนต่าง ๆ ของไอโซเทอร์มในอาหาร และลักษณะการยึดเกาะของโมเลกุลของน้ำในอาหาร ในช่วงวอเตอร์แอกทิวิทีต่าง ๆ ก็ยังมีผลต่อการเก็บรักษาอาหารด้วย โดยในช่วงวอเตอร์แอกทิวิทีต่างกัน น้ำที่ยึดเกาะอยู่ในผลิตภัณฑ์ก็แตกต่างกันดังนี้

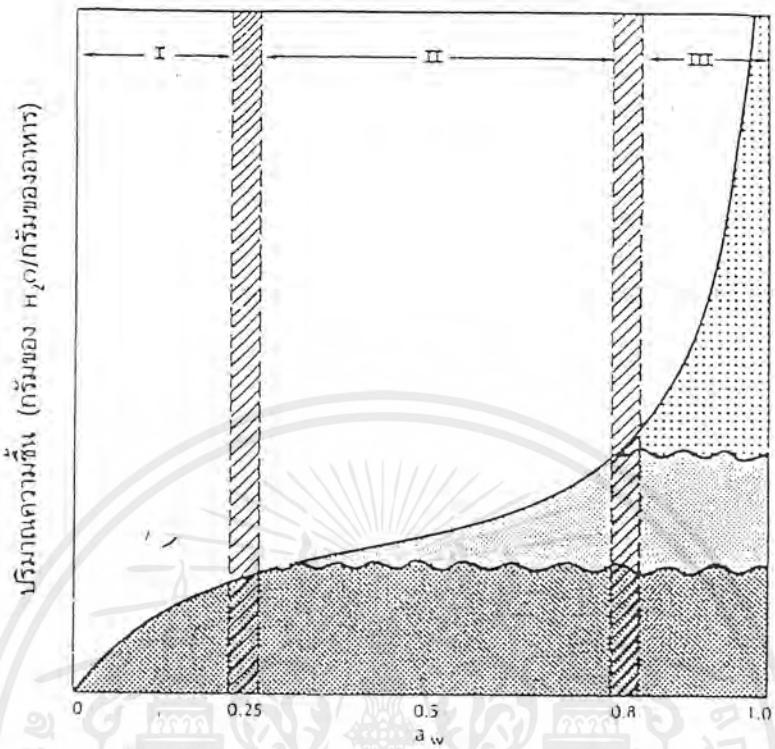
ค่าวอเตอร์แอกทิวิทีระหว่าง 0.00 - 0.25 เป็นช่วงที่โมเลกุลของน้ำยึดเกาะกันด้วยพันธะอิออนิก เช่น NH^{+}_{3} ยึดกับโปรตีนและ CO_2 ยึดกับโปรตีน ค่าวอเตอร์แอกทิวิทีประมาณ 0.25 จะมีความชื้นใกล้กับอาหารแห้งซึ่งอาหารจะมีความคงตัวมากที่สุดโดยที่ยังคงมีปริมาณลิพิดที่ถูกออกซิไดส์ง่ายอยู่มากพอสมควร

ค่าวอเตอร์แอกทิวิทีระหว่าง 0.25 - 0.75 เป็นช่วงที่โมเลกุลของน้ำยึดเกาะกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ เช่น OH ในโปรตีนและโพลิเมอร์ของคาร์โบไฮเดรต เช่น แป้ง เพกติน เซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลส

ค่าวอเตอร์แอกทิวิทีระหว่าง 0.75 - 1.00 เป็นช่วงที่มีชั้นของน้ำอยู่หลายชั้นบนโปรตีนและโพลิเมอร์ของคาร์โบไฮเดรต

ปริมาณน้ำในโซนต่าง ๆ ของไอโซเทอร์มในอาหารแบ่งออกเป็น 3 โซน ดังแสดงตามรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
36728



รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นน้ำในแต่ละโซน [3]

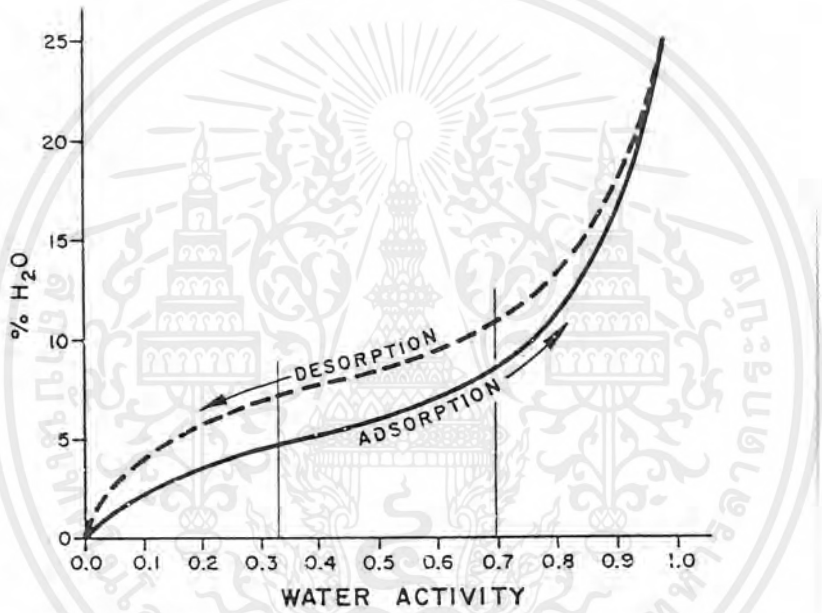
ในการกำจัดน้ำออกจากอาหารนั้น น้ำส่วนแรกจะถูกกำจัดออกได้ง่าย และมีวอเตอร์แอกทิวิที ต่ำกว่าน้ำบริสุทธิ์เล็กน้อยคือโซน III ตามรูปที่ 2.7 น้ำชนิดนี้มีเนื้อเยื่อของพืชและสัตว์เป็นแหล่งเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และใช้สำหรับเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ในอาหาร เมื่อน้ำส่วนนี้ถูกกำจัดออกไปหมด วอเตอร์แอกทิวิทีจะมีค่าประมาณ 0.80 ความชื้นจะเหลือประมาณร้อยละ 12 - 25

น้ำส่วนที่ 2 (โซน II ตามรูปที่ 2.7) ซึ่งถูกกำจัดได้ยากกว่าส่วนแรก การกำจัดน้ำส่วนนี้ออกเพียงเล็กน้อยจะทำให้ค่าวอเตอร์แอกทิวิทีลดลงอย่างมาก การกำจัดน้ำส่วนนี้ออกบางส่วนช่วยลดการเจริญของจุลินทรีย์และลดปฏิกิริยาในอาหารส่วนใหญ่ หากกำจัดน้ำส่วนนี้ออกหมดหรือเกือบหมดจนเหลือความชื้นร้อยละ 3 - 7 ค่าวอเตอร์แอกทิวิที ประมาณ 0.25 จะมีความชื้นใกล้เคียงกับอาหารแห้ง ซึ่งอาหารจะมีความคงตัวมากที่สุด โดยที่ยังคงมีปริมาณลิพิดที่ถูกออกซิไดส์ง่ายอยู่มากพอสมควร

เมื่อน้ำ 2 ส่วน (โซน III และ โซน II) ถูกกำจัดออกไปแล้ว น้ำในอาหารส่วนที่เหลือ (โซน I ตามรูปที่ 2.7 สามารถกำจัดออกได้ด้วยวิธีการดึงน้ำออก (dehydration) น้ำส่วนนี้กำจัดออกได้ยากเนื่องจากเป็นน้ำผูกพันที่ถูกยึดไว้แน่นหนามาก น้ำส่วนนี้จะไม่มีสมบัติเป็นตัวทำละลายและไม่เป็นตัวกลางในปฏิกิริยาเคมีใด ๆ ที่เกิดขึ้นในอาหาร การเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดกับอาหารในโซน I นี้ คือการเหม็นหืนของลิพิดในอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ที่น่าสนใจเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น และวอเตอร์แอกทิวิทิ ของอาหารอีกประการหนึ่งก็คือ การคายน้ำ (desorption) และการดูดน้ำเข้าไปใหม่ (resorption) ของระบบอาหารใด ๆ กระบวนการคายน้ำและดูดน้ำเข้าไปใหม่ของอาหารนี้เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับวอเตอร์แอกทิวิทิ แล้วเส้นกราฟที่ได้จะไม่ซ้ำกัน ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า ฮีสเทอเรซิส (hysteresis) ดังแสดงตามรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นฮีสเทอเรซิสของอาหารโดยทั่วไป ซึ่ง ณ ระดับความชื้นที่กำหนดค่าวอเตอร์แอกทิวิทิของอาหารระหว่างการคายน้ำจะมีค่าต่ำกว่า วอเตอร์แอกทิวิทิของอาหารระหว่างการดูดน้ำเข้าไปใหม่



รูปที่ 2.8 แสดงฮีสเทอเรซีสของซอร์ปชันไอโซเทอร์ม [9]

2.5.2.2 การทำนายเกี่ยวกับการบรรจุหีบห่อ [10]

เมื่อทราบค่าวอเตอร์แอกทิวิทิสามารถใช้หาค่าความชื้นเพิ่ม หรือ ความชื้นลดสูงสุด ได้จากสภาวะเริ่มต้น ไอโซเทอร์มสามารถใช้หาค่าความชื้นวิกฤตหรือจุดที่ไม่เป็นที่ยอมรับได้ และสามารถออกแบบบรรจุภัณฑ์มะขามให้สามารถเก็บมะขามไว้ได้ตามระยะเวลาที่ต้องการ

2.5.2.3 การผสมส่วนผสมต่าง ๆ [10]

การรวมผลิตภัณฑ์อาหารที่ต่างกันหลายชนิดเข้าด้วยกัน ซึ่งมีส่วนที่ต่างกัน 2 ส่วน คือ วอเตอร์แอกทิวิทิ และคุณสมบัติทางด้านเคมี ในระหว่างการเก็บนั้นความชื้นจะเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปลงไปเพราะลักษณะทางด้านเคมีของอาหารแต่ละชนิดต่างกัน จนกระทั่งถึง วอตอร์แอกทิวิทิสมดุลสุดท้าย

เมื่อเราทราบไอโซเทอร์มของอาหารแต่ละชนิดเราก็สามารถทำนายค่าวอเตอร์แอกทิวิทิสมดุลได้ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการบรรจุผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยไม่ทำให้สมบัติทางด้านกายภาพและเคมีของอาหารแต่ละชนิดเสียไป

2.5.3 การควบคุมความชื้น [7]

การควบคุมวอเตอร์แอกทิวิทิเป็นสิ่งสำคัญในการหาวอเตอร์ซอร์ปชั่นไอโซเทอร์ม วิธีที่นิยมที่สุดได้แก่วิธีใช้สารละลายเกลือ และสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน สารละลายเกลือจะถูกเตรียมให้เป็นสารละลายเกลืออิ่มตัว ทั้งนี้สารละลายเกลือจะถูกจัดเตรียมที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน อีกวิธีหนึ่งคือใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ซึ่งให้ค่าวอเตอร์แอกทิวิทิที่ต่างกัน

วิธีในการหาวอเตอร์ซอร์ปชั่นไอโซเทอร์ม มี 2 วิธีด้วยกันคือ gravimetric methods และ manometric หรือ hygrometric method

1. Gravimetric methods

วิธีในการสร้างซอร์ปชั่นไอโซเทอร์มคือใช้ตัวอย่าง 2 - 3 กรัม บรรจุลงในสารละลายเกลืออิ่มตัวซึ่งมีค่าวอเตอร์แอกทิวิทิ ต่างๆ กัน โดยตัวอย่างจะมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักจนคงที่ การเข้าสู่สมดุลจะพิจารณาจากความต่างของน้ำหนักซึ่งใช้เวลาประมาณ 2 สัปดาห์ ลักษณะของตัวอย่างจะมีการเพิ่มหรือลดลงของน้ำหนัก ซึ่งจะถูกพล็อตเป็นกราฟไอโซเทอร์มในเทอมของวอเตอร์แอกทิวิทิ กับ ความชื้นสมดุล (มาตรฐานแห้ง)

2. The manometric หรือ hygrometric method

วอเตอร์แอกทิวิทิ จะถูกหาโดยการวัดความดันไอน้ำ หรือใช้ Hydrometers

2.5.4 การลดเวลาในการหาไอโซเทอร์ม [7]

วิธีการที่สามารถลดเวลาในการหาไอโซเทอร์ม มีดังนี้

1. การลดความชื้นในแชมเบอร์ลงจะช่วยลดเวลาในการเข้าสู่สมดุล ซึ่งจะลดความต้านทานในการถ่ายเทโมเลกุลน้ำระหว่างสารละลายเกลือและตัวอย่าง

2. สามารถใช้ความดันทำให้เกิดฟองอากาศในสารละลายกรดซัลฟิวริก และสารละลายเกลือ ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการเข้าสู่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การจัดให้มีการไหลเวียนของอากาศจะช่วยลดเวลาในการเข้าสู่สมดุล 1 / 5 ของเวลาทั้งหมด

4. เวลาการเข้าสู่สมดุลสามารถลดลง 70 % เมื่อขนาดของแชมเบอร์ลดลงและมีอัตราพื้นที่กว้างปริมาตรไอ(Vapour Volume) (31 เมตร^2/เมตร^3) โดยดูดอากาศออก

เมื่อเร็ว ๆ นี้ นักวิทยาศาสตร์ได้ศึกษาเกี่ยวกับการลดเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลในการหาซอร์ปชั่นไอโซเทอร์ม ซึ่งเมื่อใช้สารละลายเกลือในการทดลอง เวลาของการเข้าสมดุลจะลดลงที่ความดัน 13000 Pa (77 มิลลิเมตรปรอท) โดยในการทดลองต้องมีการบันทึกและติดตามผลน้ำหนักของตัวอย่างอย่างต่อเนื่องและควรมีการควบคุมความชื้นด้วย

Bandyopadh และ Labuza ได้ออกแบบการหาวอเตอร์ซอร์ปชั่นไอโซเทอร์มของอาหารที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งมีข้อมูลเล็กน้อยที่เป็นประโยชน์ต่อการหาค่าวอเตอร์แอกทิวิทิ

2.5.5 สภาวะที่มีผลต่อไอโซเทอร์ม [7]

ซอร์ปชั่นไอโซเทอร์มของวัสดุชนิดเดียวกันจะเปลี่ยนแปลงทุกครั้งที่ทำการทดลอง จากการศึกษาวอเตอร์ซอร์ปชั่นไอโซเทอร์มของข้าวโพดทำให้ทราบปัจจัยที่มีผลกับรูปร่างของไอโซเทอร์มดังนี้

1. ลักษณะของวัสดุ ได้แก่ ความหลากหลายของวัสดุ กระบวนการผลิตวัสดุ
2. ระยะเวลาการอบแห้ง อุณหภูมิ ความชื้น
3. กรรมวิธีในการขจัดน้ำจากวัสดุ
4. วิธีในการหาความชื้น(มาตรฐานแห้ง) และ วอเตอร์แอกทิวิทิ
5. วิธีในการทำให้เข้าสู่สภาวะสมดุล
6. การควบคุมวอเตอร์แอกทิวิทิ และ อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)

2.6 วิธีการวัดค่า วอเตอร์แอกทิวิทิ และไอโซเทอร์ม [7]

เทคนิคที่เป็นประโยชน์สำหรับการวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิทิในอาหารจัดลำดับดังนี้

2.6.1 Vapor Pressure Measurement (VPM)

2.6.2 Freezing Point depression

2.6.3 Osmotic Pressure Measurement (OPM)

2.6.4 Dew point hygrometer

2.6.5 Thermocouple psychrometer

2.6.6 Isopiestic Methods

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.7 The graphical interpolation method

2.6.8 Bithermal Equilibration method

2.6.9 Electric Hygrometers

2.6.10 Hair hygrometers

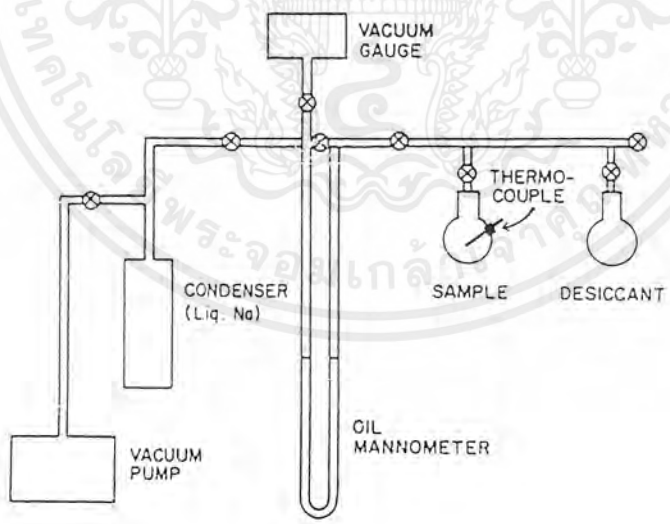
2.6.11 Tensiometers

2.6.12 Collaborative Studies

2.6.1 Vapor Pressure Measurement (VPM)

เนื่องจากวอเตอร์แอกทิวิทีมีความเกี่ยวข้องกับความดันไอที่ระบบสมดุล วิธีนี้เป็นการวัดโดยตรง (Direct Measurement) จากรูปที่ 2.9 ความดันของไอน้ำในสภาวะสมดุลจะถูกตรวจวัดโดยออยล์มาโนมิเตอร์หรือผลต่างความดัน ความถูกต้องของวิธีนี้จะแม่นยำในช่วงของค่าวอเตอร์แอกทิวิที 0.32 – 0.97

วัสดุที่ถูกบรรจุจะเป็นวัสดุที่ระเหยได้ง่าย ความดันไอน้ำที่มากจะมีผลทำให้อุณหภูมิไม่แน่นอนและอุณหภูมิการเข้าสู่สมดุลนาน วิธีนี้จะไม่เหมาะสำหรับน้ำมัน แต่จัดได้ว่าเป็นวิธีมาตรฐานวิธีหนึ่ง



รูปที่ 2.9 แสดงแผนภาพที่ใช้เทคนิคความดันไอ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 Freezing Point Depression and Boiling Point Elevation

การใช้ข้อมูลด้วยการลดลงของจุดเยือกแข็ง สามารถนำมาใช้ในการหาค่าวอเตอร์แอกทิวิทีได้โดยอาศัยหลักการของกฎของราอูล กล่าวว่าการลดลงของจุดเยือกแข็งของสารละลายจะสัมพันธ์โดยตรงกับการลดลงของความดันไอน้ำ ที่อยู่เหนือสารละลายเมื่อเทียบกับความดันไอน้ำเหนือน้ำบริสุทธิ์ ณ อุณหภูมิและความดันเดียวกัน วิธีนี้เหมาะที่จะวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิทีของอาหารในช่วง 0.98 - 1.00 จะมีความแม่นยำสูง เมื่อใช้วัดกับอาหารที่เป็นของเหลว มากกว่าการวัดอาหารที่เป็นของแข็ง

2.6.3 Osmotic Pressure Measurement (OPM)

วิธีนี้ไม่แพร่หลายในวงการอาหารมากนัก โดยจะทำการวัดที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก ในขณะที่ Cryoscope Osmometer จะวัดที่อุณหภูมิจุดเยือกแข็ง มีผู้ที่ได้ทำการทดลองโดยตรงคือ Williamson โดยได้ออกแบบ Porous - Disc Osmometer ซึ่งเป็นลักษณะของเยื่อบาง ๆ ใช้กับไอน้ำ วิธีนี้จะใช้ควบคุมอุณหภูมิที่สูงได้อย่างแม่นยำ

2.6.4 Dew point hygrometer

วิธีนี้อยู่บนพื้นฐานของการควบแน่นในการเปลี่ยนสถานะของไอน้ำที่ถูกทำให้เย็นที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง ปรากฏการณ์นี้สามารถเกิดขึ้นได้โดยใช้เทอร์โมอิเล็คตริกฮีทปั๊มและความแม่นยำอยู่ที่ 0.003 ที่วอเตอร์แอกทิวิทีในช่วง 0.72 - 1.00 ซึ่งเป็นช่วงที่กว้าง ถ้าใช้กับตัวอย่างของแข็งเวลาในการเข้าสู่สมดุลจะอยู่ที่ 2 - 3 ชั่วโมง

2.6.5 Thermocouple Psychrometer

วิธีนี้ทำการวัดที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก ตัวอย่างจะถูกทำให้สมดุลในแชมเบอร์และเทอร์โมคับเบิลซึ่งถูกให้ความเย็น น้ำจะถูกควบแน่นในเทอร์โมคับเบิล อัตราการระเหยของน้ำจะเป็นอิสระ วิธีนี้ได้นำมาใช้หาค่าวอเตอร์แอกทิวิทีของผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด แต่วิธีนี้สามารถวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิทีได้เฉพาะค่าที่ต่ำกว่า 0.95 ซึ่งในสภาวะนี้ไม่เพียงพอสำหรับการควบแน่นของน้ำในเทอร์โมคับเบิล

เมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีการพัฒนา Ten - Chamber Thermocouple Psychrometer ซึ่งสามารถวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิทีในอาหารได้หลายชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.6 Isopiestic Methods

วิธีนี้ใช้ในการตรวจสอบค่าวอเตอร์แอกทิวิทีในช่วง 0.80 - 0.99 ใช้กับตัวอย่างโปรตีนที่ 25 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 24 ชั่วโมงในการเข้าสู่สภาวะสมดุล หลังจากเข้าสู่สภาวะสมดุลจะได้ค่าความชื้นของโปรตีนและสามารถหาวอเตอร์แอกทิวิทีได้จากซอร์ปชั่นไอโซเทอร์ม แต่วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมนัก อีกวิธีหนึ่งซึ่งคล้ายคลึงกันได้แก่ การใช้กระดาษกรอง ซึ่งอ่านค่าวอเตอร์แอกทิวิทีได้ในช่วง 0.40 - 0.98

2.6.7 Graphical interpolation method

วิธีการคือนำอาหารไปวางไว้ในบรรยากาศที่ทราบค่าความชื้นสัมพัทธ์ และปล่อยให้เข้าสู่สมดุล โดยจะมีการดูดและคายความชื้นแลกเปลี่ยนกันระหว่าง บรรยากาศและอาหาร จากนั้นนำค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงมาเขียนกราฟ กับความชื้นสัมพัทธ์ แล้วหาจุดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก

2.6.8 Bithermal Equilibration Method

เป็นวิธีการที่ใช้สารละลายที่มีค่าวอเตอร์แอกทิวิทีต่าง ๆ กัน โดยเป็นระบบที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน สารละลายจะถูกออกแบบให้มีอุณหภูมิต่าง ๆ กัน Stokes ได้พัฒนาวิธีการโดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน แต่วิธีนี้เป็นวิธีการที่ใช้เวลาค่อนข้างมาก (ประมาณ24 ชั่วโมง) ซึ่งไม่นิยมในผลิตภัณฑ์อาหาร

2.6.9 Electric hygrometers

เป็นการวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิทีแบบทางอ้อม วิธีการนี้จะใช้เครื่องตรวจวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศเหนือตัวอย่างในภาชนะปิดที่เข้าใกล้สมดุลมากที่สุด ซึ่งถือว่าค่าที่ใช้ทดแทนค่าวอเตอร์แอกทิวิที โดยอาศัยการอิเล็กโตรไลท์สารละลายอิ่มตัวของเกลือ เช่น LiCl การวัดจะวัดในสภาวะสมดุล เมื่อใส่ตัวอย่างในเครื่องวัด โดยวิธีการนี้จะต้องมีการเปรียบเทียบค่าด้วยสารละลายที่ทราบค่าวอเตอร์แอกทิวิที ความถี่ของการปรับเทียบค่า ตัวเครื่องมือและวัสดุที่ใช้วัด ในการหาทุกครั้งจำเป็นที่จะต้องปรับเทียบค่ามากกว่า 1 – 2 ครั้งต่อสัปดาห์ จากการทดสอบค่าความถูกต้องเฉลี่ยเมื่อตัวอย่างที่วัดมีค่าวอเตอร์แอกทิวิทีเกินกว่า 0.90 ค่าความถูกต้องจะลดลง และค่าความถูกต้องของเครื่องมือ ในช่วงของค่าวอเตอร์แอกทิวิทีระหว่าง 0.32 – 0.97 มีค่าเท่ากับ 0.02 a_w unit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.10 Hair(Filament) Hygrometer

การตรวจวัดจะอยู่บนพื้นฐานของเส้นผมมนุษย์ และสังเคราะห์มาจากเส้นใยซึ่งมีค่า วอเตอร์แอกทิวิทีสูง วิธีนี้มีความเหมาะสมในการตรวจวัดผลิตภัณฑ์ประเภทเนื้อ ค่อนข้างที่จะใช้ต้นทุนต่ำแต่สามารถใช้อ้างอิงได้ไม่แพ้วิธีอื่น สามารถตรวจความแม่นยำได้ ไม่เกิน 0.01

2.6.11 Matric potential

Tensiometers ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง วิธีนี้สามารถวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิทีสูง ๆ ได้

เมื่อเร็ว ๆ นี้ Knutson ใช้ Tensiometer วัดค่าของอาหารประเภทเจลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน และได้พัฒนาโดย Labuza & Lewicki เป็นการศึกษาการกระจายตัวของน้ำในเจล ซึ่งเป็นวิธีเดียวกับ Tensiometer สามารถใช้วิธีนี้ในการหาการกระจายตัวของน้ำในหมากฝรั่ง

2.6.12 Collaborative Studies

ในปี 1976 Labuza ได้ศึกษาและรวบรวมเกี่ยวกับการวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิที ใน 2 ปีต่อมา Stoloff ได้ศึกษาความแม่นยำกับการทดลองถึง 38 การทดลองกับอาหาร 15 ชนิด กับสารละลายเกลือ ความแม่นยำของวิธีนี้อยู่ที่ 0.02 บางทีจะสามารถนำไปใช้โดยมีค่าความแม่นยำถึง 0.001

นอกจากนี้ยังมีวิธีที่ใช้ในการหาค่าวอเตอร์แอกทิวิทีและไอโซเทอร์มอีก เช่น Boiling Point Elevation, The Fett – Vos method และ Filter paper method เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 สมการที่ใช้ในการทำนาย วอเตอร์แอกทิวิทิ [11]

สมการที่ใช้ในการทำนายวอเตอร์แอกทิวิทิ มีดังนี้

ชื่อแบบจำลอง	ความชื้นสมดุล	ความชื้นสัมพัทธ์
Henderson	$M = \left[\frac{\ln(1-RH)}{-aT}\right]^{(1/b)}$	$1\text{-}RH = EXP(-aTM^{b})$
Chung-Pfost	$M = \frac{-1}{b}\ln\left[\frac{TLnRH}{-a}\right]$	$RH = EXP\left[\frac{-a}{T}EXP(-bM)\right]$
Modified Halsey	$M = \left[\frac{EXP(a-bT)}{-\ln RH}\right]^{(1/c)}$	$RH = EXP\left[-EXP(a+bT)\right]M^{-c}$
Chen-Clayton	$M = \frac{-1}{cT^{d}}\ln\left[\frac{LnRH}{-aT^{b}}\right]$	$RH = EXP\left[-aT^{b}EXP(cT^{d}M)\right]$
Henderson - Thomson	$M = \left[\frac{\ln(1-RH)}{a(t+b)}\right]^{1/c}$	$1-RH = EXP\left[-a(t+b)M^{c}\right]$

a, b, c, d	=	ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง
M	=	เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้ง
RH	=	ความชื้นสัมพัทธ์
T	=	อุณหภูมิ,องศาเคลวิน
t	=	อุณหภูมิ,องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีนักวิจัยหลายคนได้ศึกษาทดลองเกี่ยวกับวอเตอร์แอกทิวิทิ และไอโซเทอร์มของผักและผลไม้ ดังนี้

- G. Mazza, 1982 [14] ได้ศึกษาและทดลองหาไอโซเทอร์มของมันฝรั่งแผ่น สามพันธุ์ และหาโดยวิธีใช้สารละลายเกลือ โดยทำการทดลองที่สามอุณหภูมิ คือ 10, 25 และ 40 องศาเซลเซียส เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟระหว่างปริมาณความชื้น (มาตรฐานแห้ง) กับวอเตอร์แอกทิวิทิ ได้กราฟไอโซเทร์มที่มีรูปร่างโค้งกลับคล้ายตัว C หรือตัว S ซึ่งเป็นผลจากวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิ และการเพิ่มน้ำตาล ผลิตภัณฑ์แช่แข็งแห้งสามารถดูดซับไอน้ำได้มากกว่าวัสดุอบแห้งสุญญากาศ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการเพิ่มกลูโคส ซูโครส หรือ แลกโตส ในมันฝรั่งทำให้ ความชื้นสมดุลลดลง ในช่วงวอเตอร์แอกทิวิทิต่ำ และปานกลาง และพันธุ์ของมันฝรั่งไม่มีผลต่อการทดลอง

- R.J. Aguerre, C. Suarez และ P.E. Viollaz, 1983 [12] ได้ศึกษาและทดลองหาไอโซเทอร์มของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ในช่วงวอเตอร์แอกทิวิทิ จาก 0.036 ถึง 0.823 โดยใช้สมการวิเคราะห์ของ Henderson พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการดูดซึมน้ำ จะลดลงที่ ความชื้นสัมพัทธ์ เดียวกัน

- Hector A. Iglesias และ Jorge Chirife, 1984 [13] ได้ศึกษาถึงความเกี่ยวพันของความชื้นที่ BET โมโนเลเยอร์ ในอาหารกับอุณหภูมิต่าง ๆ ของอาหารต่างชนิดกัน ซึ่งผลการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและชนิดของอาหารที่มีผลต่อค่า BET มีความแตกต่างกันมาก ซึ่งทำให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับศึกษาการประมาณความสัมพันธ์ของค่า BET กับอุณหภูมิ

- G. Mazza, 1986 [15] ได้ศึกษาและทดลองเกี่ยวกับ ไอโซเทอร์ม และความชื้นที่โมโนเลเยอร์ ของถั่วดิบและถั่วที่สูญเสียน้ำหลังจากให้ความร้อนโดยความดัน โดยในการทดลองได้ใช้ถั่วทดลอง 3 พันธุ์ คือพันธุ์ เซนจูรี่, เอ็มพี888 และเอ็มพี889 ผลจากการทดลองพบว่า ไอโซเทอร์มของถั่วดิบกับถั่วที่ให้ความร้อนโดยความดัน ที่อุณหภูมิ 10, 25 และ 40 องศาเซลเซียส สามารถหาได้โดยใช้เทคนิคสารละลายเกลือมาตรฐานและแม้ว่าถั่วที่ใช้แต่ละพันธุ์จะมีส่วนประกอบแตกต่างกันแต่ในด้านความชื้นสมดุลไม่แตกต่างกันเลย นอกจากนี้ยังพบอีกว่าที่ 40 องศาเซลเซียส และ วอเตอร์แอกทิวิทิ 0.50 – 0.90 ความสามารถในการดูดซึมของถั่วดิบจะสูงกว่าถั่วที่ให้ความร้อนโดยความดัน และกราฟการดูดน้ำและการคายน้ำของไอโซเทอร์มที่ได้ทั้งหมดจะเป็นรูปโค้งกลับคล้ายตัว C หรือ S และปริมาณการดูดซึมน้ำที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่กำหนดให้จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง

- O.O. Ajibola, 1986 [11] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับซอร์ปชั่นไอโซเทอร์มของกล้วยหักมุกที่หลาย ๆ อุณหภูมิ โดยในการทดลองใช้กล้วยหักมุกสุกและไม่สุก และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10 – 90 % ข้อมูลจากการทดลองสรุปได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นสมดุลของกล้วยหักมุกสุกจะสูงกว่ากล้วยหักมุกที่ไม่สุกในทุกอุณหภูมิและทุก ความชื้นสัมพัทธ์ ที่ทำการทดลอง และการประมาณค่าคาดเคลื่อนมาตรฐานต่ำสุดของความชื้นสมดุล หาได้จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองของ Halsey นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการประมาณค่าคาดเคลื่อนมาตรฐานต่ำสุดของความชื้นสัมพัทธ์ของกล้วยหักมุกสุกหาได้จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองของ Halsey เช่นกัน ส่วนการประมาณค่าคาดเคลื่อนมาตรฐานต่ำสุดของ ความชื้นสัมพัทธ์ ของกล้วยหักมุกไม่สุก จะใช้ แบบจำลองของ Henderson แทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 การเตรียมตัวอย่างมะขาม (พันธุ์สีทอง ศรีชมภู และพันธุ์ขันตี)

1. ล้างมือ มีด เขียง และภาชนะที่เตรียมไว้ให้สะอาดก่อนทำการทดลอง
2. แยกมะขามพันธุ์สีทอง ศรีชมภู และพันธุ์ขันตีออกจากกัน
3. นำมะขามแต่ละพันธุ์มาแกะเปลือก และคัดเอาแต่เนื้อมะขามใส่ในภาชนะที่เตรียมไว้
4. ผสมเนื้อมะขามแต่ละพันธุ์ให้เป็นเนื้อเดียวกัน
5. นำพลาสติกใสมาครอบภาชนะที่ใส่เนื้อมะขามเพื่อป้องกันฝุ่นและจุลินทรีย์

3.2 การเตรียมสารละลายเกลืออิ่มตัว

1. เตรียมน้ำเดือดใส่ในขวดโหลขวดละ 50 กรัม เติมสารเคมีทีละน้อย คนสารให้ละลาย จนกระทั่งสารไม่สามารถละลายได้
2. ทิ้งขวดโหลไว้ให้เย็น ถ้ามีเกลือตกตะกอนแสดงว่าสารละลายอิ่มตัวแล้ว สามารถนำสารละลายไปใช้ได้ แต่ถ้าไม่ตกตะกอนแสดงว่ายังไม่อิ่มตัว ให้เติมสารเคมีลงไปอีกจนกระทั่งมีเกลือตกตะกอน
3. เตรียมสารละลายแต่ละชนิด 3 ขวดโหลเพื่อทำการทดลองมะขามสามพันธุ์พร้อมกัน

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างมะขามทั้งหมด

1. มะขามหวานพันธุ์สีทอง ศรีชมภู และพันธุ์ขันตีจำนวนหนึ่ง
2. ภาชนะสำหรับใส่มะขาม 3 อัน
3. พลาสติกใส
4. เขียง
5. มีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การเตรียมสารละลายเกลืออิ่มตัว

1. $MgCl_2$, $Mg(NO_3)_2$, NaCl, $(NH_4)_2SO_4$, KNO_3
2. ขวดโหล
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง
4. ตู้อบไฟฟ้าที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้
5. แท่งแก้วคนสารละลาย
6. ช้อนตักสาร
7. ภาชนะพลาสติกใส่สาร
8. เทอร์โมมิเตอร์
9. น้ำกลั่น

3.3.3 การทดลองหาปริมาณของแข็งของมะขาม

1. มะขามหวานที่เตรียมไว้เพื่อใช้ในการทดลอง
2. กระดาษฟอยด์
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง
4. ตู้อบไฟฟ้าที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้
5. เครื่องดูดความชื้น

3.3.4 การทดลองหาความชื้นสมดุล (a_w)ของมะขาม

1. มะขามที่เตรียมไว้เพื่อใช้ในการทดลอง
2. ขวดโหลสารละลายเกลืออิ่มตัวที่เตรียมไว้เพื่อใช้ในการทดลอง
3. ภาชนะพลาสติกขนาดเล็กที่ใช้ใส่มะขาม
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง
5. ตู้อบไฟฟ้าที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้

3.3.5 การวัดค่าความหวานของมะขาม

1. มะขามที่เตรียมไว้เพื่อใช้ในการทดลอง
2. บิกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 3 อัน
3. น้ำกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. แท่งแก้วคนสาร
5. เครื่องวัดดัชนีหักเห(Refractometer)

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การทดลองหาปริมาณของแข็งของมะขาม

1. นำมะขามที่เตรียมไว้มาชั่งน้ำหนัก โดยชั่งน้ำหนักพันธุ์ละ 3 ตัวอย่าง ๆ ละ 3 กรัม ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนอีกครั้ง บันทึกผล
2. ชั่งน้ำหนักกระดาษฟอยด์แล้วบันทึกผล
3. นำมะขามที่ชั่งน้ำหนักแล้วมาใส่ในกระดาษฟอยด์ นำไปชั่งน้ำหนักรวม บันทึกผล
4. นำเข้าตู้อบ ๆ ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส
5. เมื่อครบ 30 ชั่งโมงนำออกมาชั่งน้ำหนัก บันทึกผล จากนั้นนำออกมาชั่งน้ำหนักทุก 3 ชั่วโมง บันทึกผล อบจนกระทั่งน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง(น้ำหนักแห้ง) บันทึกน้ำหนักสุดท้ายที่ได้
6. นำน้ำหนักสุดท้ายที่ไม่เปลี่ยนแปลงมาคำนวณหาน้ำหนักแห้งเฉลี่ย คำนวณเปอร์เซ็นต์ของแข็ง จาก

$$\% \text{ Solid} = \frac{\text{น้ำหนักของแข็ง}}{\text{น้ำหนักทั้งหมด}}$$

3.4.2 การหาค่า Total Soluble Solid ของมะขาม

1. ขั้นตอนการวัดค่า Total Soluble Solid (%BRIX)
    1.1 นำมะขามที่เตรียมไว้แต่ละพันธุ์ประมาณพันธุ์ละ 3 กรัม มาใส่ในบิกเกอร์แต่ละอัน
    1.2 ชั่งน้ำหนักน้ำกลั่นให้ได้ประมาณ 3 กรัม เทผสมลงในบิกเกอร์
    1.3 บดให้เนื้อมะขามผสมกับน้ำกลั่นเป็นเนื้อเดียวกัน
    1.4 นำของผสมไปวัดค่า Total Soluble Solid จากเครื่องวัดค่าดัชนีหักเหของแสง (Refractometer)
    1.5 อ่านค่าความหวานจากเครื่องวัด และบันทึกผลเพื่อนำไปคำนวณในสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ขั้นตอนการคำนวณ

2.1 นำค่าที่อ่านได้จากเครื่องมาเทียบกลับที่ 100%

สูตรคำนวณ ค่า Total Soluble Solid = $\frac{\text{ค่าความหวานจากเครื่องวัด} * 100}{(\text{น้ำหนักมะขาม}/\text{น้ำหนักน้ำ}) * 100}$

2.2 บันทึกผล

3.4.3 การทดลองหาความชื้นสมดุล (a_w) ของมะขาม

1. เตรียมภาชนะพลาสติกที่จะใช้ในการทดลอง นำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกผล
2. นำมะขามทั้งสามพันธุ์ที่เตรียมไว้มาชั่งน้ำหนักพันธุ์ละ 15 ตัวอย่าง ๆ ละ1 กรัม ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนอีกครั้ง บันทึกผล
3. นำตัวอย่างมะขามทั้งสามพันธุ์มาใส่ในภาชนะพลาสติกที่เตรียมไว้ ชั่งน้ำหนักรวม บันทึกผล
4. นำตัวอย่างมะขามแต่ละพันธุ์ไปแขวนไว้ในขวดโหล ที่มีสารละลายเกลืออิ่มตัว 5 ชนิด (สารละลายแต่ละชนิดมี 3 ขวด) โดยแต่ละขวดแขวนมะขาม 3 ตัวอย่างโดยให้แขวนเหนือสารละลายเกลืออิ่มตัวประมาณ 3 เซนติเมตร
5. นำขวดโหลใส่ในตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 36 องศาเซลเซียส
6. การแขวนมะขามและการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 แสดงการแขวนมะขามเพื่อใช้ในการทดลอง

รูปที่ 3.2 แสดงการทดลองหาค่าวอเตอร์แอกทิวิทิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. นำภาชนะพลาสติกที่มีมะขามออกมาชั่งน้ำหนักอย่างรวดเร็วทุก 24 ชั่งโมง บันทึกผล นำออกมาชั่งจนกระทั่งน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง (น้ำหนักสมดุล) บันทึกผล
8. นำน้ำหนักรวมก่อนอบลบด้วยน้ำหนักที่สมดุล (น้ำหนักเฉลี่ย) บันทึกผล
9. หาค่าวอเตอร์แอกทิวิทิของมะขามแต่ละพันธุ์ โดยการพล็อตกราฟระหว่างค่าวอเตอร์แอกทิวิทิของสารละลายเกลือต่าง ๆ กับค่าที่บันทึกในข้อ 3.4.3.8 โดยแยกตามพันธุ์มะขาม ค่า %RH ของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่ใช้แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่า %RH ของสารละลายเกลืออิ่มตัว 5 ชนิดที่อุณหภูมิต่าง ๆ [10]

สารละลายเกลืออิ่มตัว	% RH		
	36 องศาเซลเซียส	45 องศาเซลเซียส	60 องศาเซลเซียส
$MgCl_2$	31.96	31.1	29.26
$Mg(NO_3)_2$	49.61	46.93	42.46
NaCl	74.83	74.52	74.5
$(NH4)_2SO_4$	80.2	79.56	78.6
KNO_3	90.44	87.03	84.29

3.5 การหาไอโซเทอร์มของมะขาม

1. นำน้ำหนักสมดุลของมะขามที่สารละลายเกลือต่าง ๆ จากข้อ 3.4.3.7 มาคำนวณหาปริมาณความชื้นสมดุล(dry basis) จาก

$$\% \text{ ความชื้นสมดุล (dry basis)} = \frac{\text{น้ำหนักที่สมดุล} - \text{น้ำหนักของแข็ง}}{\text{น้ำหนักของแข็ง}} * 100$$

2. สร้างเส้นไอโซเทอร์มระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นสมดุลกับค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลือต่าง ๆ ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ จะได้ไอโซเทอร์มของมะขาม

3. ทำการทดลองซ้ำข้อ 3.4.3 และ 3.5 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิในตู้อบเป็น 45 และ 60 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลการทดลองหาปริมาณของแข็งของมะขาม

ผลการทดลองหาปริมาณของแข็งของมะขามพันธุ์ศรีชมภู สีทองและพันธุ์ขันตี คือ ร้อยละ 83.94 ,80.23, และ 83.42 ตามลำดับ

4.2 ผลการวัด Total Soluble Solid

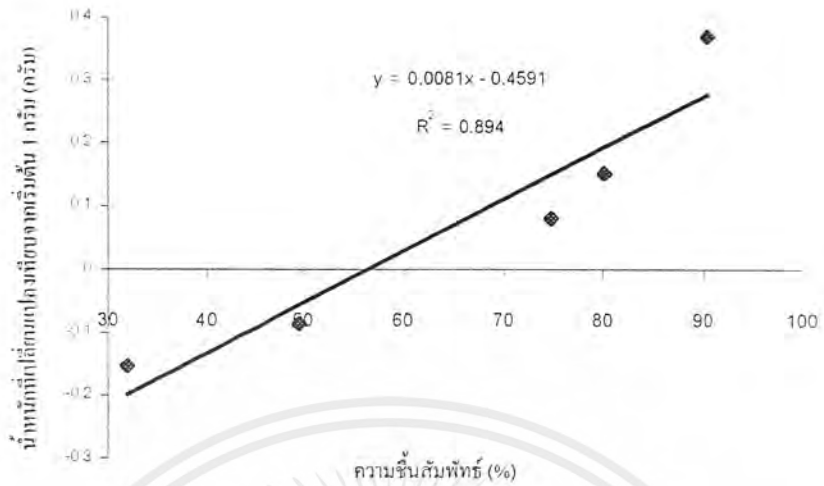
ตารางที่ 4.1 แสดง Total Soluble Solid ที่ วัดได้

พันธุ์มะขาม	Total Soluble Solid (°BRIX)
สีทอง	45.15
สีชมพู	44.86
ขันตี	26.11

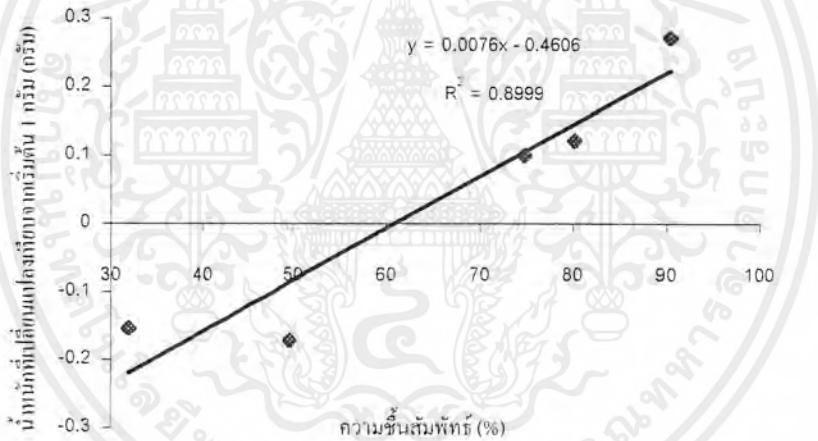
4.3 ค่าวอเตอร์แอกทิวิทีของมะขามที่อุณหภูมิต่าง ๆ

รูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 แสดงการหาค่าวอเตอร์แอกทิวิที โดยวิธี Graphical interpolations method ค่าวอเตอร์แอกทิวิที แสดงดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

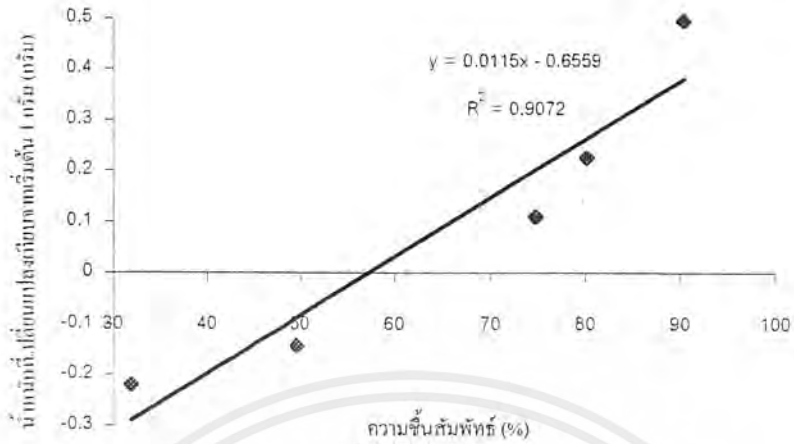


รูปที่ 4.1 ค่าวอเตอร์แอกทิวิทีของมะขามพันธุ์ศรีชมภูที่ อุณหภูมิ 36 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.2 ค่าวอเตอร์แอกทิวิทีของมะขามพันธุ์สีทองที่ อุณหภูมิ 36 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ค่าวอเตอร์แอกทิวิทีของมะขามพันธุ์ขันตีที่ อุณหภูมิ 36 องศาเซลเซียส

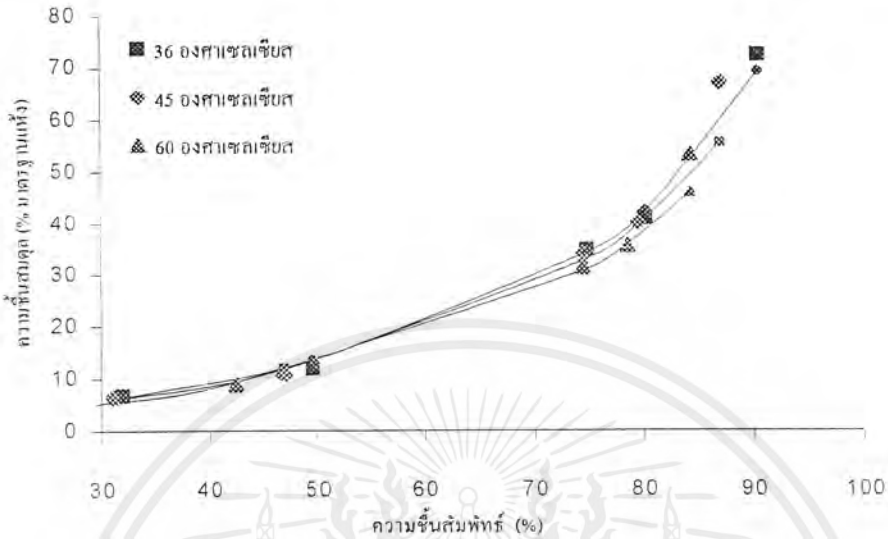
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าวอเตอร์แอกทิวิทีของมะขามที่อุณหภูมิต่าง ๆ

พันธุ์มะขาม	ค่าวอเตอร์แอกทิวิทีที่อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		
	36	45	60
ศรีชมภู	0.56	0.55	0.64
สีทอง	0.60	0.59	0.60
ขันตี	0.57	0.58	0.62

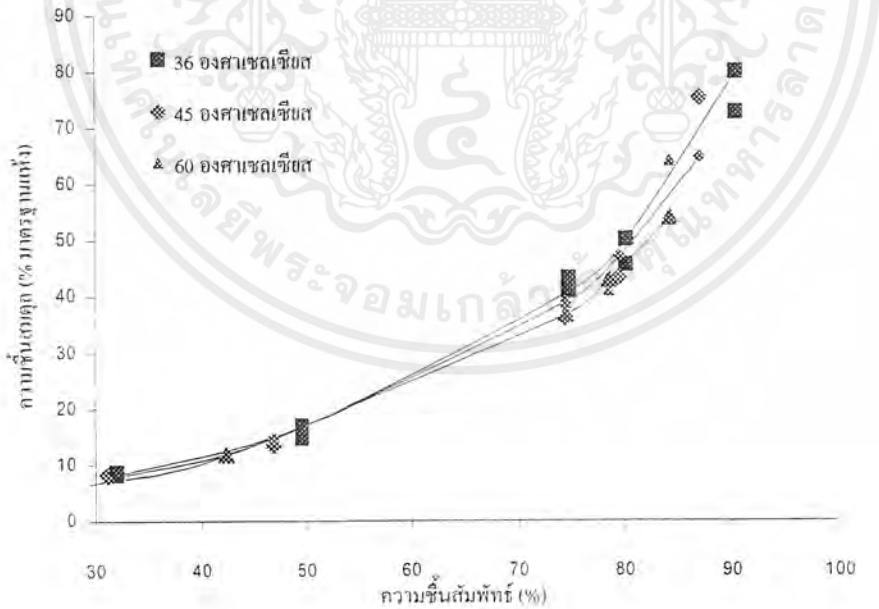
จากตารางที่ 4.2 พบว่ามะขามแต่ละพันธุ์ที่อุณหภูมิเดียวกันในช่วง 36 – 45 องศาเซลเซียส มีค่าวอเตอร์แอกทิวิทีแตกต่างกันโดยพันธุ์สีทองมีค่าวอเตอร์แอกทิวิทีสูงที่สุดรองลงมาคือ พันธุ์ขันตีและศรีชมภู ตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พันธุ์ศรีชมภู มีค่าวอเตอร์แอกทิวิทีสูงที่สุดรองลงมาคือพันธุ์ขันตีและสีทอง ตามลำดับ ซึ่งจากค่าวอเตอร์ที่ได้จะเห็นว่าค่าวอเตอร์แอกทิวิทีขึ้นอยู่กับทั้งองค์ประกอบของเนื้อมะขาม และ อุณหภูมิ เนื่องจากมะขามแต่ละพันธุ์มีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทำนายค่าไอโซเทอร์มของมะขามโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson

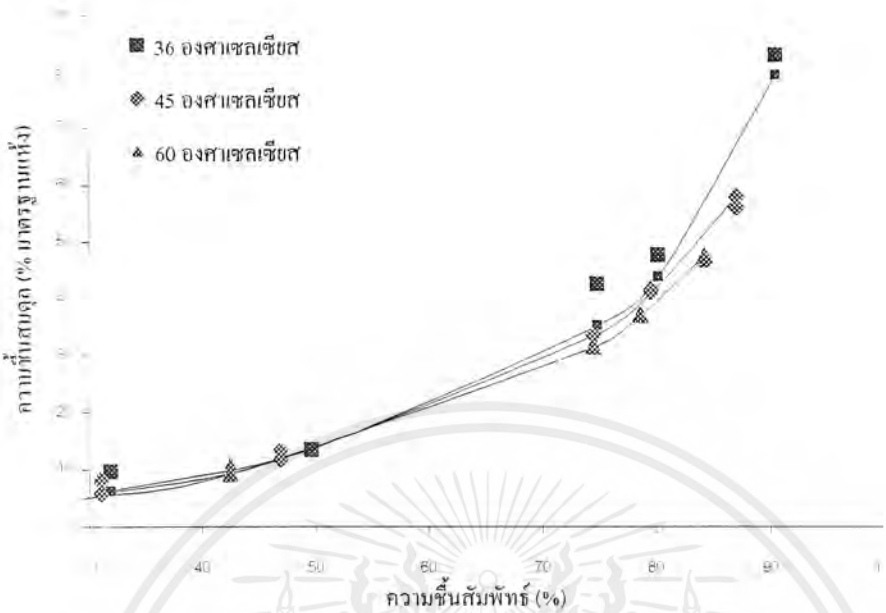


รูปที่ 4.4 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับไอโซเทอร์มโดยใช้แบบจำลองของ Henderson กับมะขามพันธุ์ศรีชมภู



รูปที่ 4.5 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับไอโซเทอร์มโดยใช้แบบจำลองของ Henderson กับมะขามพันธุ์สีทอง

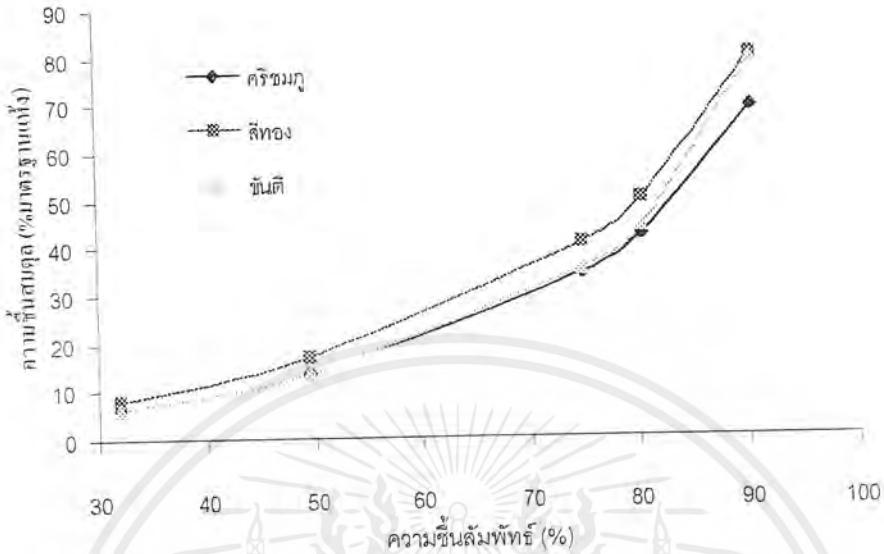
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



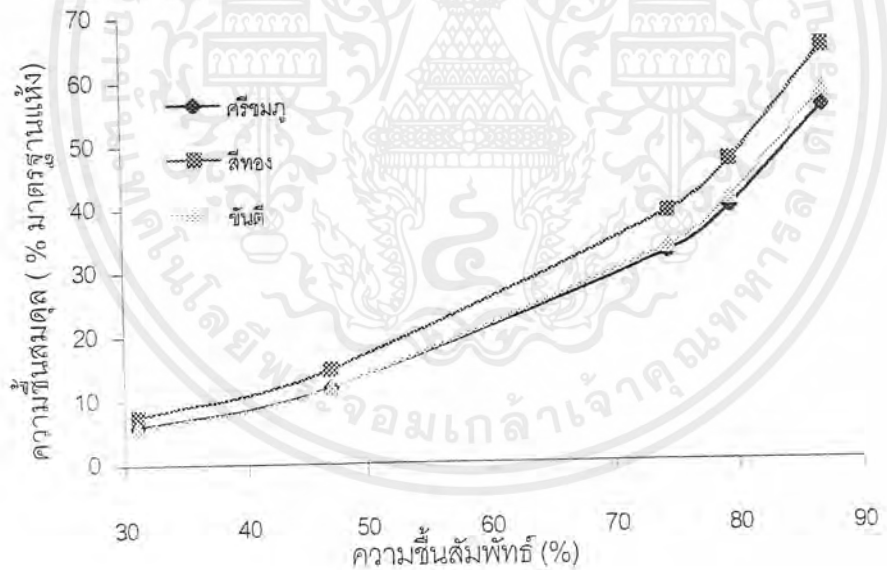
รูปที่ 4.6 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับไอโซเทอร์มโดยใช้แบบจำลองของ Henderson กับมะขามพันธุ์ขันตี

จากรูปที่ 4.4 , 4.5 และ 4.6 แสดงไอโซเทอร์มของมะขามพันธุ์ศรีชมภู สีทอง และพันธุ์ขันตี โดย ทั้ง 3 พันธุ์ ค่าไอโซเทอร์มที่อุณหภูมิ 36 องศาเซลเซียส จะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Aguerre และ Suarez

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

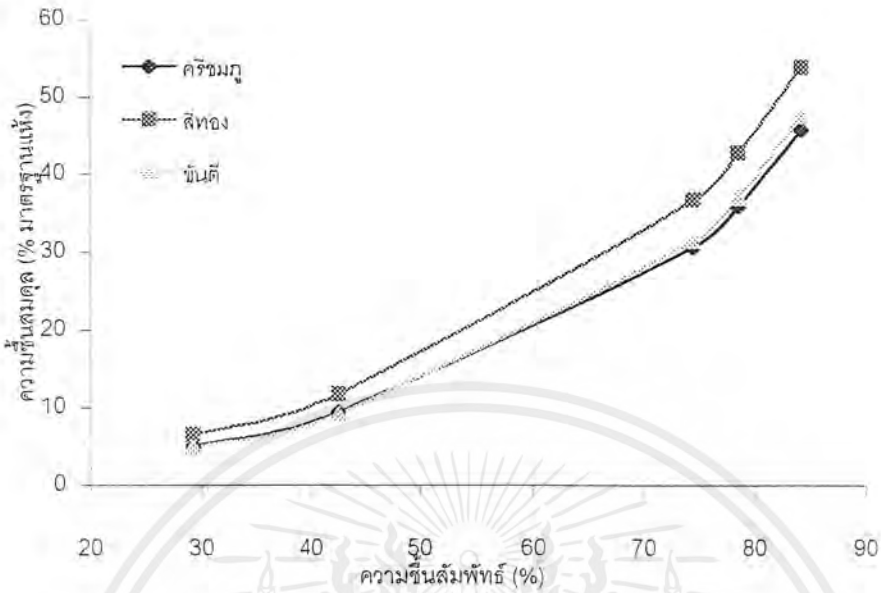


รูปที่ 4.7 ไอโซเทอร์มของมะขามที่อุณหภูมิ 36 องศาเซลเซียสโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของHenderson



รูปที่ 4.8 ไอโซเทอร์มของมะขามที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของHenderson

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ไอโซเทอร์มของมะขามที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของHenderson

จากรูปที่ 4.7 , 4.8 และ 4.9 ซอร์ปชั่นไอโซเทอร์มของมะขามพันธุ์สีทองมีค่าสูงกว่ามะขามพันธุ์สีชมภูและขันตีทุกอุณหภูมิที่ทดลอง

4.5 การหาค่าพารามิเตอร์ a และ b ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson [16]

จากสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson

$$1 - RH = EXP(-aTM^{b})$$

หาค่าพารามิเตอร์ a และ b โดยใช้ประยุกต์การถดถอยแบบเชิงเส้น

$$\ln(1 - RH) = \ln(EXP(-aTM^{b}))$$

$$\ln(1 - RH) = -aTM^{b}$$

$$\ln\ln(1/(1-RH)) = aTM^{b}$$

$$\ln\ln(1/(1-RH)) = \ln a + \ln T + b\ln M$$

เขียนให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$y = a_0 + x1 + bx2$$

ค่าความผิดพลาดทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากข้อมูลทั้งหมดเขียนได้ดังนี้

$$E = \sum_{i=1}^{n}[y_i - y(x)]^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \sum_{i=1}^{n}[y_i - (a_0 + x_1 + bx_2)]^2$$

$$= \sum_{i=1}^{n}[y_1^2 - 2y_1(a_0 + x_1 + bx_2) + (a_0 + x_1 + bx_2)^2]$$

$$= \sum_{i=1}^{n}[y_1^2 - 2y_1a_0 - 2y_1x_1 - 2y_1bx_2 + a_0^2 + x_1^2 + (bx_2)^2 + 2a_0x_1 + 2a_0bx_2 + 2x_1bx_2]$$

คำนวณหาค่า a และ b โดยวิธีกำลังสองน้อยสุด(least – squares) นั่นคือ

$$\partial E / \partial a_0 = 0$$

และ

$$\partial E / \partial b = 0$$

จะได้

$$\sum_{i=1}^{n}[-2y_1 + 2a_0 + 2x_1 + 2bx_2] = 0$$

$$\sum_{i=1}^{n}[y_1 - a_0 - x_1 - bx_2] = 0 \quad \text{——————} \quad (1)$$

และ

$$\sum_{i=1}^{n}[-2y_ix_2 + 2bx_2^2 + 2a_0x_2 + 2x_1x_2] = 0$$

$$\sum_{i=1}^{n}[y_ix_2 - bx_2^2 - a_0x_2 - x_1x_2] = 0 \quad \text{——————} \quad (2)$$

แก้สมการ (1) กับ (2) หาค่าตัวแปร a_0 และ b

ค่าพารามิเตอร์ a และ b คำนวณจากความสัมพันธ์

$$a_0 = \ln a$$

$$b = b$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงการคำนวณค่าพารามิเตอร์ a และ b ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson

ความชื้นสัมพัทธ์	ความชื้นสมดุล	T	y	x1	x2	x22	yx2	x1x2
0.3196	0.0666	309	-0.9543	5.733	-2.710	7.342	2.586	-15.535
0.4961	0.1178	309	-0.3778	5.733	-2.139	4.574	0.808	-12.261
0.7483	0.3459	309	0.3217	5.733	-1.062	1.127	-0.342	-6.087
0.8020	0.4070	309	0.4821	5.733	-0.899	0.808	-0.433	-5.154
0.9044	0.7220	309	0.8534	5.733	-0.326	0.106	-0.278	-1.868
0.3110	0.0648	318	-0.9875	5.762	-2.737	7.489	2.702	-15.768
0.4693	0.1067	318	-0.4564	5.762	-2.238	5.007	1.021	-12.894
0.7452	0.3400	318	0.3128	5.762	-1.079	1.164	-0.338	-6.217
0.7956	0.3988	318	0.4623	5.762	-0.919	0.845	-0.425	-5.297
0.8703	0.6684	318	0.7142	5.762	-0.403	0.162	-0.288	-2.321
0.2926	0.0392	333	-1.0609	5.808	-3.239	10.493	3.437	-18.815
0.4246	0.0878	333	-0.5930	5.808	-2.433	5.921	1.443	-14.133
0.7450	0.3130	333	0.3122	5.808	-1.162	1.349	-0.363	-6.746
0.7860	0.3537	333	0.4329	5.808	-1.039	1.080	-0.450	-6.037
0.8429	0.5305	333	0.6157	5.808	-0.634	0.402	-0.390	-3.682
		sum	0.0775	86.518	-23.018	47.871	8.691	-132.82

	y	x1	x2	X22	yx2	x1x2
sum	1.1655	155.83	-40.125	82.698	14.329	-231.75
	a0	b	a			
	-4.598	0.759	0.010			

จากการหาค่า พารามิเตอร์ a และ b ของมะขาม ทั้ง 3 พันธุ์ได้ค่า a และ b ดังตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการแก้สมการของ Henderson

พันธุ์	ค่าพารามิเตอร์	
	a	b
ศรีชมภู	0.0100	0.7588
สีทอง	0.0096	0.7338
ขันตี	0.0090	0.7915

ใช้การวิเคราะห์ทางสถิติประมาณค่าคลาดเคลื่อนของการทดลองเมื่อเทียบกับสมการของ Henderson จากสูตร

$$s.d. = [\sum_{i=1}^{n}((Mi - Pvi)^2/(N-1))]^2$$

เมื่อ

Mi = ความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลอง

PV = ความชื้นสมดุลจากแบบจำลอง

ตารางที่ 4.5 ค่าคลาดเคลื่อนของการทดลองเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากสมการของ Henderson

พันธุ์	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคลาดเคลื่อน (%)
ศรีชมภู	36	2.6175
	45	5.9722
	60	3.7535
สีทอง	36	5.1813
	45	6.3122
	60	5.3780
ขันตี	36	5.8707
	45	1.7812
	60	1.9466

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อแนะนำ

5.1 สรุปผล

1. ซอร์ปชั่นไอโซเทอร์มของมะขามพันธ์สีทองมีค่าสูงกว่าพันธุ์สีชมภูและขันตีทุกอุณหภูมิและทุกความชื้น สัมพัทธ์ที่ทดลอง
2. สามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson มาทำนายซอร์ปชั่นไอโซเทอร์มของมะขามหวานพันธุ์ศรีชมภู สีทองและขันตีที่อุณหภูมิ 36 , 45 และ 60 องศาเซลเซียสได้

5.2 ข้อแนะนำ

1. ควรทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบกับซอร์ปชั่นไอโซเทอร์มของมะขามแต่ละพันธุ์
2. ควรทำการทดลองที่อุณหภูมิและที่ความชื้นสัมพัทธ์อื่น ๆ เพื่อหาความชื้นที่ถูกต้องมากขึ้น
3. ควรทดลองวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. Prasong Siriwangwilaichat. 1993. The effect of processing parameters on the quality of tamarinds concentrate. Asian Institute of technology .Bangkok.
2. กระทรวงพาณิชย์. 2542. มะขามหวาน . ชัยภูมิ. หน้า 1 – 31 .
3. มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช. 2539. เคมีและจุลชีววิทยาของอาหาร. สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์.นนทบุรี. หน้า 21 – 34.
4. อภิรักษ์ ศรีชมภู. 2541. โครงการออกแบบปรับปรุงเครื่องอบไล่ความชื้นฝักมะขาม. คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพมหานคร. หน้า 6 – 11.
5. กองแผนงานกรมส่งเสริมการเกษตร. 2541. สถิติการปลูกไม้ผล – ไม้ยืนต้น ปี 2538 . กรมส่งเสริมการเกษตร.กรุงเทพมหานคร. หน้า 107 – 127.
6. รัชนี ยืนยาว . 2537. การศึกษาค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบเครื่องอบแห้งเมล็ดพริกไทย. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพมหานคร. หน้า 8 – 24.
7. Henry K. 1986. Physical and chemical properties of food . Washington state University. Washington, DC, pp. 138 – 177.
8. วิฑูรย์ พิมพ์สวัสดิ์. 2539. เครื่องวัด water activity ของผลิตภัณฑ์อาหาร. คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพมหานคร. หน้า 1 – 12.
9. Louis B. and R. Beuchat.. 1987. Water Activity: Theory and Applications to Food. Marcel Dekker. United States of America.
10. Theodore P. 1984. Moisture Sorption: Practical Aspects of Isotherm Measurement and Use. American Association of Cereal Chemists. USA
11. Ajibola, O.O. 1986. Desorption Isotherm for plantain at Several Temperatures. J. Food Sci.51.pp.169 – 171.
12. Aguerre, R.J.,C. Suarez and P.E. Viollaz .1983. Moisture desorption isotherms of rough rice . J. Food Technol.18. pp. 345 – 351.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. Hecter, A., Iglesias and Jorge Chirefc. 1984. Technical note : Correlation of BET monolayer moisture content in foods with temperature. J. Food Technol. 19. pp. 503 – 506.

14. Mazza, G. 1982. Moisture sorption isotherm of potato slices. J. Food Technol. 17. pp. 47 – 54.

15. Mazza, G. 1986. Technical note: Sorption isotherms and monolayer moisture content of rawpear, and peas dehydrated after pressure cooking. J.Food Technol. 21. pp 503 – 507.

16. ปราโมทย์ เดชะอำไพ. 2541. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร. หน้า 179 - 194.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีการคำนวณ

1. การคำนวณหาปริมาณของแข็ง
2. การคำนวณหาความชื้นสมดุล
   - จากการทดลอง
   - จากสมการการทำนายของ Henderson

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของแข็ง

นำมะขามที่ทราบน้ำหนักแน่นอนไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 60 จนน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง ชั่งน้ำหนักของแข็ง แล้วคำนวณเปอร์เซ็นต์ของแข็งจาก

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของแข็ง} = \frac{\text{น้ำหนักของแข็ง}}{\text{น้ำหนักทั้งหมด}}$$

2. การคำนวณหาความชื้นสมดุล

- จากการทดลอง

การทดลองทราบน้ำหนักมะขามเริ่มต้น และทำการทดลองหาความชื้นสมดุลโดยวิธีสถิตจนถึงสมดุล จะได้น้ำหนักสมดุลของมะขาม แล้วนำมาคำนวณโดยใช้ของแข็งจากการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของแข็งในข้อ 1 โดย

1. ปริมาณความชื้นแบบมาตรฐานเปียก (wet basis)

เป็นอัตราร้อยละของน้ำต่อน้ำหนักทั้งหมดของวัสดุ คำนวณจาก

$$\%\text{ ความชื้นมาตรฐานเปียก} = \frac{\text{น้ำหนักของน้ำในวัสดุ} * 100}{\text{น้ำหนักของวัสดุทั้งหมด}}$$

$$= \frac{\text{น้ำหนักของน้ำในวัสดุ} * 100}{\text{น้ำหนักของวัสดุที่แห้ง} + \text{น้ำหนักของน้ำในวัสดุ}}$$

หรือ % ความชื้น $M_w = W_m / W_t * 100$

$$= \frac{W_m}{W_m + W_{dm}} * 100$$

เมื่อ

W_m = น้ำหนักน้ำในวัสดุ

W_t = น้ำหนักของวัสดุทั้งหมด

W_{dm} = น้ำหนักของวัสดุที่แห้ง

หรือ % ความชื้น $M_w = (w - d) / w * 100$

เมื่อ

M_w = ความชื้นมาตรฐานเปียก, จุดทศนิยม

w = มวลของของแข็งและน้ำ, กรัม

d = มวลของของแข็ง, กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปริมาณความชื้นแบบมาตรฐานแห้ง (Dry basis)
เป็นร้อยละของน้ำหนักน้ำต่อน้ำหนักวัสดุที่แห้ง คำนวณได้จาก

$$\% \text{ ความชื้นมาตรฐานแห้ง} = \frac{\text{น้ำหนักของน้ำในวัสดุ} * 100}{\text{น้ำหนักของวัสดุที่แห้ง}}$$

หรือ % ความชื้น $M_d = W_m / W_{dm} * 100$

เมื่อ

M_d = เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง

W_m = น้ำหนักน้ำในวัสดุหน่วยเป็นกรัม

W_{dm} = น้ำหนักของวัสดุที่แห้งหน่วยเป็นกรัม

หรือ % ความชื้น $M_d = (w - d) / d * 100$

เมื่อ

M_d = เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง

d = มวลของของแข็งหน่วยเป็นกรัม

w = มวลของของแข็งและน้ำหน่วยเป็นกรัม

- จากสมการการทำนายของ Henderson

$$M = \left[\frac{\ln(1 - RH)}{-aT}\right]^{(1/b)}$$

เมื่อ

M = ความชื้นมาตรฐานแห้ง

RH = ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

a,b = ค่า พารามิเตอร์ของแบบจำลอง

T = อุณหภูมิ ,องศาเคลวิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

1. การหาปริมาณของแข็ง
2. การหาความชื้นสมดุล
3. การหาค่าวอเตอร์แอกทิวิที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข. 1 ข้อมูลจากการทดลองหาปริมาณของแข็งของมะขาม

พันธุ์	ตัวอย่าง	น้ำหนักมะขามก่อนอบ (กรัม)	น้ำหนักมะขามหลังอบ (กรัม)	%ปริมาณของแข็ง	%ปริมาณของแข็งเฉลี่ย
ศรีชมภู	1	3.0213	2.5422	84.14	83.94
	2	3.0576	2.5711	84.09	
	3	2.9841	2.494	83.58	
สีทอง	1	2.9746	2.3858	80.21	80.23
	2	3.0022	2.4061	80.14	
	3	2.9916	2.4038	80.35	
ขันตี	1	3.0425	2.5373	83.40	83.42
	2	2.963	2.4692	83.33	
	3	3.043	2.5415	83.52	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข. 2 การคำนวณหาค่าความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิ 36 องศาเซลเซียส

โหลที่	น้ำหนักมะขามเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักสมดุล (กรัม)	%ของแข็งทั้งหมด	น้ำหนักของแข็ง (กรัม)	น้ำหนักน้ำ (กรัม)	%ความชื้นสมดุล (มาตรฐานแห้ง)
ศรีชมภู						
1	1.0487	0.9389	0.8394	0.8803	0.0586	6.66
2	1.0243	0.9611	0.8394	0.8598	0.1013	11.78
3	1.0493	1.1855	0.8394	0.8808	0.3047	34.59
4	1.0301	1.2165	0.8394	0.8646	0.3519	40.70
5	1.0771	1.5568	0.8394	0.9041	0.6527	72.20
สีทอง						
1	1.0256	0.8940	0.8023	0.8228	0.0712	8.66
2	1.0921	1.0052	0.8023	0.8762	0.1290	14.73
3	1.0473	1.2014	0.8023	0.8403	0.3611	42.98
4	1.0453	1.2194	0.8023	0.8386	0.3807	45.40
5	1.1130	1.5409	0.8023	0.8930	0.6479	72.56
ขันตี						
1	1.1341	1.0363	0.8342	0.9460	0.0903	9.54
2	1.0879	1.0282	0.8342	0.9075	0.1207	13.30
3	1.0798	1.2842	0.8342	0.9008	0.3834	42.56
4	1.0066	1.2397	0.8342	0.8397	0.4000	47.64
5	1.0295	1.5694	0.8342	0.8588	0.7106	82.75

โหลที่ 1 = แมกนีเซียมคลอไรด์

โหลที่ 2 = แมกนีเซียมไนเตรท

โหลที่ 3 = โซเดียมคลอไรด์

โหลที่ 4 = แอมโมเนียมซัลเฟต

โหลที่ 5 = โพแทสเซียมไนเตรท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข. 3 การคำนวณหาค่าความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

โหลดที่	น้ำหนักมะขามเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักสมดุล (กรัม)	%ของแข็งทั้งหมด	น้ำหนักของแข็ง (กรัม)	น้ำหนักน้ำ (กรัม)	%ความชื้นสมดุล (มาตรฐานแห้ง)
ศรีชมภู						
1	1.0300	0.9206	0.8394	0.8646	0.0560	6.48
2	1.0572	0.9821	0.8394	0.8874	0.0947	10.67
3	1.0289	1.1573	0.8394	0.8637	0.2936	34.00
4	1.0392	1.2202	0.8394	0.8723	0.3479	39.88
5	1.0570	1.4803	0.8394	0.8872	0.5931	66.84
สีทอง						
1	1.0304	0.8944	0.8023	0.8267	0.0678	8.20
2	1.0462	0.9512	0.8023	0.8393	0.1118	13.32
3	1.0367	1.1302	0.8023	0.8317	0.2985	35.89
4	1.0428	1.1966	0.8023	0.8366	0.3600	43.03
5	1.0766	1.5133	0.8023	0.8638	0.6496	75.20
ขันตี						
1	1.0279	0.9267	0.8342	0.8575	0.0692	8.07
2	1.0608	1.0018	0.8342	0.8849	0.1169	13.21
3	1.0560	1.1768	0.8342	0.8809	0.2959	33.59
4	1.0564	1.2475	0.8342	0.8812	0.3663	41.56
5	1.0511	1.3674	0.8342	0.8768	0.4906	55.95

โหลดที่ 1 = แมกนีเซียมคลอไรด์

โหลดที่ 2 = แมกนีเซียมไนเตรท

โหลดที่ 3 = โซเดียมคลอไรด์

โหลดที่ 4 = แอมโมเนียมซัลเฟต

โหลดที่ 5 = โพแทสเซียมไนเตรท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข. 4 การคำนวณหาค่าความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

โหลดที่	น้ำหนักมะขามเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักสมดุล (กรัม)	%ของแข็งทั้งหมด	น้ำหนักของแข็ง (กรัม)	น้ำหนักน้ำ (กรัม)	%ความชื้นสมดุล (มาตรฐานแห้ง)
ศรีชมภู						
1	1.0952	0.9554	0.8394	0.9193	0.0360	3.92
2	1.0655	0.9728	0.8394	0.8944	0.0785	8.87
3	1.0545	1.1622	0.8394	0.8851	0.2770	31.30
4	1.0952	1.2444	0.8394	0.9193	0.3251	35.37
5	1.0704	1.3751	0.8394	0.8985	0.4766	53.50
สีทอง						
1	1.1257	0.9674	0.8023	0.9031	0.0643	7.12
2	1.0686	0.9540	0.8023	0.8574	0.0966	11.27
3	1.0699	1.1889	0.8023	0.8584	0.3306	38.51
4	1.0534	1.1890	0.8023	0.8451	0.3439	40.69
5	1.0371	1.3638	0.8023	0.8320	0.5317	63.91
ขันตี						
1	1.0920	0.9569	0.8342	0.9110	0.0460	5.05
2	1.0241	0.9477	0.8342	0.8543	0.0934	10.93
3	1.0451	1.1527	0.8342	0.8719	0.2808	32.21
4	1.0868	1.2432	0.8342	0.9066	0.3366	37.13
5	1.0392	1.2691	0.8342	0.8669	0.4023	46.40

โหลดที่ 1 = แมกนีเซียมคลอไรด์

โหลดที่ 2 = แมกนีเซียมไนเตรท

โหลดที่ 3 = โซเดียมคลอไรด์

โหลดที่ 4 = แอมโมเนียมซัลเฟต

โหลดที่ 5 = โพแทสเซียมไนเตรท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข. 5 การคำนวณหาค่าวอเตอร์แอกทิวิทีของมะขามที่ 36 องศาเซลเซียส

โหลที่	น้ำหนักเริ่มต้น(กรัม)	น้ำหนักสมดุล(กรัม)	น้ำหนักเปลี่ยนแปลง เทียบจากเริ่มต้น 1 กรัม
ศรีชมภู			
1	1.0487	0.9389	-0.1534
2	1.0243	0.9611	-0.086
3	1.0493	1.1855	0.0805
4	1.0301	1.2165	0.1508
5	1.0771	1.5568	0.3682
สีทอง			
1	1.0256	0.894	-0.15392
2	1.0921	1.0052	-0.17167
3	1.0473	1.2014	0.09984
4	1.0453	1.2194	0.121255
5	1.113	1.5409	0.271456
ขันตี			
1	1.1341	1.0363	-0.22034
2	1.0879	1.0282	-0.14278
3	1.0798	1.2842	0.109494
4	1.0066	1.2397	0.224972
5	1.0295	1.5694	0.494929

โหลที่ 1 = แมกนีเซียมคลอไรด์

โหลที่ 2 = แมกนีเซียมไนเตรท

โหลที่ 3 = โซเดียมคลอไรด์

โหลที่ 4 = แอมโมเนียมซัลเฟต

โหลที่ 5 = โพแทสเซียมไนเตรท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข. 6 การคำนวณหาค่าวอเตอร์แอกทิวิทีของมะขามที่ 45 องศาเซลเซียส

โหลที่	น้ำหนักเริ่มต้น(กรัม)	น้ำหนักสมดุล(กรัม)	น้ำหนักเปลี่ยนแปลงเทียบจากเริ่มต้น 1 กรัม
ศรีชมภู			
1	1.03	0.9206	-0.13621
2	1.0572	0.9821	-0.12824
3	1.0289	1.1573	0.095893
4	1.0392	1.2202	0.134972
5	1.057	1.4803	0.343473
สีทอง			
1	1.0304	0.8944	-0.16239
2	1.0462	0.9512	-0.137
3	1.0367	1.1302	0.05349
4	1.0428	1.1966	0.104688
5	1.0766	1.5133	0.329029
ขันตี			
1	1.0279	0.9267	-0.12635
2	1.0608	1.0018	-0.11642
3	1.056	1.1768	0.058394
4	1.0564	1.2475	0.124497
5	1.0511	1.3674	0.249823

โหลที่ 1 = แมกนีเซียมคลอไรด์

โหลที่ 2 = แมกนีเซียมไนเตรท

โหลที่ 3 = โซเดียมคลอไรด์

โหลที่ 4 = แอมโมเนียมซัลเฟต

โหลที่ 5 = โพแทสเซียมไนเตรท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข. 7 การคำนวณหาค่าวอเตอร์แอกทิวิทีของมะขามที่ 60 องศาเซลเซียส

โหลที่	น้ำหนักเริ่มต้น(กรัม)	น้ำหนักสมดุล(กรัม)	น้ำหนักเปลี่ยนแปลงเทียบจากเริ่มต้น 1 กรัม
ศรีชมภู			
1	1.0952	0.9554	-0.22285
2	1.0655	0.9728	-0.1525
3	1.0545	1.1622	0.047634
4	1.0952	1.2444	0.041031
5	1.0704	1.3751	0.21426
สีทอง			
1	1.1257	0.9674	-0.26632
2	1.0686	0.954	-0.17584
3	1.0699	1.1889	0.041325
4	1.0534	1.189	0.075326
5	1.0371	1.3638	0.277913
ขันตี			
1	1.092	0.9569	-0.21572
2	1.0241	0.9477	-0.0987
3	1.0451	1.1527	0.057857
4	1.0868	1.2432	0.057109
5	1.0392	1.2691	0.182028

โหลที่ 1 = แมกนีเซียมคลอไรด์

โหลที่ 2 = แมกนีเซียมไนเตรท

โหลที่ 3 = โซเดียมคลอไรด์

โหลที่ 4 = แอมโมเนียมซัลเฟต

โหลที่ 5 = โพแทสเซียมไนเตรท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข. 8 เปรียบเทียบค่าความชื้นสมดุลที่ ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการของ Henderson ของพันธุ์ศรีชมภู

อุณหภูมิ	ความชื้นสัมพัทธ์	ค่าที่ได้จากสมการของ Henderson	ค่าที่ได้จากการทดลอง
36	0.3196	0.0637	0.0666
	0.4961	0.1362	0.1178
	0.7483	0.3424	0.3459
	0.8020	0.4230	0.4070
	0.9044	0.6899	0.7220
45	0.2926	0.0502	0.0392
	0.4246	0.0929	0.0878
	0.7450	0.3064	0.3130
	0.7860	0.3592	0.3537
	0.8429	0.4570	0.5305
60	0.2926	0.0502	0.0392
	0.4246	0.0929	0.0878
	0.7450	0.3064	0.3130
	0.7860	0.3592	0.3537
	0.8429	0.4570	0.5305

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข. 9 เปรียบเทียบค่าความชื้นสมดุลที่ ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการของ Henderson ของพันธุ์สีทอง

อุณหภูมิ	ความชื้นสัมพัทธ์	ค่าที่ได้จากสมการของ Henderson	ค่าที่ได้จากการทดลอง
36	0.3196	0.0813	0.0866
	0.4961	0.1684	0.1473
	0.7483	0.4076	0.4298
	0.8020	0.4992	0.4540
	0.9044	0.7980	0.7256
45	0.3110	0.0752	0.0820
	0.4693	0.1471	0.1332
	0.7452	0.3887	0.3589
	0.7956	0.4695	0.4303
	0.8703	0.6455	0.7520
60	0.2926	0.0647	0.0712
	0.4246	0.1168	0.1127
	0.7450	0.3665	0.3851
	0.7860	0.4268	0.4069
	0.8429	0.5377	0.6391

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข. 10 เปรียบเทียบค่าความชื้นสมดุลที่ ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการของ Henderson ของพันธุ์ขันตี

อุณหภูมิ	ความชื้นสัมพัทธ์	ค่าที่ได้จากสมการของ Henderson	ค่าที่ได้จากการทดลอง
36	0.3196	0.0620	0.0954
	0.4961	0.1359	0.1330
	0.7483	0.3527	0.4256
	0.8020	0.4389	0.4764
	0.9044	0.7922	0.8275
45	0.3110	0.0569	0.0505
	0.4693	0.1174	0.1093
	0.7452	0.3349	0.3221
	0.7956	0.4106	0.3713
	0.8703	0.5788	0.4640
60	0.2926	0.0484	0.0807
	0.4246	0.0915	0.1321
	0.7450	0.3143	0.3359
	0.7860	0.3705	0.4156
	0.8429	0.4753	0.5595

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ค่าสารละลายเกลืออิ่มตัวที่ใช้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค. 1 สารละลายเกลืออิ่มตัวที่ใช้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ [17]

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	Ammonium sulfate	Potassium nitrate	Magnesium nitrate	Sodium Chloride	Magnesium Chloride
0	82.27	96.33	60.35	75.51	33.66
5	82.4	96.27	58.86	75.65	33.6
10	82.06	95.96	57.36	75.67	33.47
15	81.7	95.41	55.87	75.61	33.3
20	81.34	94.62	54.38	75.47	33.07
25	80.99	93.58	52.89	75.2	32.78
30	80.63	92.31	51.4	75.09	32.44
35	80.27	90.7	49.91	74.87	32.05
40	79.91	89.03	48.42	74.68	31.6
45	79.56	87.03	46.93	74.52	31.1
50	79.2	84.78	45.44	74.43	30.54
55				74.41	29.93
60	78.6	84.29	42.45	74.5	29.26
65				74.7	28.54
70				75.06	27.77
75				75.58	26.94
80				76.29	26.05
85					25.11
90					24.12
95					23.07
100					21.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์กันต์กนิษฐ์ ธนศิริวัฒนา อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ตลอดจนอาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมอาหารทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำ และคำปรึกษาต่าง ๆ จนทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอบพระคุณบิดา มารดาและพี่ ๆ ที่อุปการะและสนับสนุนด้านการเงิน

ขอบคุณและขอบใจพี่น้องชาวคริสตจักรความหวังลาดกระบัง เพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจเสมอมา

และในที่สุด คุณประโยชน์ของงานวิจัยนี้ที่พึงมี ข้าพเจ้าขอมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่บิดา มารดา และผู้มีพระคุณที่คอยให้กำลังใจและห่วงใยข้าพเจ้าเสมอมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

1. นายจตุพล ยางสูง เกิดเมื่อวันที่ 23 เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2521 ภูมิลำเนาอาศัยอยู่บ้านเลขที่ 199 หมู่ 3 ซอยเกกีงาม 3 เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย ในปีการศึกษา 2538 จากโรงเรียนพรตพิทยพยัต เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ด้วยเกรดเฉลี่ย 3.03 จากนั้นในปีการศึกษา 2539 เข้าศึกษาต่อระดับอุดมศึกษาในคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2542 ด้วยเกรดเฉลี่ย 2.25

2. นายสุนันท์ สมวัน เกิดเมื่อวันที่ 16 เดือนมกราคม พ.ศ. 2520 ภูมิลำเนาเดิมอาศัยอยู่บ้านเลขที่ 2 หมู่ 13 ตำบลขามใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายในปีการศึกษา 2538 จากโรงเรียนศรีปทุมพิทยาคาร จังหวัดอุบลราชธานี จากนั้นศึกษาต่อระดับอุดมศึกษาในสาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2542 ด้วยเกรดเฉลี่ย 2.50

3. นางสาวดวงใจ ลอสิงห์ เกิดเมื่อวันที่ 30 เดือนเมษายน พ.ศ. 2520 ภูมิลำเนาเดิมอาศัยอยู่บ้านเลขที่ 61 หมู่ 9 ตำบลเลิงแฝก กิ่งอำเภอกุดรัง จังหวัดมหาสารคาม สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายในปีการศึกษา 2538 จากโรงเรียนบรบือวิทยาคาร อำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม ด้วยเกรดเฉลี่ย 3.77 จากนั้นในปีการศึกษา 2539 เข้าศึกษาต่อระดับอุดมศึกษาในคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอาหาร ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2542 ด้วยเกรดเฉลี่ย 2.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้