



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลของความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติความร้อนของ  
มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษา  
Effect of heat treatment on thermal properties in  
mango fruit cv. Nam Dok Mai Si Thong during storage

ดร. ระจิตร สุวพานิช

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2550

คณะอุตสาหกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....

131030

2.1.11ค.2557

RCH  
SB  
379  
.M2  
5214W

b.12595093  
i.....

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) ผลของความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติความร้อนของ  
มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษา

แหล่งทุน งบประมาณเงินรายได้ คณะอุตสาหกรรมเกษตร

ประจำปีงบประมาณ 2554 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 35,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ตุลาคม 2549 ถึงกันยายน 2550 ✓

หัวหน้าโครงการ และหน่วยงานต้นสังกัด

ดร. ระจิตร์ สุวพานิช สาขาวิชาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร

คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

การเก็บรักษามะม่วงไว้ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ผลมะม่วงจะแสดงการเกิดอาการสะท้าน  
หนวามากกว่าการเก็บรักษามะม่วงที่ 13 และ 25 องศาเซลเซียส ในขณะที่การเก็บรักษามะม่วงที่อุณหภูมิ  
13 และ 25 องศาเซลเซียส ผลมะม่วงมีการพัฒนาเข้าสู่กระบวนการสุก มีความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทาง  
ความร้อนกับการเกิดอาการสะท้านหนาว จึงเป็นไปได้ที่จะใช้สมบัติทางความร้อนในการทำนายการเกิด  
อาการสะท้านหนาวในผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

คำสำคัญ: มะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง สมบัติความร้อน ความร้อน

**Research Title:** Effect of heat treatment on thermal properties in mango fruit cv

Nam Dok Mai Si Thong during storage

**Researcher:** Dr. Rachit Suwapanich

**Faculty:** Agro-Industry

**Department:** -

## ABSTRACT

The mango were stored at 5°C (chilling temperature) at 13°C (critical temperature) for 0, 5, 10, 15, 20 and 25 days, and 25°C (ripening temperature) for 0, 2, 4, 6 and 8 days. Chilling score, electrolyte leakage, respiration, chemical composition and thermal properties were determined both in the peel and the flesh. Mangoes stored at 5°C developed more CI symptoms than those stored at 13°C. There were ripening process in mango fruit which stored at 13 and 25°C. There are relationship between thermal properties and chilling injury in mango fruit. We can use thermal conductivity to predict chilling injury in mango

**Keywords :** *Mangifera indica L.*, Mango cv. Nam Dok Mai Si Thong, Thermal properties, Heat treatment

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2550

ขอขอบคุณ สถานวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. เมธินี เห่วซึ่งเจริญ ที่ให้คำแนะนำ ตลอดจนถ่ายทอดความรู้และให้กำลังใจ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณกำลังใจจากน้อง ๆ ที่สถานวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ระจิตร สุวพานิช

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	21
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย	26
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	62
เอกสารอ้างอิง	63

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1. เทคนิคการวัดค่าการนำความร้อน	16

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
ภาพ 1 สมมุติฐานการเกิดอาการสะท้านหนาว	8
ภาพที่ 2 กราฟที่ได้จากการใช้ Differential Scanning Calorimetry	14
ภาพที่ 3 มะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง	21
ภาพที่ 4 ขั้นตอนการเตรียมมะม่วงก่อนการศึกษา	21
ภาพที่ 5 แสดงขั้นตอนการให้ความร้อนแก่มะม่วง	21
ภาพที่ 6 แสดงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการวัดค่าความร้อนจำเพาะและค่าการนำความร้อนโดยเครื่อง DSC	
ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนจำเพาะที่เปลือกของมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองที่เก็บรักษาในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 5, 13 และ 25 องศาเซลเซียส	26
ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ) และการเปลี่ยนแปลงค่า $b^*$ ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส	27
ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ) และการเปลี่ยนแปลงค่า $b^*$ ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	28
ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกมะม่วง ( $C_p$ ) และอัตราการหายใจการของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส	28
ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกมะม่วง ( $C_p$ ) และอัตราการหายใจการของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	29
ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ) และคะแนนการเกิดอาการสะท้านหนาวของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส	30
ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ) และค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโตรไลต์ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส	30
ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ) และค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโตรไลต์ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	31

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ) และคะแนนการเกิดอาการ สะท้อนหนาวของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศา เซลเซียส	32
ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ) และการเปลี่ยนแปลงค่า $b^*$ ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส	32
ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของเปลือก ( $C_p$ ) และอัตราการ หายใจของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส	33
ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ) และค่าการรั่วไหลของสาร อิเล็กโตรไลต์ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศา เซลเซียส	34
ภาพที่ 19 การเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนจำเพาะที่เนื้อของมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง ที่เก็บรักษาในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 5, 13 และ 25 องศาเซลเซียส	35
ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและปริมาณความชื้นในเนื้อ มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส	36
ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและการเปลี่ยนแปลงค่า $b^*$ ของ เนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส	36
ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อและอัตราการหายใจของ ผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส	37
ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ ได้ในเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส	37
ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและค่าการรั่วไหลของสาร อิเล็กโตรไลต์ในเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศา เซลเซียส	38
ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและค่าความแน่นเนื้อของเนื้อ มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส	38
ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและการเปลี่ยนแปลงค่า $b^*$ ของ เนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส	39

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและการเปลี่ยนแปลงค่า $b^*$ ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	40
ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อและอัตราการหายใจของผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส	40
ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อและอัตราการหายใจของผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	41
ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (TSS) ในเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส	41
ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (TSS) ในเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	42
ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ในเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส	42
ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ในเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	43
ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและค่าความแน่นเนื้อของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส	43
ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและค่าความแน่นเนื้อของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	44
ภาพที่ 36 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อนของเปลือกที่เก็บรักษาในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 5, 13 และ 25°C	45
ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อน (k) และ คะแนนการเกิดอาการสะท้านหนาวของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อน (k) และ ค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโตรไลต์ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส	46
ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อน (k) และ การเปลี่ยนแปลงค่า $b^*$ ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส	47
ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อน (k) ของเปลือกและอัตราการหายใจของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส	47
ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและการเปลี่ยนแปลงค่า $b^*$ ในเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส	48
ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและการเปลี่ยนแปลงค่า $b^*$ ในเปลือกมะม่วงสีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	49
ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนของเปลือกมะม่วงและอัตราการหายใจของผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส	49
ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนของเปลือกมะม่วงและอัตราการหายใจของผลมะม่วงสีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	50
ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อน (k) และ คะแนนการเกิดอาการสะท้านหนาวของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส	51
ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อน (k) และ ค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโตรไลต์ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส	51
ภาพที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อน (k) และ ค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโตรไลต์ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	52
ภาพที่ 48 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อนของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่เก็บรักษาในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 5, 13 และ 25°C	53



## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 62 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและค่าการรั่วไหลของสาร อิเล็กทรอนิกส์ในเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศา เซลเซียส	60
ภาพที่ 63 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและค่าการรั่วไหลของสาร อิเล็กทรอนิกส์ในเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศา เซลเซียส	61

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความสำคัญและที่มา

มะม่วงเป็นไม้ผลเมืองร้อนที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของประเทศไทย ปัญหาที่พบคืออายุการวางจำหน่ายสั้น การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำช่วยยืดอายุการวางจำหน่ายได้ แต่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำเกินไป จะทำให้ผลมะม่วงเกิดอาการสะท้านหนาว (Kader, 1992) และแสดงอาการเมื่อนำมะม่วงมาวางไว้ที่อุณหภูมิสูง (Mittra and Baldwin, 1997) Raison และ Orr (1986) รายงานว่า พีชที่ไวต่อการเกิดอาการสะท้านหนาวและพีชที่ทนต่อการเกิดอาการสะท้านหนาวมีองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อหุ้มเซลล์แตกต่างกัน สอดคล้องกับ Aggarwal (2001) รายงานว่ามีการเปลี่ยนสถานะของโครงสร้างคิวติเคิลของแอปเปิ้ลและพริกเมื่อนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งสามารถวัดได้จากสมบัติทางความร้อนที่เปลี่ยนไป สอดคล้องกับ Suwapanich (2005) ที่พบว่ามะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสและเกิดอาการสะท้านหนาวจะมีค่าการนำความร้อนคงที่ ซึ่งแตกต่างจากผลมะม่วงที่สุกปกติที่มีค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการสุกของผล ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้ค่าการนำความร้อนในการทำนายการเกิดอาการสะท้านหนาวในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองได้

การใช้น้ำร้อนก็เป็นหนึ่งในกระบวนการทางความร้อนที่ใช้การควบคุมโรคและแมลงหลังการเก็บเกี่ยว และเป็นวิธีที่ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถกำจัดแมลงวันในผลไม้ได้เป็นอย่างดี (Lurie, 1998) มะม่วงจากประเทศไทยที่จะส่งออกไปยังประเทศจีนและสหรัฐอเมริกาจำเป็นต้องผ่านกระบวนการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 46.4 °C เป็นเวลา 75 นาที (จริงแท้, 2544) ส่วนมะม่วงจากประเทศเม็กซิโกที่จะส่งออกไปยังประเทศสหรัฐอเมริกาและญี่ปุ่นนั้นจะประสบปัญหาแมลงวันผลไม้ที่สำคัญคือ *Anastrepha ludens* และ *A.obliqua* ซึ่งจะต้องมาผ่านการให้ความร้อนด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ 46.1 °C เป็นเวลา 65, 75 หรือ 90 นาที (ขึ้นอยู่กับน้ำหนักผลไม้) (Ortega-Zaleta and Yahia, 2000) การให้ความร้อนนอกจากจะช่วยกำจัดแมลงวันผลไม้แล้วยังช่วยลดการเกิดอาการสะท้านให้กับผลผลิตทางการเกษตรอีกหลายชนิด เช่น ละมุดพันธุ์มะกอก (อนันต์ และ คณะ, 2547) มะม่วงพันธุ์ Kensington Pride (Nair *et.al.*, 1994), มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ (Whangchai *et.al.*, 2002) และอะโวคาโด และ ผล Persimmons (Lay-Yee, 1994) จึงได้เกิดแนวความคิดในการศึกษาผลของความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษา

วัตถุประสงค์           ศึกษาผลของความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนระหว่างการ  
เก็บรักษามะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

ขอบเขตงานวิจัย

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนและค่าการรั่วของอิเล็กโตรไลต์ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง  
ภายหลังการผ่านกระบวนการให้ความร้อนก่อนนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ

## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรม

#### มะม่วง

มะม่วงมีชื่อสามัญว่า mango มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Mangifera indica* Linn. เป็นไม้ผลยืนต้นไม้ผลัดใบ มีถิ่นกำเนิดในเขตอินเดียและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้แล้วแพร่ไปยังประเทศอื่นๆ ทั้งในเขตร้อนและเขตกึ่งร้อนของโลก (บุญเลิศ, 2532)

มะม่วงจัดอยู่ใน Class Dicotyledonae, Sub-class Archilamydeae, Order Sapindales และ Family Anacardiaceae (วิจิตร, 2529) ปลูกได้ทุกภาคของประเทศไทย ขึ้นได้ดีในดินแทบทุกชนิด ดินที่เหมาะสมคือ ดินร่วนที่มีการระบายน้ำได้ดีมีความเป็นกรดต่างของดินไม่เกิน 7.5 สามารถปลูกได้ตั้งแต่ในที่แห้งแล้งจนถึงในที่ที่มีฝนตกชุก

#### ลักษณะ/พันธุ์

มะม่วงเป็นไม้ยืนต้นขนาดกลางจนถึงขนาดใหญ่ ใบเดี่ยวสีเขียว ขอบใบเรียบ ฐานใบมนปลายใบแหลม กว้างคอกมี 5 กลีบ ดอกออกช่วงเดือนธันวาคมถึงเดือนกุมภาพันธ์ ลูกดิบสีเขียว เมื่อสุกเปลี่ยนเป็นสีเหลืองหรือเหลืองส้ม มีเมล็ดภายใน 1 เมล็ด พันธุ์มะม่วงที่นิยมปลูก ได้แก่ มะม่วงแก้วศรีสะเกษ มะม่วงพันธุ์มรกต มะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ทะวาย พันธุ์ฟ้างั้นพันธุ์หนองแขง พันธุ์เขียวเสวย เป็นต้น และมีพันธุ์ส่งเสริมแยกตามลักษณะการรับประทานดังนี้พันธุ์รับประทานสุก ได้แก่ น้ำดอกไม้ อกร่อง ทองคำ พันธุ์รับประทานดิบ ได้แก่ ฟ้างั้น เขียวเสวยและแรด พันธุ์แปรรูป ได้แก่ แก้วสามปี

มะม่วงน้ำดอกไม้เป็นมะม่วงประเภทรับประทานสุก มีผู้นิยมปลูกกันมาก มีการเจริญเติบโตรวดเร็ว ใบใหญ่เป็นคลื่น ทรงพุ่มโปร่ง ส่วนมากมีนิสัยในการออกดอกทะวาย ออกดอกคด ติดผลปานกลาง ให้ผลทุกปี ผลมีขนาดใหญ่ หนักประมาณ 400 กรัม ผลอ่อนเกือบกลมหัวใหญ่ปลายแหลม ผลค่อนข้างยาว เนื้อมาก เมล็ดเล็ก มีผิวบาง เมื่อดิบมีรสเปรี้ยว ผิวสีเขียวนวล เนื้อแน่น เมื่อผลสุกมีผิวสีเหลือง กลิ่นหอม เนื้อละเอียดมีเสี้ยนน้อย รสหวาน มะม่วงน้ำดอกไม้ไม่มีเปลือกบางจึงซ้าได้ง่าย และไม่ค่อยต้านทานต่อโรคแอนแทรกโนส อายุตั้งแต่ออกดอกจนถึงผลแก่ประมาณ 115 วัน มะม่วงน้ำดอกไม้เป็นมะม่วงที่ได้รับความนิยมมาก เนื่องจากเป็นพันธุ์ที่ออกดอกง่าย สามารถตอบสนองต่อการบังคับให้ออกก่อนฤดูได้เป็นอย่างดี และเป็นพันธุ์ที่มีลักษณะตรงกับความต้องการของตลาดต่างประเทศ พันธุ์ที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบันคือน้ำดอกไม้เบอร์4และน้ำดอกไม้สีทอง

มะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง ผลดิบจะมีสีผิวเป็นสีเหลืองอ่อนคล้ายมะม่วงสุกทั้งที่ผลยังอ่อนอยู่ (2-3 เดือนหลังดอกบาน) ซึ่งผลมะม่วงทั่วไปจะมีผิวสีเขียว ผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองมีผิวที่หนากว่าผิวผลมะม่วงน้ำดอกไม้ ส่งผลให้ป้องกันการช้ำและต้านทานโรคแอนแทรคโนสได้ดีกว่าผลมะม่วงน้ำดอกไม้เบอร์ 4 รสชาติผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อผลอ่อนมีรสเปรี้ยว ผลแก่มีรสมันเนื้อกรอบ มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (total soluble solids) 17-18 เปอร์เซ็นต์ เนื้อไม่มีเส้น เนื้อมีสีเหลือง เมล็ดบาง น้ำหนักต่อผลประมาณ 300-400 กรัม ซึ่งเป็นที่ต้องการของตลาดโดยเฉพาะประเทศญี่ปุ่น (นิทยา, 2548)

### คุณค่าทางโภชนาการ

ยอดมะม่วง ใบอ่อน มีรสเปรี้ยวอมฝาดเล็กน้อย ผลดิบของมะม่วงรสเปรี้ยว ยอดอ่อนและใบอ่อนของมะม่วงยังไม่มีสารวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ ผลมะม่วงแก่ดิบจะให้พลังงานต่อร่างกาย ซึ่งประกอบด้วย เส้นใย แคลเซียม ฟอสฟอรัส เหล็ก เบตา-แคโรทีน วิตามินบีหนึ่ง วิตามินบีสอง ในอาซิน วิตามินซี เป็นต้น

### การนำไปใช้ประโยชน์

ผลดิบและผลสุกสามารถแปรรูปเป็น มะม่วงกวน มะม่วงดอง มะม่วงแช่อิ่ม มะม่วงเค็ม น้ำมะม่วงแยม ฯลฯ

### การเก็บรักษามะม่วง

สายชล (2530) กล่าวว่ามะม่วงเป็นผลไม้ที่เสียหายได้ง่ายชนิดหนึ่ง เมื่อเก็บผลจากต้นมาแล้วย่อมมีการเสื่อมสภาพ และอาจมีการเน่าเสียอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาทางเคมีและกายภาพ ซึ่งผลทำให้ผลมะม่วงเกิดกระบวนการสุกและมีการสูญเสียในระหว่างการเก็บรักษา เช่น การสูญเสียน้ำหนัก การอ่อนนุ่มของผล และการเน่าเสียของผล เป็นต้น ดังนั้นหากสามารถหาวิธียืดอายุการเก็บรักษามะม่วงได้ก็จะสามารถช่วยชะลอการเสื่อมสภาพ และการเน่าเสียได้ในการเก็บรักษาพืชผลสดต้องคำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่สำคัญได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ในห้องที่ใช้เก็บรักษาและสัดส่วนของก๊าซในบรรยากาศที่ใช้ในการเก็บรักษา

การเก็บรักษาผลมะม่วงให้สดอยู่ได้นานมีหลักการสำคัญ คือ จะต้องให้ผลมะม่วงมีการหายใจอยู่ในระดับต่ำเสมอ (ระยะ preclimacteric) และเมื่อควบคุมแล้วผลต้องสามารถสุกได้ตามปกติ (Chaplin, 1984) วิธีการปฏิบัติที่นับว่ามีประสิทธิภาพมากที่สุดและเป็นที่ยอมรับปฏิบัติคือ การเก็บรักษาผลมะม่วงในสภาพอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิต่ำมีผลทำให้อัตราการหายใจและกระบวนการเมตาบอลิซึมต่างๆ ของผลลดลง อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของโรคเน่าในระหว่างการเก็บรักษา ชะลอการสร้างเอทิลีนและลดการตอบสนองของเนื้อเยื่อต่อเอทิลีน (สายชล, 2530; Wills *et.al.*, 1981) ผลไม้แต่ละชนิดมีอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาแตกต่างกัน ผลมะม่วงโดยทั่วไปสามารถเก็บรักษาที่

อุณหภูมิประมาณ 10-12 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 90-95 เปอร์เซ็นต์ เก็บรักษาได้นาน 2-3 สัปดาห์ (Lutz และ Hardenburg, 1968) ซึ่งขึ้นอยู่กับพันธุ์ (Phakawatmongkol *et al.*, 2004) ถ้าเก็บรักษาผลมะม่วงที่อุณหภูมิต่ำไม่เหมาะสมและเก็บรักษาเป็นเวลานานเกินไป ทำให้เกิดอันตรายจากอุณหภูมิต่ำที่เรียกว่า อาการสะท้านหนาว (Chilling injury, CI) ซึ่งมีลักษณะอาการคือ ผลมะม่วงสุกไม่สม่ำเสมอ เกิดรอยบวมหรือสีผิดปกติ มีจุดดำ เนื้อผลเป็นสีคล้ำ เนื้อผลที่ติดเมล็ดกับเปลือกหุ้มเมล็ดมีสีเทาหรือน้ำตาล กลิ่นและรสชาติผิดปกติ อ่อนแอต่อเชื้อโรคและเน่าเสียเร็ว (สายชล, 2530; Lizada *et al.*, 1984) ความแตกต่างของการเกิดอาการสะท้านหนาว ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช พันธุ์พืช อุณหภูมิและระยะเวลาที่เก็บรักษา (สายชล, 2528)

เจือจันทร์ (2541) พบว่าการเก็บรักษามะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ (*Mangifera indica* cv. Nam Dok Mai) ที่อุณหภูมิต่ำ 8 องศาเซลเซียส สามารถเก็บรักษาได้นานกว่าที่อุณหภูมิต่ำ 20 องศาเซลเซียส โดยมีอายุการเก็บรักษาประมาณ 10 และ 20 วันตามลำดับ การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ 8 องศาเซลเซียส ทำให้มะม่วงไม่เกิดการสุกซึ่งเป็นผลจาก chilling injury และมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและทางเคมีของมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ ได้แก่ ความแน่นเนื้อ สีเปลือกและสีเนื้อ ปริมาณ soluble solids ปริมาณ titratable acidity และอัตราการหายใจมีการเปลี่ยนแปลงที่ตลอดระยะเวลาเก็บรักษา ขณะที่ผลมะม่วงที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ 20 องศาเซลเซียสเกิดการสุกตามปกติ มีการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อลดลง สีเปลือกและสีเนื้อเปลี่ยนเป็นสีเหลืองตามค่า yellow index และค่า a เพิ่มขึ้น ปริมาณ soluble solids เพิ่มขึ้น ปริมาณ titratable acidity ลดลง และมีอัตราการหายใจเพิ่มขึ้นระหว่างการเก็บรักษา ส่วนปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ปริมาณ total nonstructural carbohydrates อัตราการผลิตก๊าซเอทิลีน มีการเปลี่ยนแปลงไม่แตกต่างจากผลปกติที่อุณหภูมิต่ำ 20 องศาเซลเซียส นอกจากนี้มะม่วงที่เก็บรักษาทั้งสองระดับอุณหภูมิจึงมีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น แต่ผลที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ 8 องศาเซลเซียสมีการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่า สำหรับปริมาณโพลีเอมีน 3 ชนิด ได้แก่ putrescine, spermidine และ spermine พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงลดลง โดยผลที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ 8 องศาเซลเซียส มีปริมาณโพลีเอมีนทั้ง 3 ชนิด มากกว่าผลปกติที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ 20 องศาเซลเซียส โดยมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางสรีรวิทยา และทางเคมีอย่างรวดเร็วในช่วงวันที่ 4 ของการเก็บรักษา ขณะที่ผลที่เก็บรักษาในอุณหภูมิต่ำ 8 องศาเซลเซียส ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว และผลมะม่วงที่เก็บรักษาทั้งสองระดับอุณหภูมิจึงเกิด ethylene peak ก่อน climacteric peak

## อาการสะท้านหนาว

ผลไม้ที่มีแหล่งกำเนิดในเขตร้อนเมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 12.5 องศาเซลเซียส จะอ่อนแอต่ออาการสะท้านหนาว และความเสียหายจากอาการสะท้านหนาวมิได้เกี่ยวข้องกับการเกิดน้ำแข็งขึ้นภายในเซลล์ จึงแตกต่างจากอาการ freezing injury พืชที่อ่อนแอต่ออาการสะท้านหนาวจะไวต่ออุณหภูมิต่ำตลอดระยะเวลาการเจริญเติบโต รวมทั้งส่วนต่างๆ ของพืชจะอ่อนแอต่ออุณหภูมิต่ำด้วย ยกเว้นพืชที่มีเมล็ดแก่และแห้งแล้วเท่านั้น อาการสะท้านหนาวอาจเกิดขึ้นได้ ตั้งแต่อยู่ในสวนระหว่างการขนส่ง ระหว่างการเก็บรักษา

ระหว่างการขายส่งและขายปลีก หรือแม้กระทั่งในตู้เย็นตามบ้านทั่วๆ ไป อย่างไรก็ตาม ผลไม้ที่มีแหล่งกำเนิดในเขตอบอุ่นบางชนิดอาจอ่อนแอต่ออาการสะท้านหนาวได้เช่นกัน (คณัย, 2540)

อาการสะท้านหนาวเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโปรตีน และโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์ (Membrane structure) ที่เสื่อมสลายส่งผลให้อัตราการซึมผ่าน และการรั่วไหลของประจุมีเพิ่มมากขึ้น (Hausman et al., 2000 ; Saltveit., 2002) ในขณะที่เก็บไว้ในอุณหภูมิต่ำ ซึ่งมะม่วงหากเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 13 °C ผลมะม่วงจะเกิดอาการสะท้านหนาวขึ้นที่ผิว เนื้อและเมล็ด โดยแสดงอาการรอยบุ๋ม รอยสีน้ำตาลและการผิปกดของสีเปลือก เป็นต้น (Wang et al., 2008) ซึ่งปัจจัย สำคัญของการเกิดอาการสะท้านหนาวในผลไม้เขตร้อน คืออุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมในการเก็บรักษา หรือการเก็บรักษาผลผลิตไว้ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าระดับที่ผลผลิตทนได้หรือเก็บไว้เป็นเวลานานเกินกว่าผลผลิตชนิดนั้นๆสามารถทนได้ (Soto-Zamora et al., 2005)

## ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดอาการสะท้านหนาว

### ระยะความแก่

ระยะความแก่ของผลไม้มีผลต่อการเกิดอาการสะท้านหนาวได้แตกต่างกันตามชนิดของผลไม้ ผลไม้ที่ยังไม่แก่ถ้าผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำเกินไป เมื่อเกิดอาการสะท้านหนาวอาจทำให้ผลไม้ไม่สุกหรืออาจสุกได้คุณภาพไม่ดี เช่น ผลมะเขือเทศที่อยู่ในระยะแก่จัดสีเขียว จะอ่อนแอต่อการเกิดอาการสะท้านหนาวมากกว่าผลมะเขือเทศที่อยู่ในระยะสุกแล้ว (Mohammed and Brathwaite, 2000)

### อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเกิดอาการสะท้านหนาว ผลไม้ทั่วไปในเขตร้อนจะอ่อนแอต่อการเกิดอาการสะท้านหนาว หากถูกเก็บรักษาภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่าจุดวิกฤตของผลไม้ นั้น และอุณหภูมิที่ชกนำไปให้เกิดอาการสะท้านหนาวในมะม่วง คือ อุณหภูมิต่ำกว่า 12 องศาเซลเซียส (Tasneem, 2004) อีกทั้งความรุนแรงของความเสียหายที่เกิดจากอาการสะท้านหนาวยังขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ผลมะม่วงได้รับอุณหภูมิต่ำ (คณัยและนิธิยา, 2535) ถ้าอุณหภูมิต่ำมากและสัมผัสอยู่นานอาการจะเกิดขึ้นมาก แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำไม่มากและสัมผัสอยู่ไม่นานอาการจะเกิดขึ้นน้อย นอกจากนี้ปัจจัยทั้งภายในและภายนอกต้นพืชมีผลต่อการเกิดอาการสะท้านหนาว เนื้อเยื่อต่างชนิดภายในต้นพืชเดียวกันก็เกิดอาการได้ไม่เท่ากัน พืชชนิดเดียวกันแต่ต่างพันธุ์กันเกิดอาการได้ต่างกัน (จริงแท้, 2549) เช่น ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้จะอ่อนแอต่อการเกิดอาการสะท้านหนาวมากกว่าผลมะม่วงพันธุ์กร่อง (Phakawatmongkol et al., 2004)

### ลักษณะทางพันธุกรรม

ผลไม้ที่มาจากแหล่งกำเนิดต่างกันมีความต้านทานต่ออุณหภูมิต่ำได้แตกต่างกัน ผลไม้เขตร้อน เช่น ท้อ และแอปเปิล จะสามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำได้ดีกว่าผลไม้เขตร้อน เช่น มะม่วง มะละกอ ทุเรียน เงาะ ผลไม้เขตกึ่งร้อน เช่น ลิ้นจี่ ลำไย หรือพันธุ์ต่างกัน เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิเดียวกันจะมีการตอบสนองต่ออุณหภูมิต่ำแตกต่างกันด้วย ผลมะม่วงพันธุ์แก้ว ทองคำ น้ำดอกไม้ และหนังกกลางวัน ไม่สามารถเก็บ

รักษาที่อุณหภูมิ 12 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานกว่า 5 วัน เนื่องจากเมื่อย้ายมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง จะแสดงอาการสะท้อนหนาวที่ผิว ผลมะม่วงพันธุ์แรดและอร่องสามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 12 องศาเซลเซียส ได้เป็นเวลา 15 วัน และ 25 วัน ตามลำดับ (Phakawatmongkol *et.al.*, 2004)

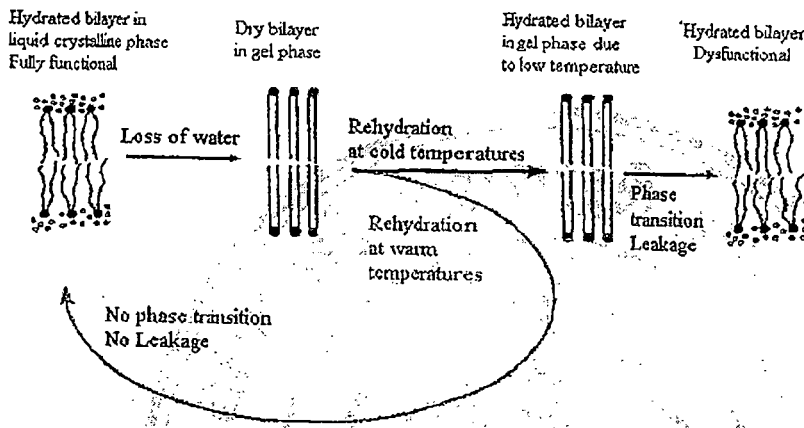
### สาเหตุของการเกิดอาการสะท้อนหนาว

สาเหตุของการเกิดอาการสะท้อนหนาวนั้นมีข้อสันนิษฐานว่าเนื่องจากองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) หรือเยื่อหุ้มออร์แกเนลล์บางส่วนมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ทำให้การทำงานของเยื่อหุ้มนั้นผิดปกติไป ส่งผลให้เกิดกระบวนการทางสรีรวิทยาภายในเซลล์ และส่งผลให้เซลล์ตายในที่สุด เยื่อหุ้มเซลล์ เยื่อหุ้มไมโทคอนเดรีย และเยื่อหุ้มออร์แกเนลล์อื่นๆ มีองค์ประกอบเช่นเดียวกัน คือ ประกอบด้วยชั้นของฟอสโฟลิพิด และโปรตีน เยื่อหุ้มเหล่านี้ทำหน้าที่สำคัญในการควบคุมการผ่านเข้าออกของสารต่างๆ นอกจากนั้นยังเป็นแหล่งที่เกิดของกระบวนการสำคัญต่างๆ เช่น การหายใจ และการสังเคราะห์แสง ภายหลังจากการเก็บเกี่ยวผลิตผล เยื่อหุ้มต่างๆ เหล่านี้จะเสื่อมสภาพลง ทำให้สารตั้งต้นต่างๆ มีโอกาสสัมผัสกับเอนไซม์ได้โดยขาดการควบคุม ทำให้เซลล์ขาดสมดุลและตายในที่สุด นอกจากนั้นอาการสะท้อนหนาวอันเนื่องมาจากอุณหภูมิต่ำ แต่สูงกว่าจุดเยือกแข็งของผลิตผลต่างๆ ที่ไม่เหมือนกันนั้น มีผู้สันนิษฐานว่าเกิดเนื่องจากกรดไขมันที่เป็น side chain ในโมเลกุลของฟอสโฟลิพิดในเยื่อหุ้มเหล่านี้ต่างกัน กล่าวคือพวกที่เกิดอาการสะท้อนหนาวได้ง่ายจะเป็นพวกที่มีกรดไขมันชนิดอิ่มตัว (saturated fatty acid) เป็นองค์ประกอบของเยื่อหุ้มต่างๆ และจะเปลี่ยนสภาพจากลักษณะที่เป็นของเหลว (liquid crystalline) มาเป็นลักษณะเจลแข็ง (solid gel) ทำให้การทำงานของเยื่อหุ้มนั้นเสื่อมลง ส่วนในผลิตผลที่ทนต่ออุณหภูมิต่ำจะมีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) เป็นส่วนใหญ่ เมื่ออุณหภูมิต่ำลงก็สามารถคงสภาพอยู่ได้ (จริงแท้, 2538 และ 2544)

### ลักษณะของอาการสะท้อนหนาว

อาการสะท้อนหนาวของผลไม้แต่ละชนิดจะแตกต่างกัน การเกิดอาการสะท้อนหนาวเป็นผลมาจากการได้รับอุณหภูมิต่ำ และอาการจะรุนแรงมากหรือน้อยขึ้นกับอุณหภูมิและระยะเวลาที่พืชสัมผัสกับอุณหภูมิต่ำ อาการสะท้อนหนาวส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ดังต่อไปนี้ (จริงแท้, 2549)

1. เลนติเซลมีสีผิดปกติ (lenticel spotting) เกิดบริเวณรอบๆ เลนติเซล ซึ่งพบว่ารอบๆ เลนติเซลเปลี่ยนเป็นสีแดง พบได้ในมะม่วงพันธุ์ Tommy Atkins และ Keitt (Pesis *et. al.*, 2000) หรืออาจเปลี่ยนเป็นสีเขียว (Ben *et.al.*, 2000)



ภาพ 1 สมมุติฐานการเกิดอาการสะท้านหนาว (จริงแท้, 2538)

2. เกิดรอยบุ๋ม (surface pitting) มักเกิดเป็นบริเวณกว้าง และมีการเปลี่ยนแปลงของสีที่ผิวผิดปกติ ควบคุมได้ด้วย พบได้ในแตงกวา และมะเขือเทศ (Wang, 1990) และผลมะม่วงพันธุ์ Kensington (Nair and Singh, 2003)

3. อาการน้ำเน่า (water soak) เมื่อเนื้อเยื่อเกิดความเสียหาย ความสามารถในการควบคุมการผ่านเข้าออกของสารจากเซลล์เกิดความผิดปกติไป ทำให้ของเหลวที่อยู่ภายในเซลล์ซึมออกมายังช่องว่างระหว่างเซลล์ ส่งผลให้ผิวของผลเกิดการเหี่ยว เนื่องจากเซลล์บริเวณผิวผลเกิดการสูญเสียน้ำ และเกิดอาการน้ำขึ้นขึ้น เช่นแตงกวา มะละกอ และสับปะรด (Wang, 1990) ผลมะม่วงโชคอนันต์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ 3 องศาเซลเซียส จะปรากฏอาการน้ำเน่าในวันที่ 12 ของการเก็บรักษา (เพ็ญวิภา, 2541)

4. สีของเนื้อและเปลือกเปลี่ยนไป เนื้อของผลไม้บางชนิดเมื่อได้รับอุณหภูมิต่ำ จะเปลี่ยนจากสีปกติเป็นสีน้ำตาล โดยมักจะเกิดขึ้นบริเวณรอบๆ ท่อน้ำและท่ออาหาร การเปลี่ยนสีในลักษณะนี้อาจเป็นเพราะกิจกรรมของเอนไซม์ Polyphenoloxidase (PPO) ที่ออกซิไดซ์สารประกอบฟีนอลที่มีอยู่ในเซลล์ของพืชบางชนิด ระบบท่อน้ำ ท่ออาหารอาจจะกลายเป็นสีน้ำตาลได้ สีที่เปลือกมักจะเปลี่ยนไปในทางที่คล้ำลงจากเดิม เมล็ดอาจจะมียีสน้ำตาลเกิดขึ้น เช่น ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ 4 องศาเซลเซียส เกิดอาการสะท้านหนาว (chilling injury) ที่ผิวผล ขณะที่ผลมะม่วงที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ 10 องศาเซลเซียส เกิดอาการสะท้านหนาวที่เนื้อผลติด endocarp และอาการสะท้านหนาวเกิดรุนแรงเพิ่มขึ้นเมื่อนำมาวางที่อุณหภูมิต่ำ 25 องศาเซลเซียส ในขณะที่ผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ไม่แสดงอาการดังกล่าว (สุกัญญา, 2539 ; Chidtrakool and Ketsa, 2005) ผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ 5 องศาเซลเซียส เกิดอาการสะท้านหนาวที่ผิวผล โดยมีสีคล้ำกว่าปกติและเกิดจุดสีม่วงที่เปลือก (จิรภรณ์, 2545) ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ 4 องศาเซลเซียส เกิดอาการสะท้านหนาวที่ผิวผล

5. การสลายตัวของเนื้อเยื่อ ทำให้มีสารเมแทบอลิต์ต่างๆ เช่น กรดอะมิโน น้ำตาล และแร่ธาตุต่างๆ ถูกปล่อยออกมาจากเซลล์ ทำให้จุลินทรีย์เข้าทำลายต่อได้ง่าย โดยเฉพาะจุลินทรีย์ที่ติดอยู่ที่ผิวนอกของผัก

และผลไม้ในระหว่างการเก็บเกี่ยว การขนย้าย และการวางจำหน่าย ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้เกิดการเน่าเสียมากขึ้น โดยเฉพาะกับผลไม้เขตร้อน การวัดความเสียหายของเยื่อหุ้มเซลล์สามารถทำได้โดยวัดการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งพบว่ามีค่าสูงขึ้นเมื่อเกิดอาการสะท้านหนาวและผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วัน มีค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ในเนื้อเพิ่มขึ้น (ชเนศวร์, 2541)

6. มีการสุกที่ผิดปกติ ผลไม้บางชนิดที่เก็บเกี่ยวในระยะแก่ทางสรีรวิทยาแต่ยังไม่สุก จะมีความผิดปกติในการสุก เมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำเป็นเวลานานๆ จะสูญเสียการพัฒนาด้านกลิ่นและรสชาติ เช่น การเก็บรักษาผลมะม่วงพันธุ์ Kensington ระยะแก่บริบูรณ์ เป็นเวลา 14 วัน ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดอาการสะท้านหนาว แต่ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ไม่ทำให้เกิดอาการสะท้านหนาว ก่อนนำมาเก็บรักษาต่อที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส และยังพบว่าสารระเหย (aroma volatile) ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสุกของผลมะม่วงที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 และ 15 องศาเซลเซียส แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Herianus *et. al.*, 2003)

7. การเน่าเสียและเสื่อมสภาพ ผลไม้ที่เกิดอาการสะท้านหนาวจะอ่อนแอต่อการเข้าทำลายของจุลินทรีย์ และการกระทบกระเทือนจากสิ่งแวดล้อมต่างๆ เนื่องจากเซลล์ของพืชได้รับอันตรายจากอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้เนื้อเยื่อนิ่มลงอันเนื่องจากการเสื่อมสภาพของเมมเบรน (Wang, 1990) ผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ที่เกิดอาการสะท้านหนาวจะทำให้มีการเกิดโรคมมากขึ้น (ชเนศวร์, 2541)

8. อายุการเก็บรักษาสั้นลง เนื่องมาจากเหตุดังกล่าวข้างต้น

9. ส่วนประกอบทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป ผลมะม่วงที่เกิดอาการสะท้านหนาวมักมีกลิ่นและรสชาติผิดปกติไป เช่น ผลมะม่วงพันธุ์ Manilla ที่เกิดอาการสะท้านหนาว มีปริมาณกรดสูง ในขณะที่ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่ำกว่าผลมะม่วงที่สุกตามปกติ (Vela *et. al.*, 2003)

10. ขาดคุณสมบัติในการเจริญต่อเนื้อ เช่น ไม่สามารถงอกได้ ซึ่งส่งผลเสียไปถึงส่วนขยายพันธุ์ต่างๆ ของพืชที่เก็บรักษาในสภาพที่อุณหภูมิต่ำเกินไป เช่น การเก็บรักษาหน่อแซนแคอโซเนียที่อุณหภูมิ 3-5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 202 วัน จะไม่สามารถงอกได้ (Clark, 1994) อาการดังกล่าวข้างต้นนั้น อาจเกิดขึ้นเพียงอาการใดอาการหนึ่งหรือร่วมกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้ ระดับอุณหภูมิ และความรุนแรงของอาการ อุณหภูมิยิ่งต่ำกว่าจุดวิกฤตมากเท่าไรอาการสะท้านหนาวจะยิ่งเกิดรวดเร็วและรุนแรง (दनัย, 2540)

### ลักษณะอาการสะท้านหนาวของผลมะม่วง

ลักษณะอาการสะท้านหนาวของผลมะม่วง จะเกิดที่เลนติเซลโดยเลนติเซลเปลี่ยนเป็นสีแดงหรือเขียว (Ben *et. al.*, 2000) เปลือกเปลี่ยนเป็นสีเขียวปนเทา ไม่สุกตามปกติ หรือสุกไม่สม่ำเสมอ ผิวอาจไม่เปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อสุก เกิดรอยบุ๋ม และเน่าได้ง่าย นอกจากนี้ยังแสดงลักษณะเนื้อผลเป็นสีคล้ำ เนื้อผลที่ติดกับเปลือกหุ้มเมล็ดมีสีเทาหรือสีน้ำตาล กลิ่นและรสชาติผิดปกติ (สายชล, 2530 ; ดนัย, 2540)

### การศึกษาอาการสะท้อนหนาวในผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้

ผลมะม่วงจะแสดงอาการสะท้อนหนาวทั้งหมด เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 45 วัน (Whangchai *et al.*, 1999) การเก็บรักษาผลมะม่วงที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส จะแสดงอาการสะท้อนหนาวภายหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 10 วัน โดยที่เปลือกมีอาการเนื้อเยื่อยบตัวเป็นจุดๆ และมีการรั่วไหลของสารอิเล็กโตรไลต์ที่เปลือกและเนื้อ (ศศรร, 2549) การเก็บรักษาผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 21 วัน จะแสดงอาการสะท้อนหนาวที่เนื้อติดเมล็ดแต่ถ้าเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 21 วัน จะแสดงอาการสะท้อนหนาวที่เปลือกและจะแสดงอาการรุนแรงขึ้นเมื่อย้ายมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (สุกัญญา, 2539) ในขณะที่การเก็บรักษาผลมะม่วงน้ำดอกไม้ที่อุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 วัน ไม่แสดงอาการสะท้อนหนาว และยังมีการพัฒนาการสุกเมื่อย้ายผลมะม่วงมาเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง แต่ถ้าเก็บรักษาผลมะม่วงที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จะเก็บรักษาไว้ได้ 10 วัน (Tungtirmthong *et al.*, 2001)

### กระบวนการทางความร้อน

ปัญหาในการส่งออกผลไม้สด สาเหตุสำคัญประการหนึ่งคือ แผลงวันผลไม้และใจของแมลง ซึ่งได้มีการนำกระบวนการทางความร้อนมาใช้ในหลาย ๆ รูปแบบ เช่น การใช้น้ำร้อน การใช้ไอน้ำและการใช้อากาศร้อน ความแตกต่างที่สำคัญของแต่ละวิธีคืออัตราการถ่ายเทความร้อน การใช้น้ำร้อนจะทำให้ผลไม่มีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าวิธีอื่น เพราะน้ำมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงกว่าไอน้ำและอากาศมาก การใช้ไอน้ำร้อนเป็นการเพิ่มอุณหภูมิของผลไม้โดยใช้อากาศร้อนอุณหภูมิประมาณ 40-50 °C ที่อ้อมตัวด้วยไอน้ำ เมื่อไอน้ำนั้นสัมผัสกับผิวของผลไม้จะเกิดการเปลี่ยนสถานะ และเกิดการถ่ายเทความร้อนไปยังผิวของผลไม้โดยตรง (Litz, 1997) วิธีนี้ อุณหภูมิของผลไม้เพิ่มขึ้นได้ช้ากว่าการใช้น้ำร้อนซึ่งช่วยให้ผลิตผลมีคุณภาพดี (จริงแท้, 2544)

ส่วนการใช้อากาศร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิของผลมะม่วงนั้นจะกระทำโดยการหมุนเวียนอากาศ ร้อนที่มีความชื้นสูงทำให้เนื้อมะม่วงร้อนขึ้นอย่างช้า ๆ (Litz, 1997) นอกจากนี้ยังมีการใช้กระบวนการทางความร้อนร่วมกับวิธีการอื่น เช่น ใช้ร่วมกับการเก็บรักษาในสภาพอุณหภูมิต่ำ หรือ การเก็บรักษาแบบควบคุมบรรยากาศ เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีก็ให้ประสิทธิผลแตกต่างกัน (Lurie, 1998; Wang *et al.*, 2001) การใช้ไอน้ำนั้นเป็นวิธีที่หลายประเทศทั่วโลกนิยมใช้ในการควบคุมแมลงวันผลไม้ (Gaffney *et al.*, 1990) ในประเทศไทยมีการวิจัยและพัฒนากระบวนการอบไอน้ำ และปรับ สภาพความชื้นสัมพัทธ์ที่มีประสิทธิภาพใช้กับมะม่วง ซึ่งผ่านการยอมรับจากหน่วยงานกักกันพืช ของญี่ปุ่น ให้ใช้เป็นวิธีการกำจัดศัตรูพืชด้านการกักกันพืชได้ โดยใช้กำจัดแมลงวันผลไม้ใน (Gaffney *et al.*, 1990) ในประเทศไทยมีการวิจัยและพัฒนากระบวนการอบไอน้ำและปรับ สภาพความชื้นสัมพัทธ์ที่มีประสิทธิภาพใช้กับมะม่วง ซึ่งผ่านการยอมรับจากหน่วยงานกักกันพืช ของญี่ปุ่น ให้ใช้เป็นวิธีการกำจัดศัตรูพืชด้านการกักกันพืชได้ โดยใช้กำจัดแมลงวันผลไม้ใน ผลมะม่วง 4 พันธุ์ คือ หนังกวางวัน น้ำดอกไม้ แรด

และพิมเสนแดง (คณัยและนิธิยา, 2548) ในการ ส่งออกมะม่วงพันธุ์หนังกลางวัน ไปยังประเทศญี่ปุ่น ต้องผ่านการให้ความร้อนด้วยวิธีนี้จนอุณหภูมิ ใจกลางผลเป็น  $46.5^{\circ}\text{C}$  แล้วคงไว้เป็นเวลา 10 นาที ก่อนลดอุณหภูมิลง ขั้นตอนการเพิ่ม อุณหภูมินี้แตกต่างกันไปในมะม่วงแต่ละพันธุ์ (จริงแท้, 2544) นอกจากนี้ได้มีรายงานของ Litz (1997) ถึงการใช้อุณหภูมิ  $46.5^{\circ}\text{C}$  ในการกำจัดแมลงวันผลไม้ *Bactrocera dorsalis* (Hendel) ในประเทศไทย ส่วนในประเทศออสเตรเลียการใช้ไอน้ำได้ถูกนำมาใช้ในการทำลาย *B. tryoni* (Queensland fruit fly) ในมะม่วงพันธุ์ Kensington ที่จะส่งออกไปยังประเทศญี่ปุ่น (Heather, 1995) โดยทำให้อุณหภูมิของเนื้อมะม่วงเพิ่มขึ้นเป็น  $46.5^{\circ}\text{C}$  และคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 10 นาที (Heard *et al.*, 1992) แต่จากรายงานของ Esguerra *et al.* (1990) ซึ่งนำมะม่วงพันธุ์ การาวามาผ่านการให้ความร้อนด้วยไอน้ำจนมีอุณหภูมิ  $46^{\circ}\text{C}$  และคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 10 นาที พบว่าเนื้อภายในเกิดการเสียหายจากความร้อน อุดรและคณะ (2536) ได้รายงานว่ มะม่วง พันธุ์หนังกลางวันจะทนทานต่ออาการเสียหายจากความร้อนได้ดีกว่าพันธุ์น้ำดอกไม้ แรด และ พิมเสนแดง

การใช้น้ำร้อนเป็นวิธีที่ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถฆ่าแมลงในผลไม้ได้เป็นอย่างดี (Lurie, 1998) มะม่วงจากประเทศไทยที่จะส่งออกไปยังประเทศจีนและสหรัฐอเมริกา นั้น ต้องผ่านกระบวนการใช้น้ำร้อนที่อุณหภูมิ  $46.4^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 75 นาที (จริงแท้, 2544) ส่วนมะม่วง จากประเทศเม็กซิโกที่จะส่งออกไปยังประเทศสหรัฐอเมริกาและญี่ปุ่นนั้น จะประสบปัญหา แมลงวันผลไม้ที่สำคัญคือ *Anastrepha ludens* และ *A. Obliqua* ซึ่งจะต้องนำมาผ่านการให้ความร้อนด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ  $46.1^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 65, 75 หรือ 90 นาที ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของผลไม้ (Ortega-Zaleta and Yahia, 2000) แต่การใช้เวลาานขึ้นจะส่งผลต่อการสุกและทำให้ ผลไม้เสียหายได้ (Yahia *et al.*, 1997) วิธีการใช้อากาศร้อนก็มีการพัฒนาใช้เช่นกัน จากรายงานของ Mangan and Ingle (1992) พบว่ามีการใช้อากาศร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิมะม่วงที่ปลูกในประเทศเม็กซิโก จนใจกลาง ผลมีอุณหภูมิสูงกว่า  $47^{\circ}\text{C}$  ซึ่งสามารถกำจัดแมลงวันผลไม้ West Indian ได้ทุกระยะการเจริญ ใน ขณะที่มะม่วงที่ปลูกในรัฐฟลอริดาได้ผ่านการใช้อากาศร้อนเพื่อให้อุณหภูมิใจกลางผลสูงกว่า  $46^{\circ}\text{C}$  พบว่าสามารถกำจัดแมลงวันผลไม้ Caribbean ได้ทุกระยะการเจริญเช่นกัน (Sharp, 1992) Heather *et al.* (1997) ได้รายงานถึงการใช้นระบบหมุนเวียนอากาศร้อนในการฆ่าแมลงวันผลไม้ Queensland และ Mediterranean ในผลมะม่วงพันธุ์ Kensington ที่ส่งออกจากประเทศ ออสเตรเลียไปยังประเทศญี่ปุ่น โดยใช้อากาศร้อนที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 95 % จนทำให้ อุณหภูมิที่แกนกลางผลเป็น  $47^{\circ}\text{C}$  และคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 15 นาที จะเห็นว่าการให้ความร้อนแก่ผลไม้ นานเกินไปสามารถทำให้เกิดความเสียหายขึ้นได้ทั้งภายในและภายนอกผล ความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นรวมถึงลักษณะผิวมีสีคล้ำ มีตำหนิ เนื้อมี ลักษณะผิดปกติ (Lurie, 1998) ซึ่งพบในมะม่วงที่เก็บรักษาในสภาพควบคุมบรรยากาศที่ผ่านการ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $45^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 160 นาที (Ortega-Zaleta and Yahia, 2000) ส่วนในผล ไม้ชนิดอื่น เช่น ผลแอปเปิลที่ผ่านการให้ความร้อนโดยใช้น้ำร้อนที่อุณหภูมิ  $46^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 45 นาที เกิดความเสียหายบริเวณเนื้อ และที่ผิวมีสีน้ำตาล (Smith and Lay-Yee, 2000) นอกจากนี้การใช้อากาศร้อนอุณหภูมิ

43-47 °C เป็นเวลา 10-90 นาที กับผลสัมพัทธ์ Oroblaco พบว่าแมลงวันผลไม้ Mediterranean จะตายเมื่อใช้อุณหภูมิ 43°C นาน 113 นาที หรือใช้อุณหภูมิ 43 °C ร่วมกับสภาวะที่มีออกซิเจนต่ำ เป็นเวลา 90 นาที ความเสียหายจากความร้อนเกิดขึ้นเมื่อใช้ อุณหภูมิ 47 °C กับผลส้มที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว ในขณะที่ผลส้มที่ผ่านการเคลือบผิวจะเกิด ความเสียหายเมื่อใช้อุณหภูมิ 44 °C (Lurie, *et al.*, 2004)

### สมบัติทางความร้อนของอาหาร

ความเข้าใจในเรื่องตัวแปรที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมาก ตัวแปรที่สำคัญคือ สมบัติทางความร้อนของอาหาร ซึ่งได้แก่ค่าความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อนและค่าการแพร่ความร้อน สมบัติทางความร้อนของอาหารขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอาหาร อุณหภูมิและโครงสร้างทางกายภาพอาหารต่างชนิดกันและสภาวะแตกต่างกันจึงมีสมบัติทางความร้อนต่างกัน (สิริลักษณ์, 2542)

1. ค่าความร้อนจำเพาะ (Mohsenin, 1980; Rahman, 1995; Hwang and Gunasekaran, 2003)

ค่าความร้อนจำเพาะ (specific heat;  $C_p$ ) หมายถึงปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้ วัสดุหนึ่งหน่วยมวลมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหนึ่งองศาที่ความดันคงที่ ค่าความร้อนจำเพาะมีหน่วยใน ระบบ SI และระบบอังกฤษเป็น  $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$  และ  $\text{Btu/lb}^\circ\text{F}$  ตามลำดับ

การหาค่าความร้อนจำเพาะมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีผสม (method of mixtures) วิธีเปรียบเทียบ (comparison method) และวิธีการใช้แผ่นความร้อนไฟฟ้า (method of guarded plates) และวิธี Differential Scanning Calorimetry (DSC) เป็นต้น

### Method of mixtures

วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยจะใช้ตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักและอุณหภูมิ ใใส่ ลงไปในแคลอริมิเตอร์ที่ทราบค่าความร้อนจำเพาะ และบรรจุตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งอาจเป็นน้ำหรือของเหลวที่ทราบค่าความร้อนจำเพาะ น้ำหนัก และอุณหภูมิ จากนั้นปล่อยให้ ตัวอย่างกับตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อนกันจนเข้าสู่สมดุล ค่าความร้อนจำเพาะสามารถหาได้จาก การทำสมดุลพลังงานระหว่างตัวกลางกับตัวอย่าง ดังสมการ

$$C_p = \frac{C_{p,ex}m_{ex}(T_{i,ex} - T_{eq}) - C_c m_c (T_{eq} - T_{i,c})}{m_s (T_{eq} - T_{i,s})}$$

เมื่อ	$C_c$	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของแคลอริมิเตอร์ ( $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ )
	$C_p$	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ ( $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ )
	$C_{p,ex}$	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อน ( $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ )

$m_c$	คือ	มวลของแคลอริมิเตอร์ (kg)
$m_{ex}$	คือ	มวลของตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อน (kg)
$m_s$	คือ	มวลของตัวอย่าง (kg)
$T_{eq}$	คือ	อุณหภูมิสมดุลของของผสม (°C)
$T_{i,c}$	คือ	อุณหภูมิเริ่มต้นของแคลอริมิเตอร์ (°C)
$T_{i,ex}$	คือ	อุณหภูมิเริ่มต้นของตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อน (°C)
$T_{i,s}$	คือ	อุณหภูมิเริ่มต้นของตัวอย่าง (°C)

### Method of guarded plates

วิธีใช้แผ่นความร้อนไฟฟ้านี้เป็นการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทราบค่าความร้อนจำเพาะ อุณหภูมิของตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นจนเท่ากับอุณหภูมิของแผ่นความร้อนคือจาก  $T_1$  ไปเป็น  $T_2$  ภายในเวลา  $t$  พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิกำนวนจากค่าความต่างศักย์ ( $V_t$ ) และ กระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ค่าความร้อนจำเพาะของตัวอย่างได้จากการทำสมดุลพลังงาน คำนวนจากสมการ

$$C_p = \frac{V_t \times I \times t}{m_s(T_2 - T_1) \times 100}$$

เมื่อ	$I$	คือ	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (A)
	$t$	คือ	เวลา (s)
	$V$	คือ	ค่าความต่างศักย์เฉลี่ย (V)

### Differential Scanning Calorimetry (DSC)

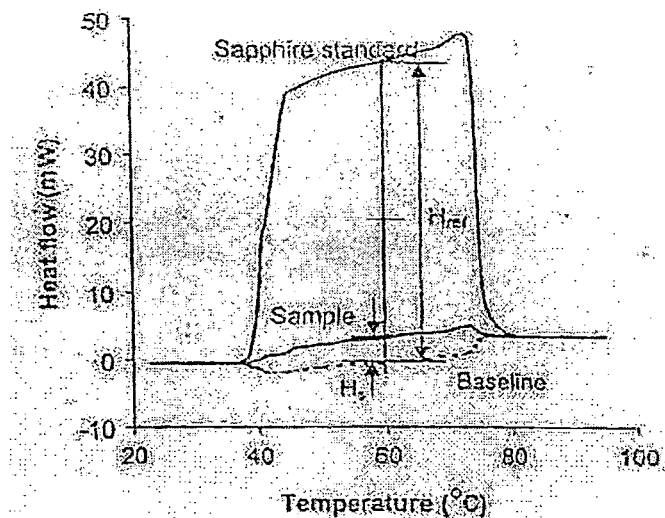
Differential Scanning Calorimetry (DSC) เป็นการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (thermal analysis) ประเภทหนึ่งที่ใช้ตรวจหาปริมาณความร้อน (heat flow) ที่เกี่ยวข้องกับ การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุเทียบกับเวลาและอุณหภูมิ มีการนำเทคนิค DSC ไปใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากใช้เวลาในการวิเคราะห์ค่อนข้างเร็ว เตรียมตัวอย่างได้ง่าย ทดสอบตัวอย่างได้ ทั้งของแข็งและของเหลว DSC เป็นการวัดความแตกต่างของพลังงานที่ให้แก่ตัวอย่างเทียบกับวัสดุอ้างอิงที่อุณหภูมิเดียวกัน ความแตกต่างของพลังงานดังกล่าวแปรผันโดยตรงกับค่าความร้อนจำเพาะของตัวอย่าง วิธีการวัดค่าความร้อนจำเพาะประกอบไปด้วยการหาเส้น base line การหาการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนของตัวอย่างและของวัสดุอ้างอิง ดังภาพที่ 2 นิยมใช้ sapphire เป็น วัสดุอ้างอิง เนื่องจากให้การตอบสนองเป็นแบบเส้นตรงในช่วงอุณหภูมิกว้าง และมีความบริสุทธิ์ สูง ที่ช่วง

อุณหภูมิ  $273 \text{ K} < T < 1973 \text{ K}$

ค่าความร้อนจำเพาะของ sapphire คำนวณได้จาก  $0.906 + 0.000368 T_k - 21440.884/T_k^2$   
(Perry *et al.*, 1984) ค่าความร้อนจำเพาะของตัวอย่าง คำนวณจากสมการ

$$C_p = \frac{m_{ref} H_s}{m_s H_{ref}} C_{p,ref}$$

เมื่อ	$C_{p,ref}$	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุอ้างอิง (kJ/kg°C)
	$H_{ref}$	คือ	ความแตกต่างของปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านวัสดุอ้างอิงเทียบกับเส้น base line
	$H_s$	คือ	ความแตกต่างของปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านตัวอย่างเทียบกับเส้น base line
	$m_{ref}$	คือ	มวลของวัสดุอ้างอิง (kg)
	$m_s$	คือ	มวลของตัวอย่าง (kg)
	$T_k$	คือ	อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (K)



ภาพที่ 2 กราฟที่ได้จากการใช้ Differential Scanning Calorimetry  
ในการหาค่าความร้อนจำเพาะของตัวอย่าง (Hwang and Gunasekaran, 2003)

### ความสัมพันธ์ของค่าความร้อนจำเพาะกับปัจจัยต่าง ๆ

การหาสมบัติทางความร้อนของอาหารนอกจากการวัดโดยตรงด้วยอุปกรณ์วัดแล้ว ยัง สามารถหาได้จากข้อมูลงานวิจัยต่าง ๆ ที่รวบรวมข้อมูลไว้เพื่อความสะดวกในการใช้งาน แต่เนื่อง จากข้อมูลมีจำกัด มักไม่ตรงกับตัวอย่างอาหารหรือสภาวะที่ต้องการ เช่นมีปริมาณความชื้นหรือ อุณหภูมิต่างกัน สมการหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นอีกวิธีที่รวดเร็วและให้ค่าถูกต้องตรง ตามสภาวะที่ต้องการ (สิริลักษณ์, 2542)

ปัจจัยที่จะต้องให้ความสำคัญเพราะมีผลต่อความถูกต้องในการทดลองเพื่อหาค่าความร้อนจำเพาะ ได้แก่ ขนาดของตัวอย่าง อัตราการเพิ่ม/ลดอุณหภูมิ และการปิดผนึกของตัวอย่าง นอกจากนี้ตัวอย่างที่ใช้วัดค่าความร้อนจำเพาะโดยวิธีการนี้จะต้องมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneity)

### ความสัมพันธ์ของค่าความร้อนจำเพาะกับปัจจัยต่าง ๆ

การหาสมบัติทางความร้อนของอาหารนอกจากการวัดโดยตรงด้วยอุปกรณ์วัดแล้ว ยัง สามารถหาได้จากข้อมูลงานวิจัยต่าง ๆ ที่รวบรวมข้อมูลไว้เพื่อความสะดวกในการใช้งาน แต่เนื่อง จากข้อมูลมีจำกัด มักไม่ตรงกับตัวอย่างอาหารหรือสภาวะที่ต้องการ เช่นมีปริมาณความชื้นหรือ อุณหภูมิต่างกัน สมการหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นอีกวิธีที่รวดเร็วและให้ค่าถูกต้องตรง ตามสภาวะที่ต้องการ (สิริลักษณ์, 2542)

สมการหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายสมบัติทางความร้อนของอาหารแบ่ง ได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบจำลองเชิงทฤษฎี (Theoretical model) และแบบจำลองแบบ เอ็มไพริคอล (Empirical model) แบบจำลองส่วนมากเป็นแบบเอ็มไพริคอลได้จากการนำข้อมูล จริงมาสร้างสมการความสัมพันธ์ด้วยวิธีการทางสถิติ เป็นสมการความสัมพันธ์ของสมบัติทางความร้อนกับปัจจัยต่าง ๆ ในสภาวะที่ศึกษา มีหลายปัจจัยที่นำมาใช้ในการทำนายค่า เช่น ปริมาณ ความชื้น อุณหภูมิ องค์ประกอบของอาหาร ความหนาแน่น สัดส่วนช่องว่าง (void space) ทิศทาง การไหลของความร้อนผ่านตัวอย่างอาหาร เป็นต้น เอ็มไพริคอล (Empirical model) แบบจำลองส่วนมากเป็นแบบเอ็มไพริคอลได้จากการนำข้อมูลจริงมาสร้างสมการความสัมพันธ์ด้วยวิธีการทางสถิติ เป็นสมการความสัมพันธ์ของสมบัติทางความร้อนกับปัจจัยต่าง ๆ ในสภาวะที่ศึกษา มีหลายปัจจัยที่นำมาใช้ในการทำนายค่า เช่น ปริมาณ ความชื้น อุณหภูมิ องค์ประกอบของอาหาร ความหนาแน่น สัดส่วนช่องว่าง (void space) ทิศทาง การไหลของความร้อนผ่านตัวอย่างอาหาร เป็นต้น

Siebel (1892) ได้ทำการวัดค่าความร้อนจำเพาะของอาหารบางชนิด เช่น ไข่ เนื้อ ผัก และผลไม้ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับความชื้น และปริมาณของแข็ง พบว่ารูปแบบของสมการจะเป็นแบบเส้นตรง คือ

$$C_p = a + b_x$$

เมื่อ  $a$  และ  $b$  คือ ค่าคงที่ขึ้นกับชนิดอาหารและเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์  
 $x_w$  คือ สัดส่วนโดยมวลของความชื้น

## 2. ค่าการนำความร้อน (Mohsenin, 1980; Rahman, 1995; Dincer, 1997)

ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity;  $k$ ) ของวัสดุ เป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อน หรือความสามารถในการยอมให้ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน สำหรับด้านอาหารนั้นค่าการนำความร้อนขึ้นอยู่กับโครงสร้าง องค์ประกอบ ชนิดของวัสดุ และ อุณหภูมิ อย่างไรก็ตามยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน เช่น รูปร่าง ความเป็นรูพรุน (porosity) ความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneity) และความดัน เป็นต้น โดยทั่วไปการวัดค่าการนำความร้อนแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบอาศัยการถ่ายเทความร้อน ในสภาวะคงตัว (steady state) และแบบอาศัยการถ่ายเทความร้อนในสภาวะไม่คงตัว (unsteady state) แต่ละแบบทำได้หลายวิธี ดังจำแนกในตารางที่ 1

ตารางที่ 1. เทคนิคการวัดค่าการนำความร้อน (Dincer, 1997)

steady state	unsteady state
steady state longitudinal heat flow method - guarded hot plate technique - ASTM standards (C- 518, C-236 and C-231) steady state radial heat flow method - cylinder without end guards - cylinder with end guards - sphere with central heating source - concentric cylinder comparative technique steady state heat of vaporization method	fitch technique line heat source technique plane heat source technique statistical modeling technique frequency response technique packed bed analysis technique

ความสัมพันธ์ของค่าการนำความร้อนกับปัจจัยต่าง ๆ

ค่าการนำความร้อนของสารบริสุทธิ์ เช่น ไขมัน (ปราศจากน้ำ) อาจกำหนดให้เป็นค่าคงที่ได้ เช่น

$$k = 46.0 \text{ (เนื้อ)} \quad (\text{Sweat, 1975})$$

$$k = 50.0 \text{ (เนื้อ)} \quad (\text{Backstrom and Emblik, 1965 cited in Dincer, 1997})$$

$$k = 18.0 \text{ (ไขมัน)} \quad (\text{Backstrom and Emblik, 1965 cited in Dincer, 1997})$$

สำหรับอาหารที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลักนั้นสมการหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้ทำ

นายค่าการนำความร้อนมีรูปแบบสมการเหมือนกับค่าความร้อนจำเพาะ เช่น

$$k = 0.26 + 0.34 x_w \quad (\text{Backstrom and Emblik, 1965 cited in Dincer, 1997})$$

$$k = 0.056 + 0.57 x_w \quad (\text{Bowman, 1970 cited in Lamb, 1976})$$

$$k = 0.081 + 0.568 x_w \quad (\text{Bowman, 1970 cited in Lamb, 1976})$$

$$k = 0.140 + 0.42 x_w \text{ (น้ำผลไม้)} \quad (\text{Kolarov and Gromov, 1973 cited in Lamb, 1976})$$

เพื่อที่จะให้ได้ช่วงอุณหภูมิเหนือจุดเยือกแข็งที่กว้างขึ้น ในสมการควรจะคิดถึงผลของ อุณหภูมิ โดยควรรวมเทอม อุณหภูมิ ( $T$ ) และค่ายกกำลังสองของอุณหภูมิ ( $T^2$ ) ไว้ในสมการด้วย เพราะค่าการนำความร้อนของน้ำแปรผันเป็นแบบยกกำลังสองกับอุณหภูมิ (Sweat, 1994) สำหรับอาหารเหลวโดยส่วนใหญ่ และอาหารในรูปของแข็งหลายชนิด สามารถคิดผล ขององค์ประกอบทางเคมี เช่น น้ำ โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และเถ้าได้ โดยมีการพัฒนา สมการสำหรับหาค่าการนำความร้อนของอาหารเหลวจากองค์ประกอบดังกล่าว พบว่าค่าที่ทำนาย ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดโดยตรง (Dominguez *et al.*, 1974; Choi and Okos, 1983; Sweat, 1994)

### 3. ความหนาแน่น (Mohsenin, 1980; Rahman, 1995)

ความหนาแน่น (density;  $\rho$ ) เป็นหนึ่งในสมบัติทางกายภาพที่มีความสำคัญและนำไป ใช้คำนวณ ในหลาย ๆ กระบวนการ ความหนาแน่น คืออัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรมีหน่วยเป็น  $\text{kg/m}^3$  ในระบบ SI และ  $\text{lb/ft}^3$  ในระบบอังกฤษ

$$\rho = \frac{m}{v}$$

ความหนาแน่นมีหลายชนิด ที่สำคัญ ได้แก่

1) Bulk density แสดงถึงความหนาแน่นของวัสดุเมื่อบรรจุหรือเรียงตัว ดังนั้น ปริมาตรที่ใช้คำนวณจึงรวมถึงปริมาตรของช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการบรรจุด้วย ตัวอย่างเช่น เมล็ด ข้าวโพดความชื้น 7 % ที่เก็บในไซโล มีความหนาแน่นเป็น  $47 \text{ lb/ft}^3$

2) Apparent density แสดงถึงค่าความหนาแน่นของวัสดุที่คิดรวมช่องว่างที่อยู่ภายใน

วัสดุด้วย ตัวอย่างเช่น ค่า apparent density ของเมล็ดข้าวโพด คือน้ำหนักของเมล็ดข้าวโพดแต่ละเมล็ดหารด้วยปริมาตรของเมล็ดข้าวโพด มีค่าเป็น 80 lb/ft<sup>3</sup>) True density เป็นความหนาแน่นของสารบริสุทธิ์หรือวัสดุที่คำนวณจากปริมาตร ของของแข็งภายในวัสดุนั้น ๆ ตัวอย่างเช่น ค่า true density ของเมล็ดข้าวโพดที่บดและมีขนาดอนุภาค 300 ต. m มีค่าประมาณ 96 lb/ft<sup>3</sup> เนื่องจากความหนาแน่นเป็นการคำนวณจากมวลต่อปริมาตร การหาปริมาตรของวัตถุ ทำได้หลายวิธี ได้แก่การวัดจากขนาดของวัตถุโดยตรง (dimension measurement) การคำนวณ จากแรงลอยตัว (buoyant force determination) วิธีแทนที่ปริมาตร (volume displacement method) โดยใช้ของเหลว (liquid displacement method) ใช้ก๊าซ (gas pycnometer method) หรือใช้วิธีแทนที่ด้วยของแข็ง (solid displacement method) เป็นต้น

#### 4. ค่าการแพร่ความร้อน

ค่าการแพร่ความร้อน (thermal diffusivity;  $\alpha$ ) เป็นสมบัติทางความร้อนที่คำนวณจากค่าความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อน และความหนาแน่น มีรูปแบบสมการเป็น

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$$

นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่าการแพร่ความร้อนจากองค์ประกอบของอาหาร ได้แก่ Riedel's correlation (Riedel, 1969 cited in Dincer, 1997)

$$\alpha = 0.88 \times 10^{-7} + (\alpha_w - 0.88 \times 10^{-7})x_w \quad (\text{Riedel, 1969 cited in Dincer, 1977})$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ ค่าการแพร่ความร้อนของน้ำที่มีอุณหภูมิเท่ากับอาหาร (m<sup>2</sup>/s)

ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถใช้ได้เมื่อตัวอย่างมีความชื้นสูงกว่า 40% และมีอุณหภูมิ 0-80°C

Martens (1980) ได้ศึกษาผลของน้ำ โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรตและอุณหภูมิต่อค่า การแพร่ความร้อนของอาหาร พบว่าอุณหภูมิและปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าการ แพร่ความร้อน ดังสมการ

$$\alpha = [0.057363x_w + 0.000288(T + 273)] \times 10^{-4} \quad (\text{Martens, 1980})$$

นอกจากสมบัติทางความร้อนที่ได้กล่าวถึงข้างต้นแล้ว ยังมีสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การถ่ายเทความร้อน ได้แก่ ลักษณะทางมิติ (dimensional characteristic) เช่น รูปร่าง ขนาด พื้นที่ผิว ปริมาตร ความเป็นทรงกลม ความหนืดของของไหล เป็นต้น (Mohsenin1980).

## การประยุกต์หลักการถ่ายเทความร้อนกับการจัดการผลิตผลทางการเกษตร

ได้มีการประยุกต์ใช้หลักการถ่ายเทความร้อนร่วมกับการใช้ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ในการจัดการผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยว เช่นงานวิจัยของ Varith *et al.* (2002) ซึ่งประยุกต์หลักการ ถ่ายเทความร้อนในการคัดเกรดผลแอปเปิล โดยพบว่าในผลแอปเปิลที่มีรอยช้ำนั้นสมบัติทางความร้อนในเนื้อเยื่อที่เสียหายจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้น 20 % ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น 5 % ส่วนค่าความร้อนจำเพาะไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นค่าการแพร่ความร้อน ของเนื้อเยื่อที่เสียหายจึงเพิ่มขึ้น 14.3 % มีผลให้การถ่ายเทความร้อนจากภายนอกผลไปยังภายในเกิดขึ้นได้เร็วกว่าเนื้อเยื่อปกติที่อยู่รอบข้าง อุณหภูมิที่ผิวแอปเปิลในบริเวณที่มีรอยช้ำจึงมีค่าต่ำกว่า ที่ผิวปกติ 1-2 °C

Wang *et al.* (2001) พัฒนาแบบจำลองโดยใช้ระเบียบวิธี finite difference เพื่อศึกษา ผลของปัจจัยต่าง ๆ เช่น สมบัติทางความร้อน ขนาดของผลไม้ ชนิดและความเร็วของตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีต่อระยะเวลาในการให้ความร้อนผลไม้ โดยพบว่าสมบัติทางความร้อนมี ผลต่อระยะเวลาในการให้ความร้อนไม่มากนัก ส่วนใหญ่การถ่ายเทความร้อนภายในแปรผันกับ ขนาดของผลไม้และชนิดของตัวกลาง โดยน้ำมี ประสิทธิภาพมากกว่าอากาศ การเพิ่มความเร็วของ อากาศจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มความเร็วของน้ำกลับมีผลต่อการถ่ายเท ความร้อนน้อย ทั้งนี้เนื่องจากค่า  $Bi$  ที่คำนวณได้ในแต่ละความเร็วมีค่าสูงกว่า 50 ซึ่งบ่งชี้ว่า ความต้านทานความร้อนที่ผิวมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความต้านทานภายใน การเพิ่มความเร็วของ น้ำจึงไม่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิ แบบจำลองการกระจายอุณหภูมิที่ใช้นั้นเมื่อเปรียบเทียบกับ ค่าที่ได้จากการวัด พบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิใจกลางผลมีค่าเป็น 1.10 °C และที่ผิวมีความ แตกต่างเป็น 0.30 °C นอกจากนี้ยังมีการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในผลแตงกวาขณะ ผ่านกระบวนการลวกโดยใช้ระเบียบวิธี finite difference ซึ่งผลการศึกษาสามารถประยุกต์ใช้ในการพัฒนาและออกแบบเครื่องมือให้เหมาะสมกับกระบวนการได้เป็นอย่างดี (Fasina and Fleming, 2001) ในสตรอเบอร์รี่ Scheerlinck *et al.* (2004) ร่วมกันศึกษาผลของกระบวนการทาง ความร้อนเพื่อลดการปนเปื้อนที่ผิว โดยใช้ระเบียบวิธี finite element ติดตามการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิร่วมกับตัวแปรที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ และพบว่าการให้ความร้อนเป็น ช่วงสั้น ๆ จะลดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในได้ดีกว่า ซึ่งมีผลทำให้การสูญเสียคุณภาพของสตรอเบอร์รี่ลดลง ในด้านการทำความเย็น มีการประยุกต์ใช้หลักการถ่ายเทความร้อนและระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิภายในผลิตผล โดย Alvarez and Trystram (1995) ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศเย็นกับผลิตผลทางการเกษตรที่บรรจุและวาง เรียงบน pallet พบว่าที่ความเร็วลมเท่ากัน การใช้แบบจำลองจะช่วยให้ทราบตำแหน่งที่ร้อนที่สุด (hottest point) และ ตำแหน่งที่เย็นที่สุด (coldest point) นอกจากนี้การเพิ่มความเร็วลมมีผลให้ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิจึงลดลง แต่ถ้าสัมประสิทธิ์การพา ความร้อนมีค่าสูงมากจะมีผลต่อการลดอุณหภูมิไม่แตกต่างกัน ผลจากงานวิจัยนำมาใช้ในการ ควบคุมกระบวนการทำความเย็นให้เหมาะสม ทำให้ระยะเวลาในการทำความเย็นลดลงได้ 20 % ซึ่งมีผลต่อการประหยัดพลังงานโดยรวม

ในด้านคุณภาพได้มีการประยุกต์ใช้ในการศึกษาการสูญเสียคุณภาพ โดยพบว่าเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุล การเพิ่มความเร็วของอากาศจะทำให้เกิดการสูญเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษา แต่ในทางตรงกันข้าม การสูญเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษาจะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วของ อากาศโดยที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมากกว่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (Tashtoush, 2000) Fikiin *et al.* ( 1999) ได้สร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวหน้าขณะทำความเย็นผลไม้บางชนิด ได้แก่ สตรอเบอร์รี่ ราสเบอร์รี่ แอปริคอต พีช องุ่น และแอปเปิล ซึ่งสมการดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการพัฒนา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในอุตสาหกรรมที่เกี่วข้องได้ นอกจากนี้ยังมีการสร้างแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอัตราการถ่ายเทมวลสารและพลังงานความร้อนของผลิตภัณฑ์ภายในภาชนะบรรจุในสภาวะอากาศเย็น โดยคำนึงถึงปัจจัยและรูปแบบการถ่ายเททุกกรณีที่เกิดขึ้น ระหว่างผลิตภัณฑ์ ภาชนะบรรจุ และตัวกลางความร้อน (Tanner *et al.*, 2002)

นอกจากงานด้านพืชสวนแล้ว การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการแก้ปัญหาด้าน การถ่ายเทความร้อนยังใช้กันแพร่หลายในงานด้านพืชไร่ Khabba *et al.* (1999) ได้สร้างแบบ จำลองเพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในฝักข้าวโพดและทดสอบแบบจำลองทั้งในขณะทำ ความเย็นและให้ความร้อน โดยแบ่งโครงสร้างภายในเป็น 3 ชั้นคือ เปลือกข้าวโพด (husk) เมล็ด ข้าวโพด (kernel) และช่งข้าวโพด (cob) อุณหภูมิที่ทำนายได้เปรียบเทียบกับที่ทดลองพบว่ามี ความแตกต่างอยู่ที่ 0.4 °C และ 1.0°C ตามลำดับ (ช่วงอุณหภูมิ 5-25°C) ในการเก็บรักษามะลิคพีช กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในถึงเก็บมีผล โดยตรงต่อคุณภาพของเมล็ด แบบจำลองการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายในถึงสามารถ ทำนายได้โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ตัวอย่างเช่นการเก็บข้าวเปลือกในถังทรงกระบอกซึ่ง Abe and Basunia ( 1996) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการกระจายความชื้นในสภาวะอากาศ ที่แปรผันตามฤดูกาล โดยใช้วิธี finite difference เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ พบว่ามีความแตกต่าง อยู่ที่ 1.5-1.8 °C ผลจากการวิจัยพบว่าเมื่อเมล็ดแห้งอย่างเหมาะสมและไม่มีการถ่ายเทความชื้นผ่าน ผนังของถึงเก็บ จะสามารถเก็บรักษาผลิตผลได้โดยไม่มีแมลงมารบกวนตลอดช่วงฤดูหนาว (อุณหภูมิต่ำกว่า 20 °C) นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาแบบจำลองการกระจายอุณหภูมิในสภาวะไม่คงตัว ในถึงเก็บข้าวสาลีโดยใช้ระเบียบวิธี finite element ซึ่งมีประโยชน์ในการพัฒนาและออกแบบ กระบวนการระบายอากาศภายใน ทำให้ลดปริมาณการใช้สารเคมีระหว่างการเก็บรักษาลงได้ (Jia *et al.*, 2001)

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

##### วัตถุดิบ

ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง จากไร่สีซัด อ.ท่าตะเียบ จ.ฉะเชิงเทรา ระยะความแก่ทางการค้า (คุณภาพส่งออก) โดยคัดเลือกผลที่มีน้ำหนัก 300-350 g ปราศจากตำหนิ บาดแผล และการเข้าทำลายของโรคและแมลง (ภาพที่ 3)



ภาพที่ 3 ผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ระยะความแก่ 80-90 เปอร์เซ็นต์ที่ใช้ในการศึกษา

##### การเตรียมวัตถุดิบ

ทำการตัดขั้วมะม่วง คว่ำผลมะม่วงในกล่องที่รองด้วยกระดาษหนังสือพิมพ์ เพื่อซับน้ำยาง รอจนกระทั่งยางมะม่วงหยุดไหล จึงล้างทำความสะอาดผลมะม่วงด้วยน้ำประปาที่ไหล วางลงในตระกร้า จนกระทั่งผลแห้ง จึงนำผ่านกระบวนการให้ความร้อน



ภาพที่ 4 การเตรียมมะม่วง

### การให้ความร้อน

นำผลมะม่วงไปผ่านการให้ความร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่มีอุณหภูมิของน้ำ  $48 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  องศาเซลเซียส (ภาพที่ 5) ทำการตรวจวัดและบันทึกอุณหภูมิด้วย Data Logger System (Ebro Electronic; EBI-2-TH-612, Germany) จนผลมะม่วงที่บริเวณใจกลางผลมีอุณหภูมิเท่ากับ  $47.5$  จึงทำการจับเวลาต่ออีก 10 นาที หลังจากนั้นนำผลมะม่วงขึ้นจากอ่างควบคุมอุณหภูมิ ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 5 แสดงขั้นตอนการให้ความร้อนแก่มะม่วง

### ขั้นตอนศึกษา

แบ่งมะม่วงออกเป็น 3 ชุดทดลอง คือ

ชุดทดลองที่ 1 เก็บรักษามะม่วงภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิ  $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  ทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทุกๆ 2 วัน

ชุดทดลองที่ 2 เก็บรักษามะม่วงภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิ  $5 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  ทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทุก ๆ 5 วัน

ชุดทดลองที่ 3 เก็บรักษามะม่วงภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิ  $13 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  ทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทุก ๆ 5 วัน เช่นเดียวกับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$

ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงดังต่อไปนี้

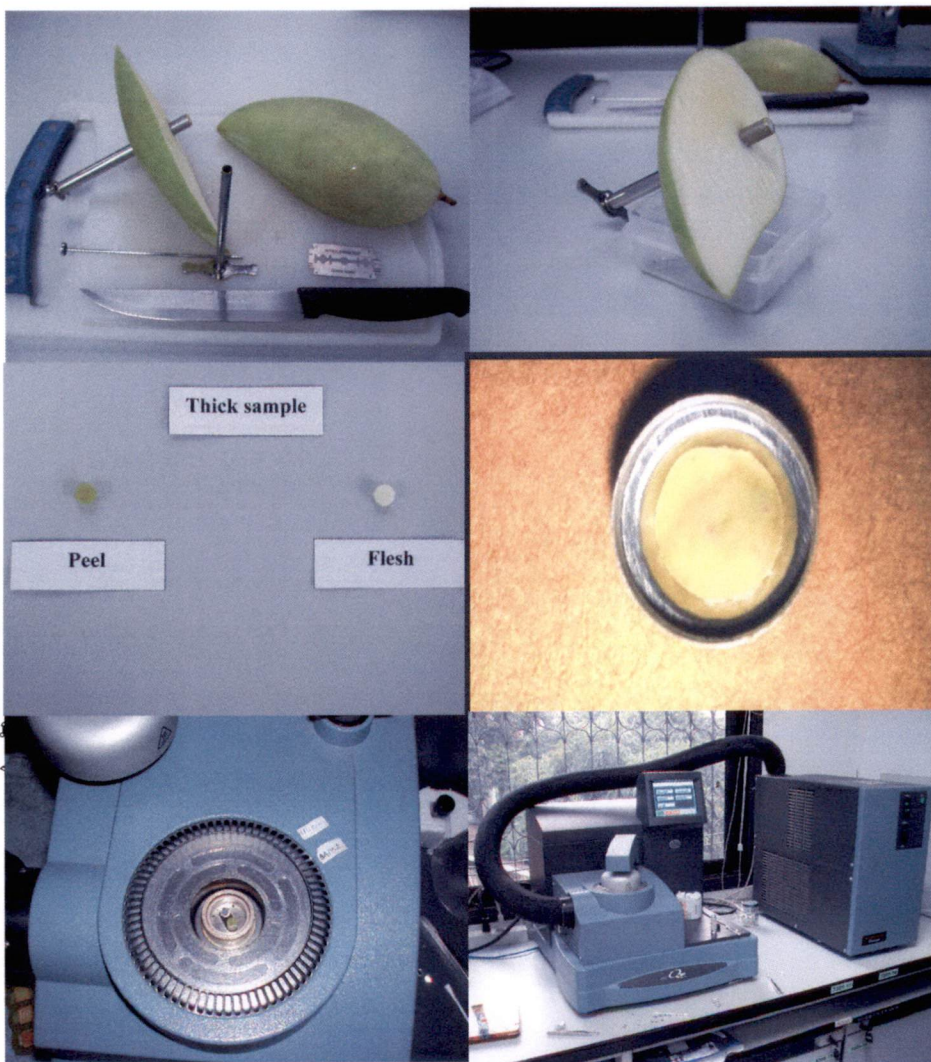
### ค่าความร้อนจำเพาะ

วัดค่าความร้อนจำเพาะ โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC, TA Instruments, 1998)

ตัดตัวอย่างชิ้นตัวอย่างมะม่วง (เปลือก และ เนื้อ) ด้วย cork borer ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.20 มม. ให้มีความหนาของตัวอย่างมะม่วงน้อยกว่า 1 มม. ชั่งตัวอย่างให้มีน้ำหนักประมาณ 10.0-11.0 มิลลิกรัม บรรจุลงในถ้วยอลูมิเนียม (aluminium hermetic pan) จากนั้นทำการปิดฝาด้วยเครื่องปิดผนึกภายใน 30 วินาที เพื่อป้องกันการสูญเสียไอน้ำ นำถ้วยที่บรรจุตัวอย่างแล้ววางในช่องสำหรับวางตัวอย่าง นำถ้วยเปล่าที่ปิด

ผ่าแล้วมวางในช่อง reference วัดค่าความร้อนจำเพาะในหน่วย  $J/g^{\circ}C$ . (ภาพที่ 6) โดยกำหนดขั้นตอนการทำงานของเครื่องดังนี้

- 1) Data Storage Off
- 2) Equilibrate at  $0.0^{\circ}C$
- 3) Modulate  $\pm 1.0^{\circ}C$  ever 60 seconds
- 4) Isothermal for 5.00 mins
- 5) Data Storage On
- 6) Ramp  $2.00^{\circ}C/min$  to  $100.00^{\circ}C$
- 7) End of method



ภาพที่ 6 แสดงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการวัดค่าความร้อนจำเพาะและค่าการนำความร้อน โดยเครื่อง DSC

### ค่าการนำความร้อน

ค่าการนำความร้อนวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง DSC (ASTM, 1998) โดยการเตรียมตัวอย่าง 2 ขนาด คือ แผ่นบาง ซึ่งมีความหนาประมาณ 0.4 มม. บรรจุลงในถ้วยอลูมิเนียม และ ใช้วัดค่าความร้อนจำเพาะ และ แผ่นหนาซึ่งเป็นทรงกระบอกมีความหนาประมาณ 3.5 มม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 6.3 มม. ใช้วัดค่าความจุความร้อนปรากฏ โดยมี Polystyrene ๒ ปืนวัสดุที่ใช้ในการ calibrate กำหนดขั้นตอนการทำงานของเครื่องดังนี้ปิดฝาด้วยเครื่องปิดผนึกภายใน 30 วินาที เพื่อป้องกันการสูญเสีย น้ำ นำถ้วยที่บรรจุตัวอย่างแล้ววางในช่องสำหรับวางตัวอย่าง นำถ้วยเปล่าที่ปิดฝาแล้วมาวางในช่อง reference วัดค่าความร้อนจำเพาะในหน่วย J/g °C. โดยกำหนดขั้นตอนการทำงานของเครื่องดังนี้

- 1) Data storage OFF
- 2) Equilibrate at 30°C
- 3) Modulate  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  every 80 seconds
- 4) Data storage ON
- 5) Isothermal for 20 minutes
- 6) Data storage OFF
- 7) Equilibrate at 30°C
- 8) Modulate  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  every 80 seconds
- 9) Data storage ON
- 10) Isothermal for 20 minutes

คำนวณค่าการนำความร้อนของมะม่วงที่อุณหภูมิ 28 °C โดยมีขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้  
ค่าการนำความร้อนที่วัดได้คำนวณจากสมการ

$$k_0 = \frac{8LC^2}{C_p m d^2 P}$$

เมื่อ

$L$	=	— sample length (mm)
$C$	=	apparent heat capacity (mJ/°C)
$C_p$	=	specific heat capacity (J/g°C)
$M$	=	thick specimen mass (mg)
$d$	=	thick specimen diameter (mm)
$P$	=	period of measurement (sec)

### วัดค่าการรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ (% Electrolyte leakage, %EL)

ปอกเปลือกมะม่วงด้วยมีดปอกผลไม้ เจาะส่วนเปลือกด้วย cork borer ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร สุ่มตัวอย่างเปลือกมะม่วงมา 15 ชิ้น ล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากอออน 2 ครั้ง ซับด้วยกระดาษทิชชู แบ่งออกเป็น 3 ซ้ำ ๆ ละ 5 ชิ้น

นำผลมะม่วงที่ปอกเปลือกแล้วมาเจาะด้วย cork borer ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร หั่นมะม่วงให้มีความหนาประมาณ 4 มิลลิเมตร สุ่มตัวอย่างเนื้อมะม่วงมา 15 ชิ้น ล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากอออน 2 ครั้ง ซับด้วยกระดาษทิชชู แบ่งออกเป็น 3 ซ้ำ ๆ ละ 5 ชิ้น

นำเปลือกและเนื้อที่เตรียม แหในสารละลายแมนนิทอล 0.4 โมลาร์ ปริมาตร 25 มิลลิลิตรที่อยู่ในพลาสติก วางไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง นำสารละลายมาวัดค่าการนำไฟฟ้า โดยใช้เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า เทสารละลายกลับลงไปในพลาสติกใบเดิม นำไปนึ่งในหม้อนึ่งความดันเพื่อทำลายผนังเซลล์ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ปล่อยให้เย็น นำไปวัดค่าการนำไฟฟ้าอีกครั้ง คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ของเปลือกและเนื้อผลมะม่วง

$$\% EL = \frac{\text{ค่าการนำไฟฟ้าของสารอิเล็กโทรไลต์ที่รั่วไหลออกมา} \times 100}{\text{ค่าการนำไฟฟ้าของสารอิเล็กโทรไลต์ทั้งหมด}}$$

### ประเมินการเกิดอาการสะท้อนหนาว (Injury index)

ประเมินการเกิดอาการสะท้อนหนาว โดยการพิจารณาจากลักษณะปรากฏ และให้คะแนนดังนี้

0 = no pitting or no injured

1 = slight injured (a few scattered injury)

2 = moderately injured covering up to 30% of the fruit surface

3 = severely injured or pitting (extensive injured covering > 30 % of the fruit surface.

และคำนวณการเกิดอาการสะท้อนหนาวจากสมการต่อไปนี้

$$Injury\ index = \sum_0^4 \frac{(injury\ level) \times (number\ of\ fruit)}{Total\ number\ of\ fruit}$$

ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสีเปลือกและสีเนื้อ โดยใช้เครื่อง colorimeter บันทึกค่า L\* a\* b\*(ระบบ CIE)

ตรวจวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดจากน้ำคั้นมะม่วง โดยใช้ Digital Refractometer

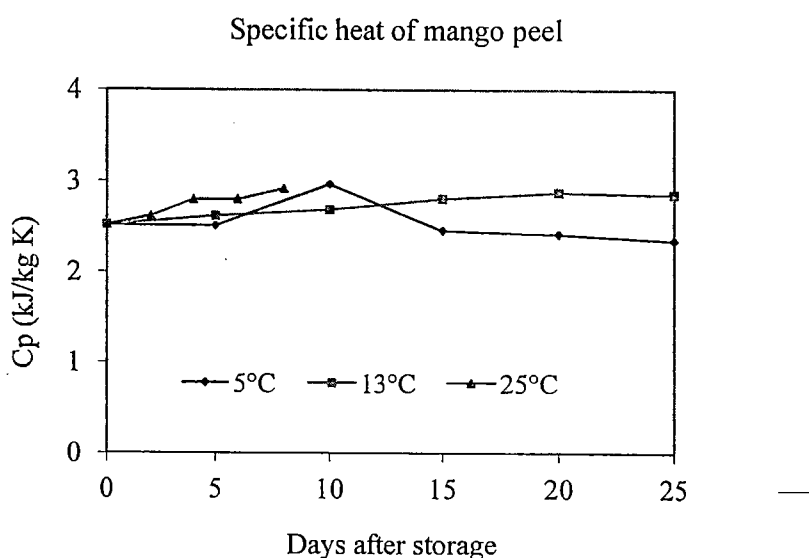
ตรวจวัดอัตราการทำลายของผลมะม่วงในสภาพปิด โดยใช้เครื่อง Head space analyzer

## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5, 13 และ 25 องศาเซลเซียส สมบัติทางความร้อน ที่ศึกษา ได้แก่ ค่าความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ), ค่าการนำความร้อน ( $k$ ), การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพ

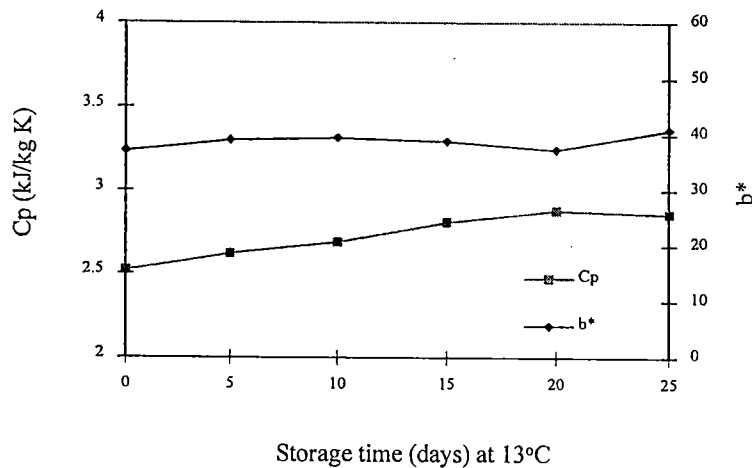
ค่าความร้อนจำเพาะที่เปลือกและเนื้อมะม่วง (Specific heat;  $C_p$ )



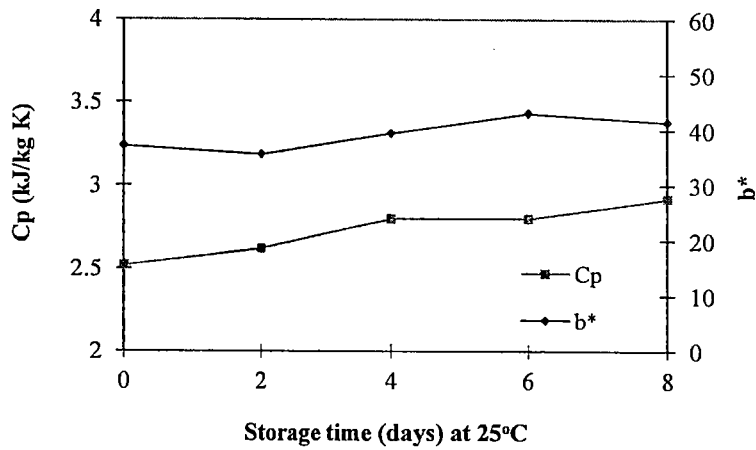
ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนจำเพาะที่เปลือกของมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองที่เก็บรักษาในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 5, 13 และ 25 องศาเซลเซียส

ค่าความร้อนจำเพาะที่เปลือกของมะม่วงที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 และ 25 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้นที่มีค่าความร้อนจำเพาะที่เปลือกเท่ากับ 2.52 kJ/kg.K เพิ่มขึ้นเป็น 3.56 และ 2.86 kJ/kg.K หรือคิดเป็น 41.27 และ 13.49 เปอร์เซ็นต์ ในวันที่ 8 และ 25 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 และ 13 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ภาพที่ 7) โดยผลมะม่วงที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนจำเพาะจะมีอัตราการเพิ่มและมีค่าสูงกว่า ค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกมะม่วงที่

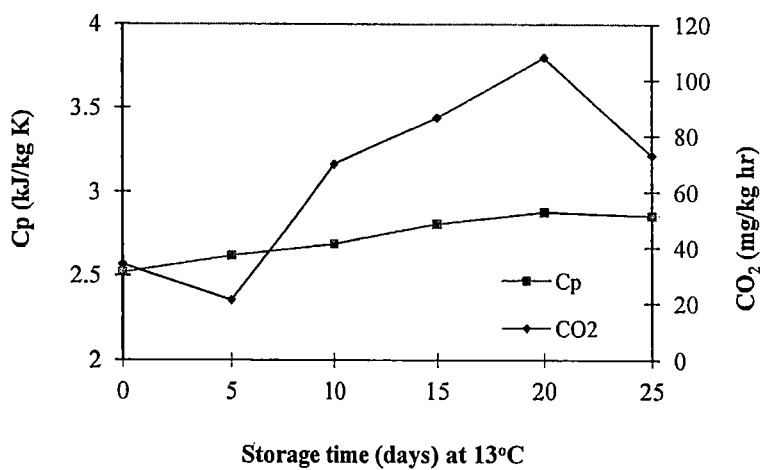
เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส จึงกล่าวได้ว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษา มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนจำเพาะที่เปลือกของมะม่วงสดคล้ายกับ Gabas et al. (2005) พบว่าค่าความร้อนจำเพาะของพลัม มีความสัมพันธ์แบบโพสิทีฟกับอุณหภูมิ ดังนั้นมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 25 องศาเซลเซียส จึงมีค่าความร้อนจำเพาะที่เปลือกสูงกว่าผลมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 13 องศาเซลเซียส นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกมะม่วงที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 และ 25 องศาเซลเซียสมีความสัมพันธ์กับกระบวนการสุกอีกด้วย ดังจะเห็นจากผลมะม่วงที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 และ 25 องศาเซลเซียส มีการพัฒนาของผลระหว่างกระบวนการสุก เช่น การเปลี่ยนแปลงสีเปลือกจากสีเขียว เป็นสีเหลือง (ค่า  $b^*$ , ภาพที่ 8 และ 9) หรือการเพิ่มขึ้นของการหายใจระหว่างการเก็บรักษา (ภาพที่ 10 และ 11) เป็นต้น



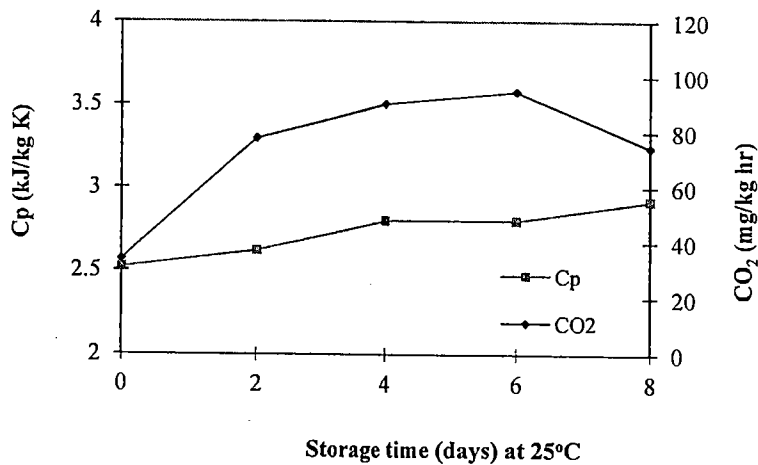
ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ) และการเปลี่ยนแปลงค่า  $b^*$  ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะ (Cp) และการเปลี่ยนแปลงค่า b\* ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

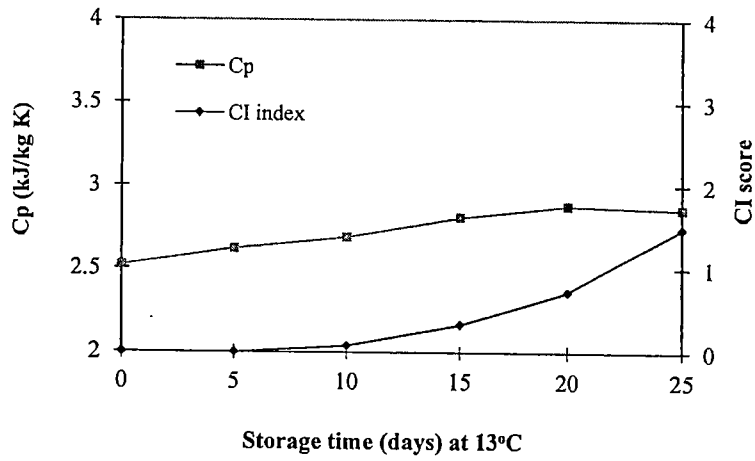


ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกมะม่วง (Cp) และอัตราการหายใจการของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส

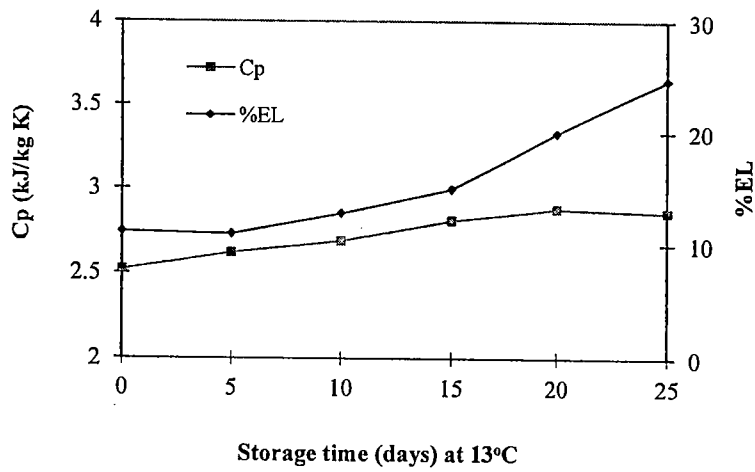


ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกมะม่วง (Cp) และอัตราการหายใจการของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

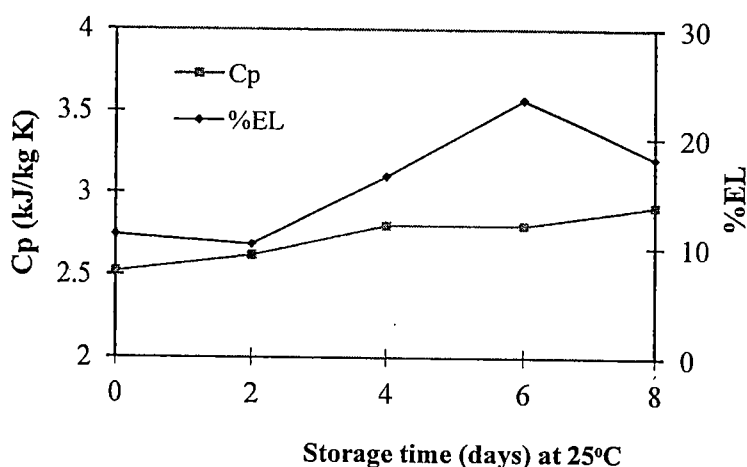
เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกมะม่วงร่วมกับการเกิดอาการระคายเคืองของผลมะม่วงที่เก็บรักษาที่อุณหภูมินี้ พบว่า ค่าความร้อนจำเพาะที่เปลือกมะม่วงจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการสุก จากวันเริ่มต้นที่มีค่าเท่ากับ 2.52 kJ/kg K เป็น 2.8786 kJ/kg K หรือประมาณ 14.23 เปอร์เซ็นต์ ในวันที่ 20 ของการเก็บรักษา (ซึ่งเป็นวันที่ผลแสดงอาการระคายเคืองเห็นชัดเจน) และมีค่าสูงสุด (ภาพที่ 12) สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนจำเพาะที่เปลือกของผลมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 25 องศาเซลเซียส ที่พบว่า ค่าดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นตามระยะการสุกของผล จึงกล่าวได้ว่า การเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนจำเพาะที่เปลือกของผลมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 13 องศาเซลเซียส เป็นผลเนื่องจากการเสื่อมสภาพของเซลล์ (senescence) ซึ่งจะเห็นจากการที่เปลือกมีการร่วงไหลของสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 13 และ 14) และกระบวนการสุกก็เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการเสื่อมสภาพของเซลล์ (Siripanich, 2003 and 2006)



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะ (Cp) และคะแนนการเกิดอาการสะท้อนหนาวของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส



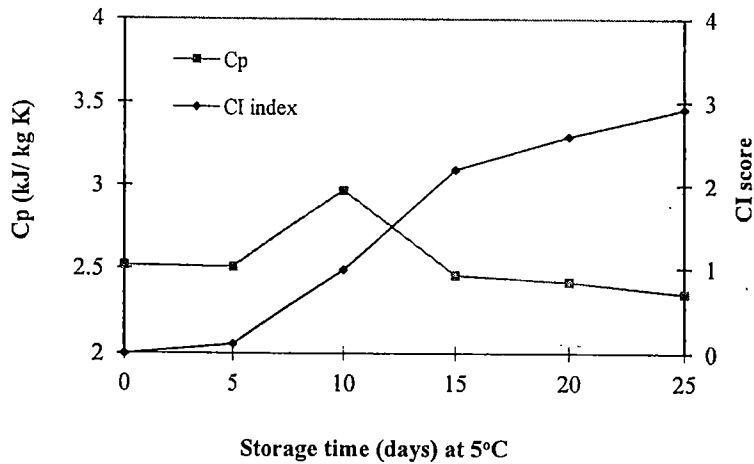
ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะ (Cp) และค่าการรั่วไหลของสารเอทิลีนไตรไลต์ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส



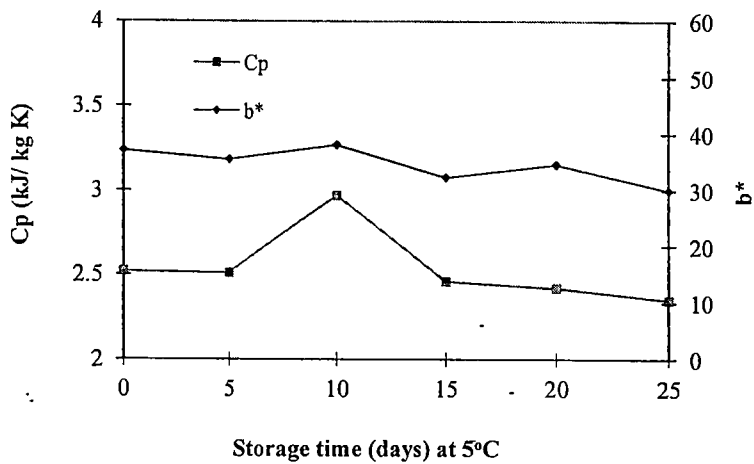
ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะ (Cp) และค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ในขณะที่ความร้อนจำเพาะของเปลือกมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 5 องศาเซลเซียส ในช่วง 5 วันแรกของการเก็บรักษาค่าความร้อนจำเพาะที่เปลือกมีค่าคงที่และจะมีค่าเพิ่มขึ้นมีค่าสูงสุดในวันที่ 10 ของการเก็บรักษา โดยมีค่าเท่ากับ 2.97 kJ/kg K ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เห็นอาการระคายเคืองที่เปลือกของผลมะม่วงที่เก็บรักษาที่อุณหภูมินี้ได้อย่างชัดเจน (คะแนนเท่ากับ 0.98, ภาพที่ 15) หลังจากนั้นค่าความร้อนจำเพาะที่เปลือกจะมีค่าลดลงเหลือเท่ากับ 2.35 kJ/kg K ในวันที่ 25 ของการเก็บรักษา และไม่พบว่ามีค่าแตกต่างของค่าความร้อนจำเพาะที่เปลือกมะม่วงระหว่างวันแรกและวันที่ 25 ของการเก็บรักษา ณ. อุณหภูมินี้ค่อนข้างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ การเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 5 องศาเซลเซียสจะแตกต่างจากการเพิ่มของค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 13 และ 25 องศาเซลเซียส เนื่องจากมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 5 องศาเซลเซียส ผลจะไม่มีการพัฒนาเข้าสู่กระบวนการสุกอย่างเช่น ผลมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 13 และ 25 องศาเซลเซียส ดังจะเห็นได้จากเปลือกจะมีการพัฒนาของสีเปลือกช้ากว่าผลมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 13 และ 25 องศาเซลเซียส ดังจะเห็นได้จากค่า  $b^*$  ของเปลือกที่แสดงความเป็นสีเหลือง (+b) ของผลมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 5 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 16) มีค่าต่ำกว่าผลมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 13 และ 25 องศาเซลเซียส โดยมีค่าเท่ากับ 30.03, 40.94 และ 41.47 เมื่อเก็บรักษาที่ 5, 13 และ 25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ หรือการที่ผลมีอัตราการหายใจที่ต่ำและคงที่ตลอดการเก็บรักษา (ภาพที่ 17) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเมื่อเปลือกมะม่วงเริ่มมีอาการระคายเคือง (วันที่ 10 ของการเก็บรักษา) ค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกมะม่วงจะมีค่าเพิ่มขึ้นคิดเป็น 15.87

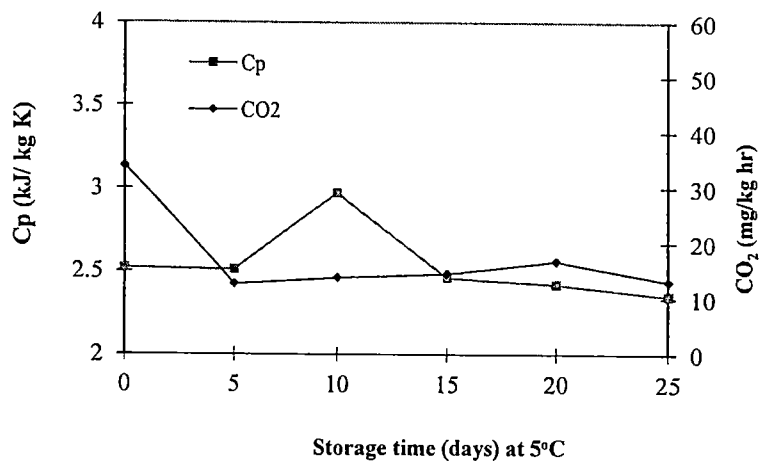
เปอร์เซ็นต์หลังจากนั้นค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกจะลดลงตลอดระยะเวลาเก็บ แตกต่างจากผลมะม่วงที่เปลือกมีการพัฒนาเข้าสู่กระบวนการสุกที่ค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเก็บ



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ) และคะแนนการเกิดอาการสะท้อนขาวของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส

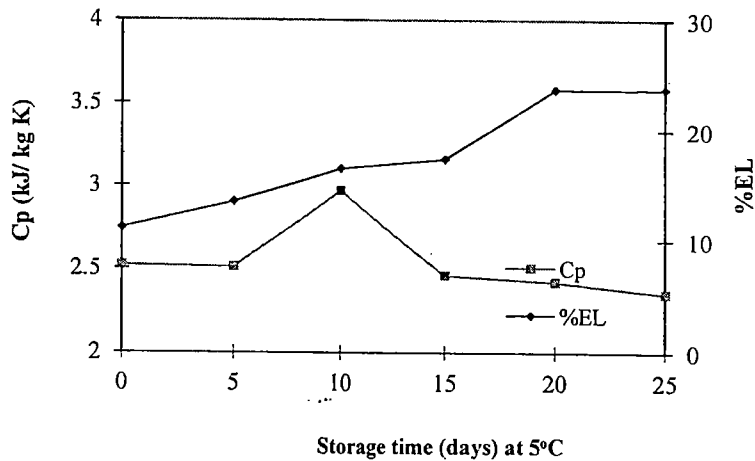


ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ) และการเปลี่ยนแปลงค่า  $b^*$  ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของเปลือก (Cp) และอัตราการหายใจของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกพร้อมกับค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโตรไลต์ที่เปลือก เมื่อเก็บรักษาไว้ที่ 5 องศาเซลเซียส พบว่าในช่วง 10 วันแรกของการเก็บรักษา ค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกมะม่วงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโตรไลต์ หลังจากนั้นค่าความร้อนจำเพาะจะลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้นในวันที่ 25 ของการเก็บรักษา ในขณะที่ค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโตรไลต์ที่เปลือกจะเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงของอาการสะท้านหนาว (ภาพที่ 18)



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ) และค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโตรไลต์ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส

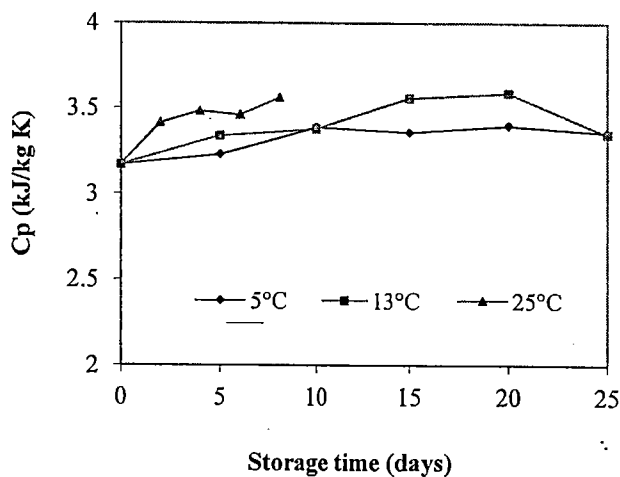
จากผลการทดลอง สรุปได้ว่าค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกมะม่วงจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาและการสุก โดยมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 25 องศาเซลเซียสจะมีการเพิ่มของค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกเร็วกว่ามะม่วงที่เก็บรักษาที่ 13 องศาเซลเซียส ส่วนเปลือกมะม่วงที่เกิดอาการระคายเคืองผิวหนังจะมีค่าความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการเกิด แต่หลังจากนั้นค่าความร้อนจำเพาะจะลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้น

#### ค่าความร้อนจำเพาะที่เนื้อ (Specific heat; $C_p$ )

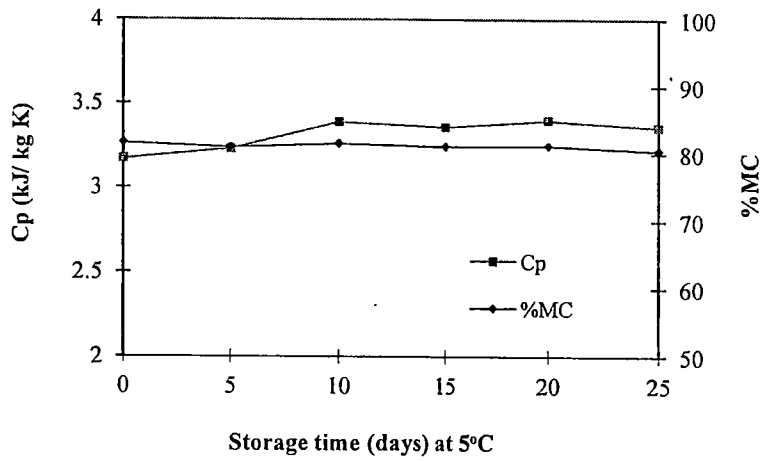
เมื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนจำเพาะที่เนื้อมะม่วง พบว่ามะม่วงที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5°C จะมีอัตราการเพิ่มของค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อมะม่วงเพิ่มขึ้นในช่วง 10 วันแรกของการเก็บรักษา โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3.17 kJ/kg K เป็น 3.39 kJ/kg K หลังจากนั้นค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อมะม่วงจะค่อนข้างคงที่คือเท่ากับ  $3.36 \text{ kJ/kg K} \pm 0.21$  จนถึงวันที่ 25 ของการเก็บรักษา (ภาพที่ 19) การที่ค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 5 องศาเซลเซียสมีค่าคงที่ น่าจะเป็นผลมาจากการที่เนื้อมะม่วงมีปริมาณความชื้นของเนื้อมะม่วงคงที่ (ไม่มีความแตกต่างของปริมาณความชื้นของเนื้อมะม่วงในระหว่างการเก็บรักษาที่ 5 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้น 95 เปอร์เซ็นต์, ภาพที่ 20) ประกอบกับการเกิดอาการระคายเคืองผิวหนังที่พบกับผลมะม่วงที่เก็บรักษาที่อุณหภูมินี้ จะเกิดเฉพาะที่เปลือกเท่านั้น จึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนจำเพาะอย่างที่เกิดกับเปลือกมะม่วง นอกจากนี้ยังพบว่าเนื้อมะม่วงจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับผลตอนเริ่มต้น ซึ่งจะพิจารณาได้จากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางกายภาพ เช่นสีเนื้อ ที่พบว่าเนื้อมะม่วงยังคงมีสีเขียวอยู่โดยไม่มีการเปลี่ยนเป็นสีเหลือง (ภาพที่ 21) ทั้งนี้การเก็บรักษามะม่วงที่อุณหภูมินี้ทำให้การพัฒนาสีเนื้อซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของ

กระบวนการสุกจะถูกยับยั้งหรือชะลอให้เกิดช้าลงสอดคล้องกับค่าอัตราการหายใจของผลมะม่วงที่เก็บรักษาที่ อุณหภูมินี้ จะมีอัตราการหายใจที่ต่ำและคงที่ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา (ภาพที่ 22) หรือพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี เช่น ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ที่มีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาที่เก็บรักษา (ภาพที่ 23) และเมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีตัวอื่น ๆ เช่น ค่าการร่วนไหลของสาร อิเล็กโตรไลต์ของเนื้อมะม่วง (ภาพที่ 24 ค่าความแน่นเนื้อ (ภาพที่ 25) ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมินี้ ก็จะพบว่ามีเปลี่ยนแปลงช้ากว่าผลมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 13 และ 25 องศาเซลเซียส จากการศึกษาของ Srivichien (2006) พบว่า ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสนานกว่า 15 วันเมื่อนำมาบ่มให้สุกที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะมีการสุกที่ผิดปกติ กล่าวคือมีคุณสมบัติทั้งทางกายภาพ และทางเคมี แตกต่างจากผลที่สุกปกติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ จึงกล่าวได้ว่าการที่ผลมะม่วงที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสมีค่าความร้อนจำเพาะที่เนื้อคงที่ในช่วงวันที่ 15 ถึงวันที่ 25 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมินี้เป็นผลที่เกิดจากอาการสะท้อนหนาวนั่นเอง

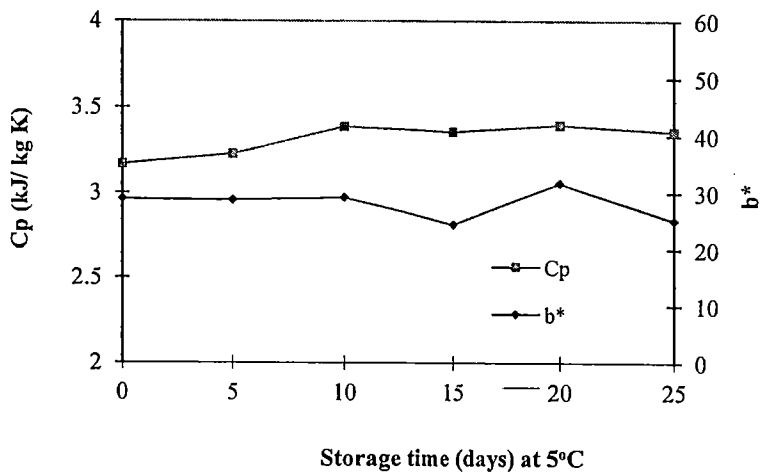
Specific heat of mango flesh



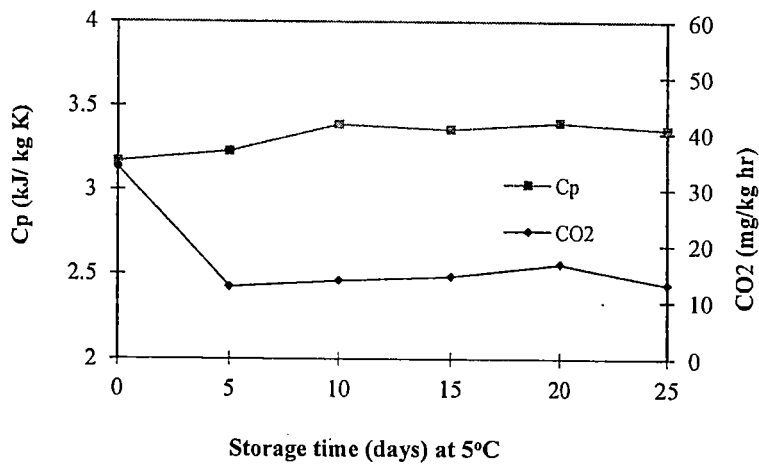
ภาพที่ 19 การเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนจำเพาะที่เนื้อของมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองที่เก็บรักษาในตู้ควบคุม อุณหภูมิ 5, 13 และ 25 องศาเซลเซียส



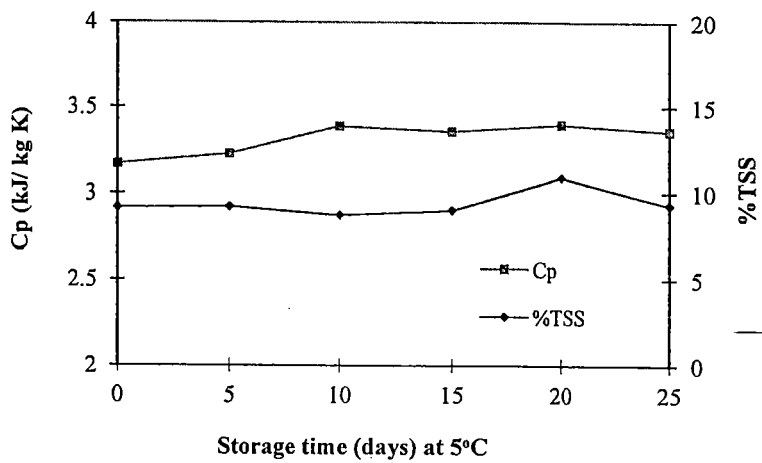
ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและปริมาณความชื้นในเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้  
สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส



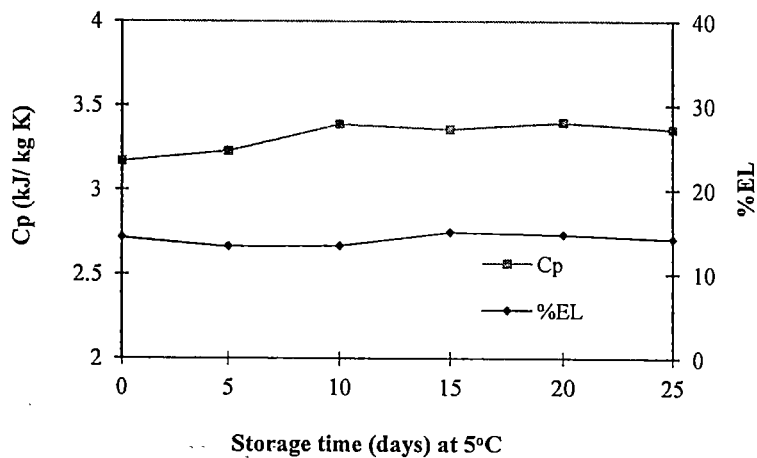
ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและการเปลี่ยนแปลงค่า b\* ของเนื้อมะม่วง  
น้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส



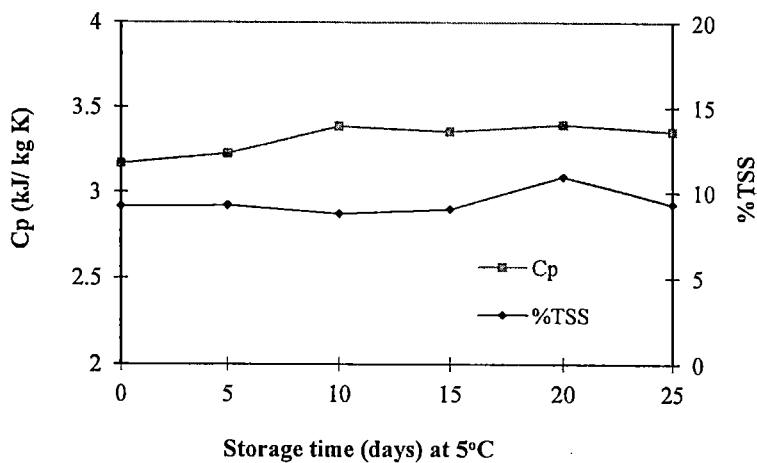
ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อและอัตราการหายใจของผลมะม่วง  
น้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในเนื้อ  
มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส



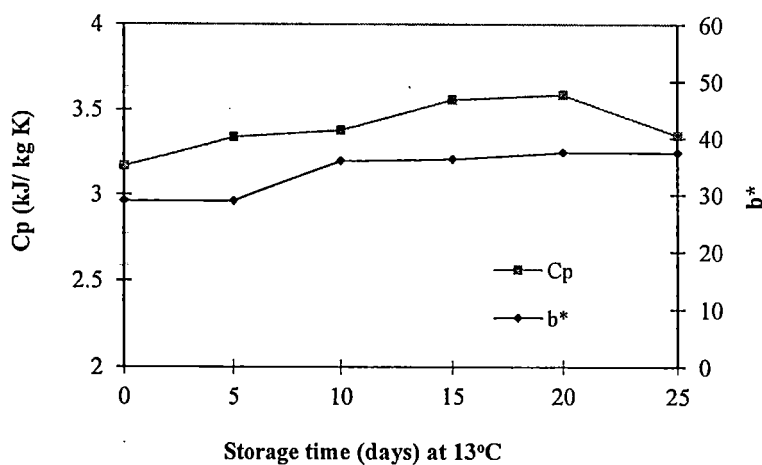
ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ในเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส



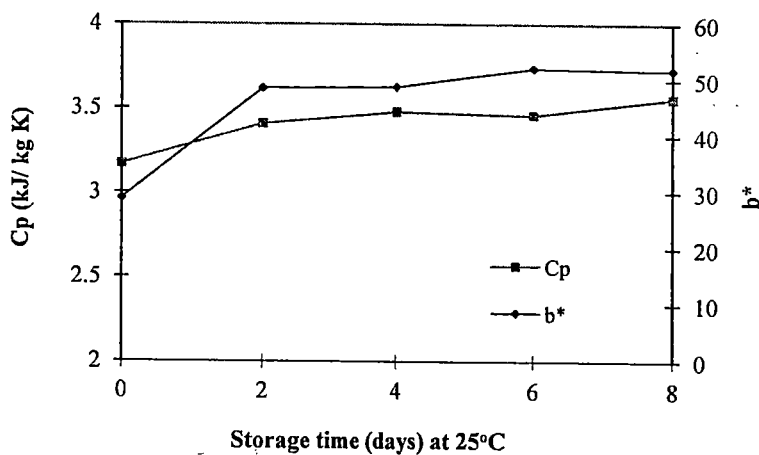
ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและค่าความแน่นเนื้อของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส

สำหรับมะม่วงที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13°C ค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อมะม่วงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา โดยเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 20 จากนั้นจะลดลงในวันที่ 25 ของการเก็บรักษาจากวันแรกที่มีค่าความร้อนจำเพาะที่เนื้อเท่ากับ 3.17 kJ/kg K เพิ่มขึ้นเป็น 3.4 และ 3.36 kJ/kg K ในวันที่ 20 และ 25 ของการ

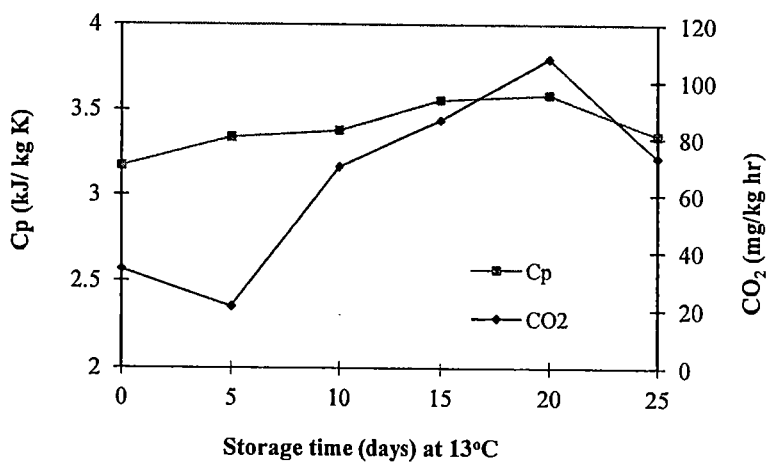
เก็บรักษา ตามลำดับ (ภาพที่ 19) เช่นเดียวกับผลมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 25 องศาเซลเซียสที่พบว่าค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อมะม่วงมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาจากวันแรกที่มีค่าเท่ากับ 3.17 kJ/kg K เพิ่มขึ้นเป็น 3.56 kJ/kg K ในวันที่ 8 (เพิ่มขึ้นเป็น 12.30 เปอร์เซ็นต์)ของการเก็บรักษา (ภาพที่ 19) การเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อมะม่วงที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 และ 25 องศาเซลเซียสเป็นผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีที่เกิดระหว่างกระบวนการสุก เช่น การเปลี่ยนแปลงสีเนื้อที่มีสีเหลืองเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 26 และ 27) การเพิ่มขึ้นของอัตราหายใจ (ภาพที่ 28 และ 29) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (ที่เพิ่มขึ้นจากวันแรกที่มีค่าเท่ากับ 9.17 องศาบริกซ์ เป็น 15.55 องศาบริกซ์ และ 18.15 องศาบริกซ์ ในวันที่ 25 และ 8 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 และ 25 องศาเซลเซียส ,ภาพที่ 30 และ 31) การเพิ่มขึ้นของค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ของเนื้อมะม่วง (ภาพที่ 32 และ 33) หรือการที่มะม่วงมีความแน่นน้อยลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากรูปที่ไม่ละลายน้ำ เป็นพฤติกรรมที่อยู่ในรูปละลายน้ำ (ภาพที่ 34 และ 35) เนื่องจากกระบวนการสุกของผล อย่างไรก็ตามเพื่อพิจารณาร่วมกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในเนื้อมะม่วงระหว่างการเก็บรักษา พบว่า ไม่มีความสัมพันธ์กันระหว่างปริมาณความชื้นและค่าความร้อนจำเพาะในเนื้อมะม่วงที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 และ 25 องศาเซลเซียส จึงกล่าวได้ว่าการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อมะม่วงที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี ระหว่างการสุกของผล



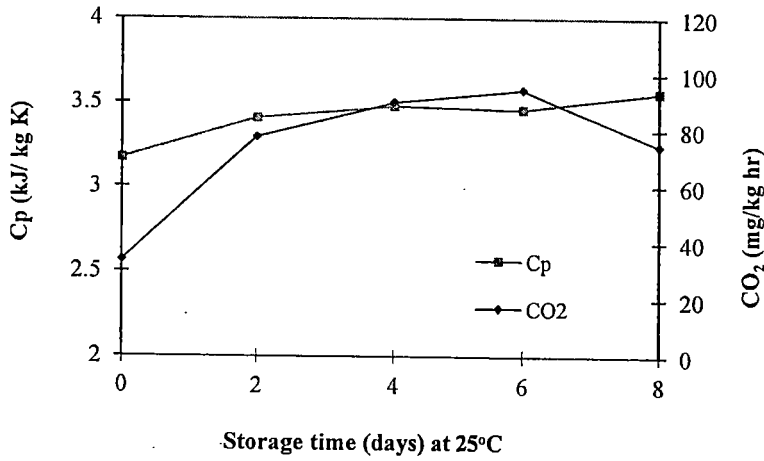
ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและการเปลี่ยนแปลงค่า  $b^*$  ของเนื้อมะม่วง  
น้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส



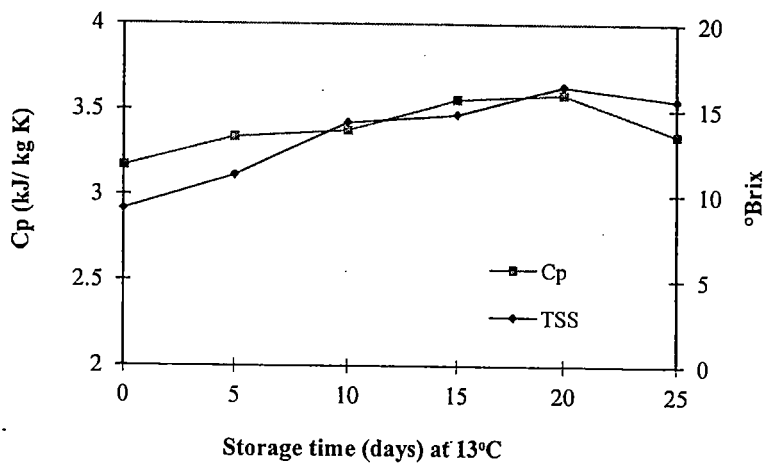
ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและการเปลี่ยนแปลงค่า  $b^*$  ของเนื้อมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



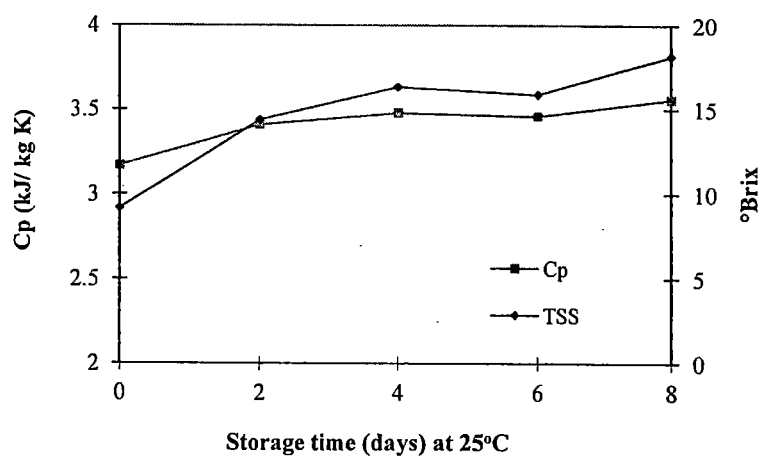
ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อและอัตราการหายใจของผลมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส



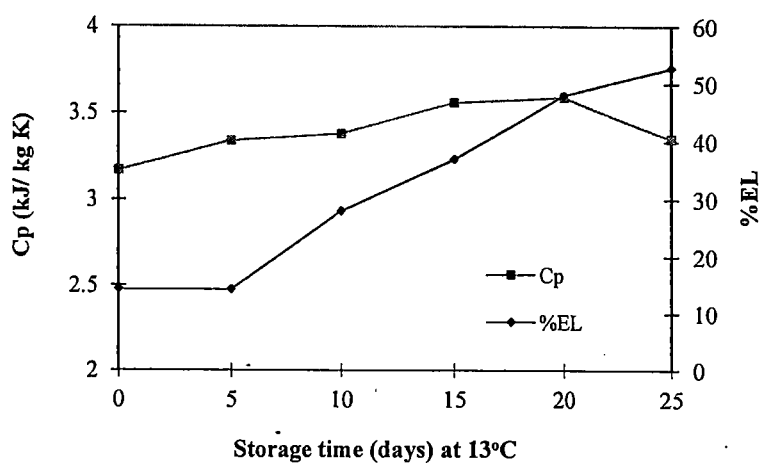
ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อและอัตราการหายใจของผลมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



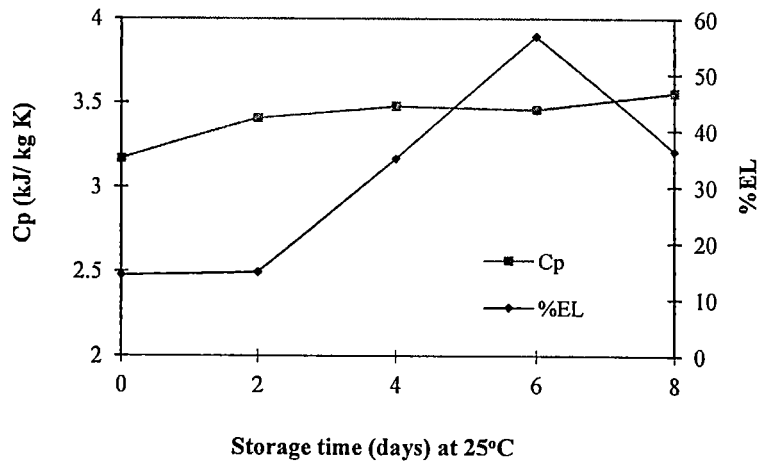
ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (TSS) ในเนื้อ มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส



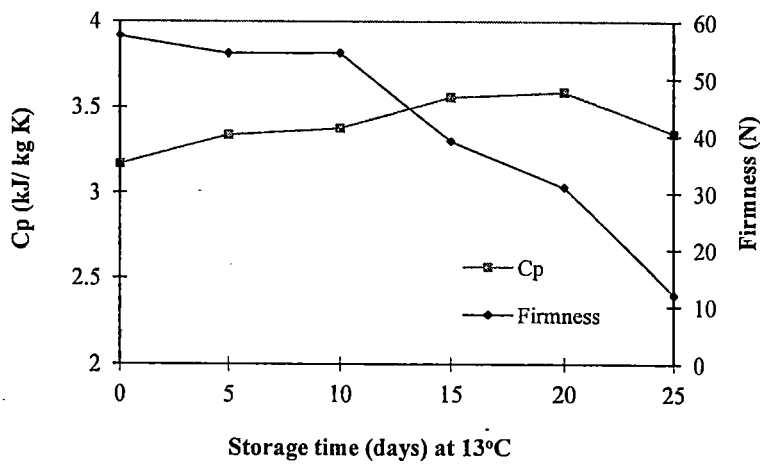
ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (TSS) ในเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



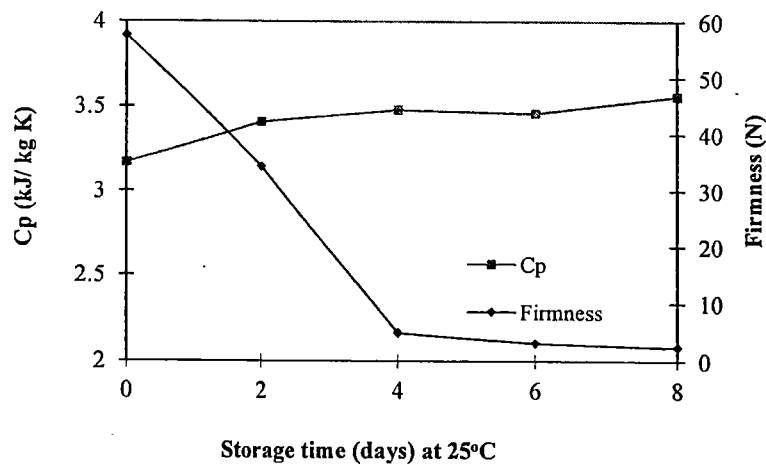
ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ในเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโตรไลต์ในเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและค่าความแน่นเนื้อของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส



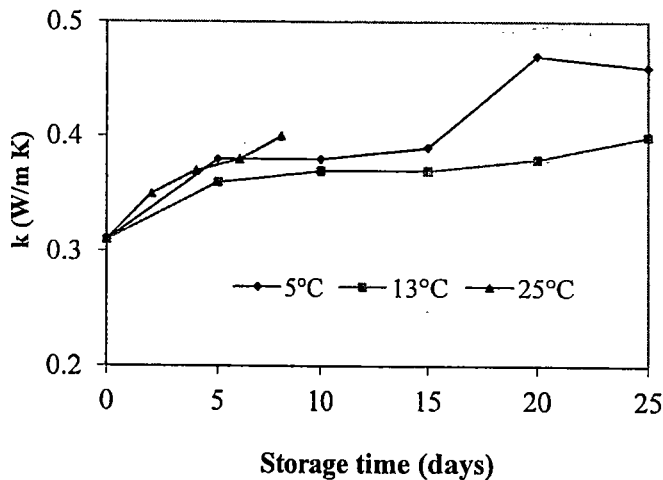
ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะและค่าความแน่นเนื้อของเนื้อมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

#### ค่าการนำความร้อนของเปลือกและเนื้อมะม่วง (Thermal conductivity;*k*)

การวิเคราะห์ค่าการนำความร้อนของมะม่วงตามวิธีของ ASTM (1998) ได้จากการเตรียมตัวอย่าง 2 ขนาด คือแผ่นหนาและแผ่นบางของเปลือกและเนื้อมะม่วง ได้ผลการทดลองดังนี้

จากภาพที่ 36 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อนของเปลือกมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองที่เก็บรักษาในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 5°C พบว่าค่าการนำความร้อนของเปลือกมะม่วงเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.31 W/m K และมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 5 วันแรกของการเก็บรักษาโดยมีค่าเท่ากับ 0.38 W/m K คิดเป็น 22.58 เปอร์เซ็นต์และจะมีค่าคงที่ จนถึงวันที่ 15 ของการเก็บรักษาและจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งในวันที่ 20 ของการเก็บรักษาโดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.47 และลดลงเหลือ 0.46 ในวันที่ 25 ของการเก็บรักษา อย่างไรก็ตามไม่พบว่ามีผลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ของค่าการนำความร้อนของเปลือกมะม่วงในวันที่ 20 และ 25 วัน ของการเก็บรักษา ณ. อุณหภูมินี้ ผลมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 5 องศาเซลเซียส เริ่มแสดงอาการสัท้านหนาวที่เปลือกโดยเริ่มสังเกตเห็นตั้งแต่วันที่ 5 ของการเก็บรักษา (มีคะแนนเท่ากับ 0.11) ซึ่งเป็นช่วงเวลาเดียวกับการเพิ่มขึ้นของค่าการนำความร้อนและค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกมะม่วง และเมื่อสิ้นสุดการเก็บรักษาที่ 25 วัน ค่าการนำความร้อนของเปลือกมีค่าเพิ่มขึ้นจากวันแรกคิดเป็น 48.93 เปอร์เซ็นต์ และคะแนนการเกิดอาการสัท้านหนาวมีค่าเท่ากับ 2.92 (ภาพที่ 37) เช่นเดียวกับแอปเปิ้ลที่ซ้จะมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าผลแอปเปิ้ลปกติประมาณ 9 ถึง 26 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นกับอายุและความรุนแรงของอาการซ้ (Varith, 2001)

### Thermal conductivity of mango peel

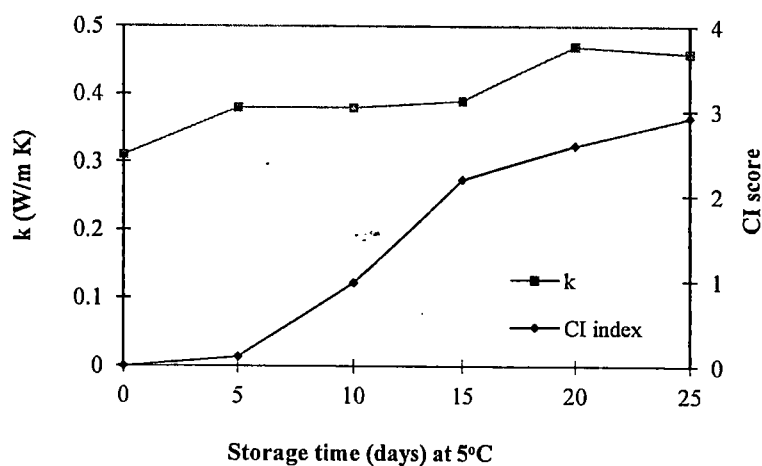


ภาพที่ 36 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อนของเปลือกที่เก็บรักษาในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 5, 13 และ 25°C

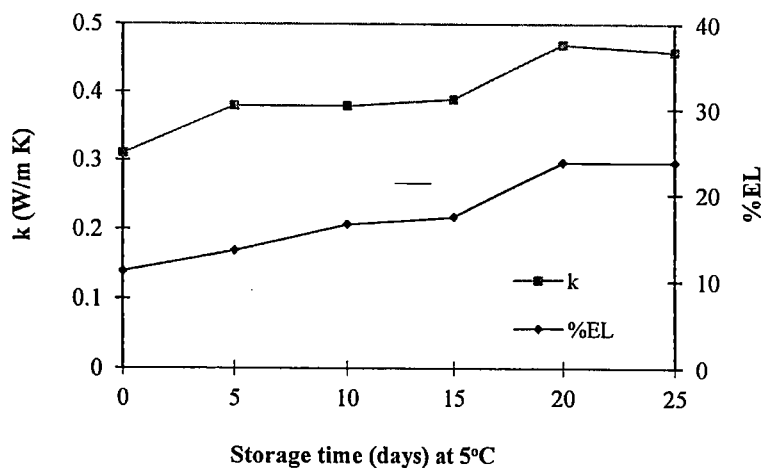
รักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส จะมีค่าความร้อนจำเพาะที่เปลือกเพิ่มขึ้นจากวันแรกของการเก็บรักษาโดยเพิ่มจาก 2.52 kJ/kg.K เป็น 2.97 kJ/kg.K ซึ่งเป็นค่าสูงสุด คิดเป็น 17.86 เปอร์เซ็นต์ การเก็บรักษาผลมะม่วงอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส จะเห็นอาการสะท้านหนาวชัดเจนในวันที่ 10 คือมีคะแนนการเกิดอาการสะท้านหนาว 0.98 (พื้นที่การเกิดอาการสะท้านหนาว < 10 เปอร์เซ็นต์) (ภาพที่ 37) ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าการรั่วไหลของอิเล็กโตรไลต์ (ภาพที่ 38) และค่าความร้อนจำเพาะที่เปลือกมะม่วง (ภาพที่ 7) เป็นผลที่เกิดจากการที่เยื่อหุ้มเซลล์เสื่อมสภาพแล้ว (เหตุการณ์หลัง) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ค่าการนำความร้อนในการบอกการเกิดอาการสะท้านหนาวที่เป็นเหตุการณ์แรกได้ ดังจะเห็นได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับคะแนนการเกิดอาการสะท้านหนาว (ภาพที่ 37) และความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโตรไลต์ (ภาพที่ 38) ของเปลือกมะม่วงที่เก็บรักษาไว้ที่ 5 องศาเซลเซียส ที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษาคือคล้ายคลึงกัน ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าการนำความร้อนเป็นผลจากอาการสะท้านหนาวที่เปลือกเป็นสำคัญ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ เช่น การเปลี่ยนแปลงค่า  $b^*$  ที่แสดงความเป็นสีเหลืองของเปลือกมะม่วง พบว่าระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมินี้ ผลมะม่วงไม่มีการพัฒนาสีเปลือกเป็นสีเหลือง (ภาพที่ 39) อย่างเช่นการเก็บรักษามะม่วงที่อุณหภูมิ 13 และ 25 องศาเซลเซียส หรือไม่มีการ

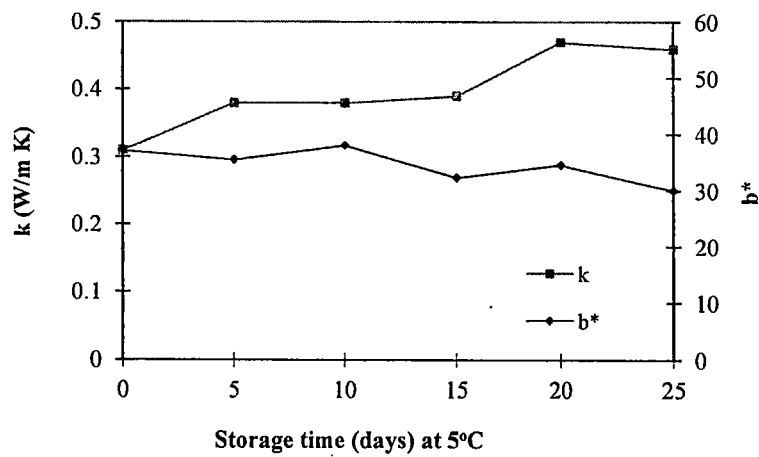
พัฒนาเข้าสู่กระบวนการสุก สอดคล้องกับอัตราการหายใจที่มีค่าต่ำและคงที่ (ภาพที่ 40) จึงกล่าวได้ว่า การที่เปลือกของผลมะม่วงมีค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นเกิดจากการเกิดอาการสะท้านหนาวที่เปลือกนั่นเอง



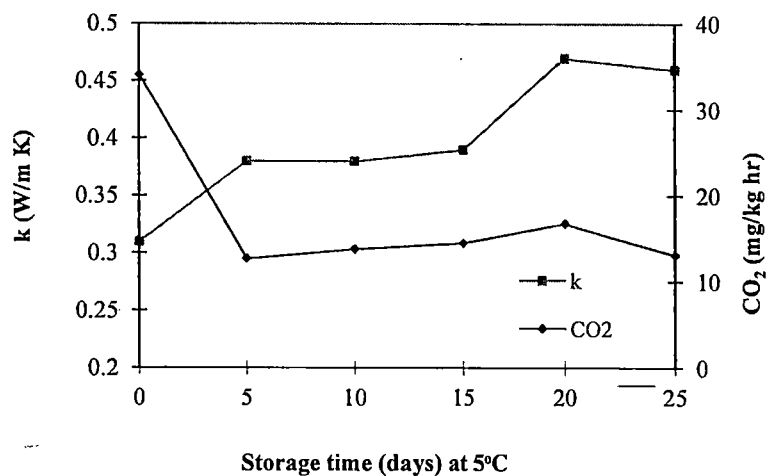
ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อน (k) และ คะแนนการเกิดอาการสะท้านหนาวของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อน (k) และ ค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส

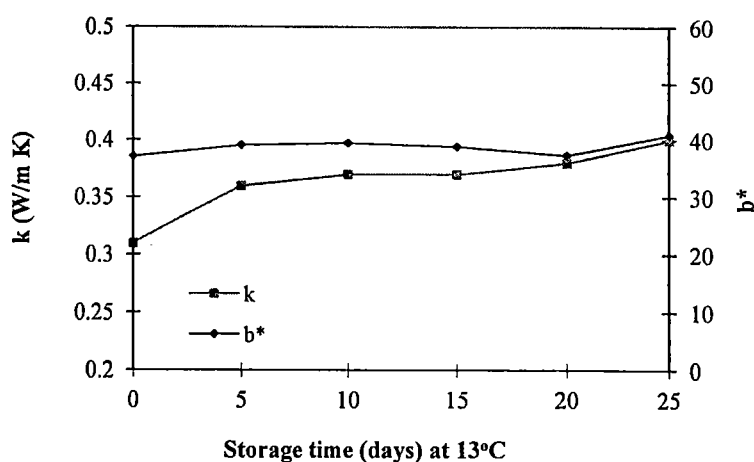


ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อน (k) และ การเปลี่ยนแปลงค่า b\* ของเปลือกมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส

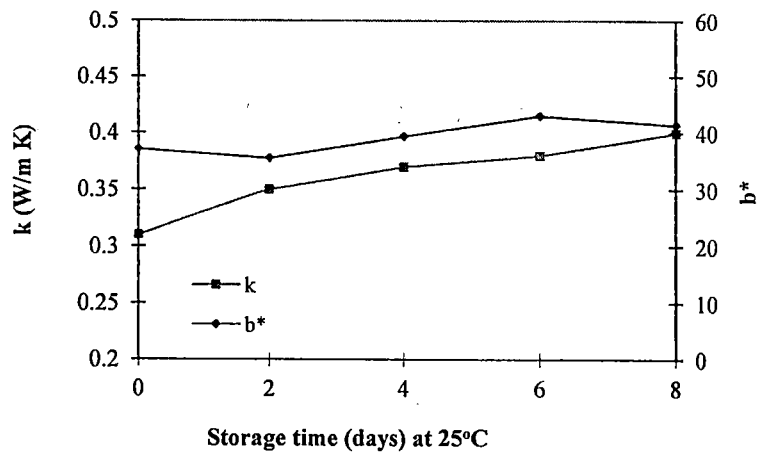


ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อน (k) ของเปลือกและอัตราการหายใจของ มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส

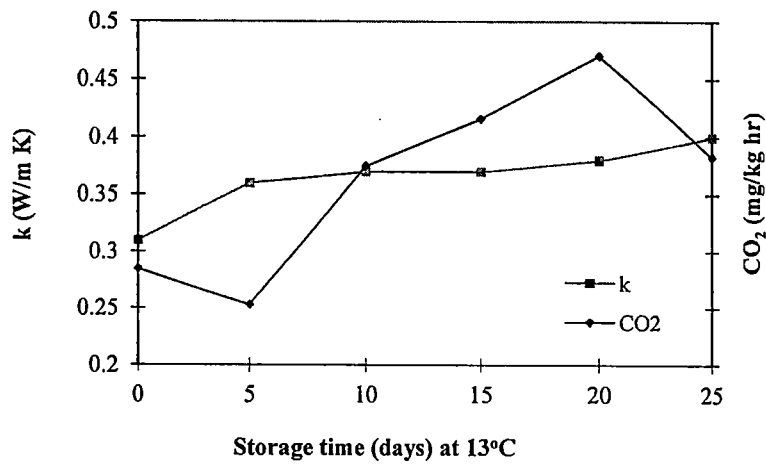
ค่าการนำความร้อนที่เปลือกของมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 13 องศาเซลเซียสจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะคล้ายกับเปลือกมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 5 องศาเซลเซียส แต่จะมีอัตราการเพิ่มต่ำกว่าค่าการนำความร้อนของเปลือกที่เก็บรักษาที่ 5 องศาเซลเซียส ส่วนเปลือกมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 25 องศาเซลเซียส มีค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.31 W/m K ในวันแรกเป็น 0.4 W/m K ในวันที่ 8 ของการเก็บรักษา การเพิ่มขึ้นของค่าการนำความร้อนของเปลือกมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 13 และ 25 องศาเซลเซียส มีความสัมพันธ์กับการพัฒนาเข้าสู่กระบวนการสุก ซึ่งจะพิจารณาได้จากค่าการเปลี่ยนแปลงที่เปลือกมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 13 และ 25 องศาเซลเซียสมีค่า  $b^*$  ซึ่งแสดงความเป็นสีเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้นจากวันแรกของการเก็บรักษาที่มีค่าเท่ากับ 37.13 เพิ่มขึ้นเป็น 40.94 และ 41.47 ในวันที่ 25 และ 8 วัน ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 และ 25 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 41 และ 42) สอดคล้องกับอัตราการหายใจที่มีค่าเพิ่มขึ้นระหว่างการเก็บรักษา (ภาพที่ 43 และ 44) ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าการนำความร้อนของเปลือกมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 13 และ 25 องศาเซลเซียส จึงเป็นผลจากกระบวนการสุกเป็นสำคัญ



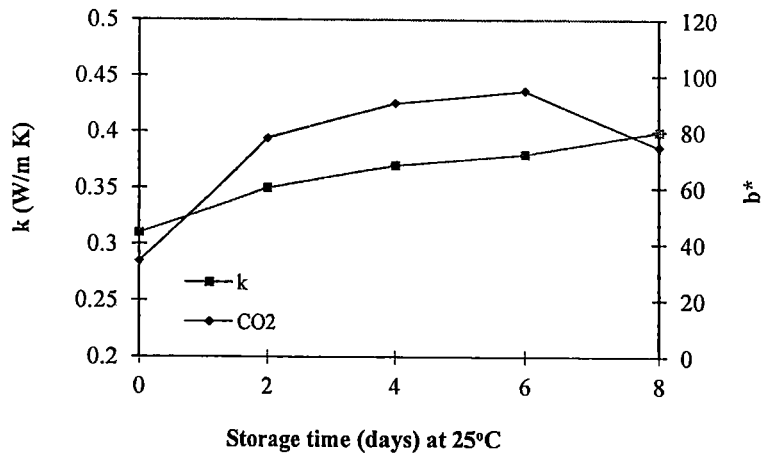
ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและการเปลี่ยนแปลงค่า  $b^*$  ในเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและการเปลี่ยนแปลงค่า  $b^*$  ในเปลือกมะม่วง  
สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

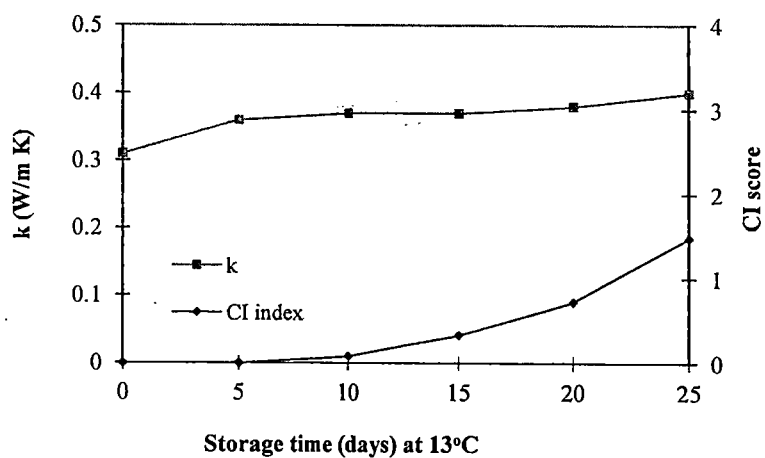


ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนของเปลือกมะม่วงและอัตราการหายใจของผล  
มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส

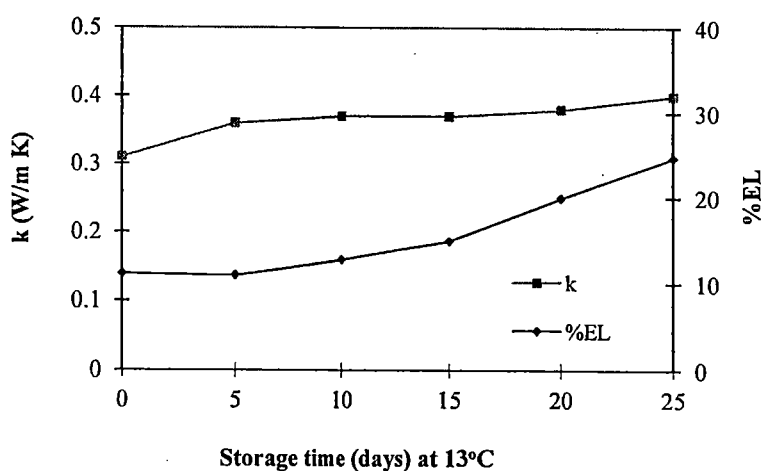


ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนของเปลือกมะม่วงและอัตราการหายใจของผลมะม่วงสีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

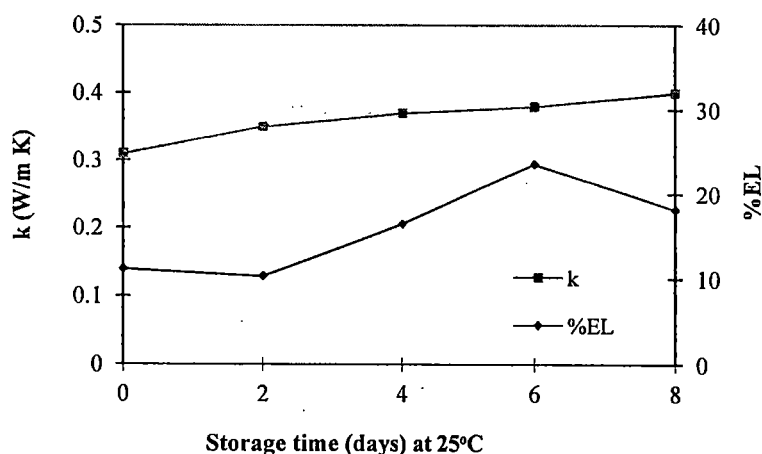
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อนกับคะแนนการเกิดอาการ สะท้อนหนาวของมะม่วงที่เก็บรักษามะม่วงไว้ที่ 13 องศาเซลเซียส ซึ่งพบอาการสะท้อนและสามารถสังเกตอาการได้ชัดเจนในวันที่ 20 ของการเก็บรักษา พบว่ามีความสัมพันธ์เช่นเดียวกับมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 5 องศาเซลเซียส หลังจากเก็บรักษาแล้ว 20 วัน (ภาพที่ 45) ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มะม่วงมีการพัฒนาเข้าสู่กระบวนการสุกแล้ว สอดคล้องกับค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโตรไลต์ที่พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา หรือ ตามระยะการสุกของผล (ภาพที่ 46) ดังจะเห็นได้อย่างชัดเจนจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโตรไลต์ของเปลือกมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 25 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 47)



ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อน (k) และ คะแนนการเกิดอาการสะท้อนหนาวของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อน (k) และ ค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโตรไลต์ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส



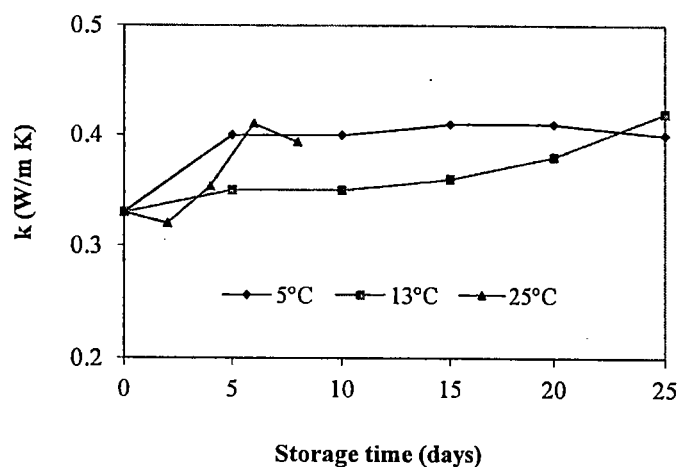
ภาพที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อน (k) และ ค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโตรไลต์ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

การเพิ่มขึ้นของค่าการนำความร้อนของเปลือกมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 13 และ 25 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นช้า ๆ แตกต่างจากการเพิ่มขึ้นของค่าการนำความร้อนของเปลือกมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 5 องศาเซลเซียสที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเก็บรักษานานกว่า 15 วัน และมีค่าสูงกว่าค่าการนำความร้อนของเปลือกมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 13 และ 25 องศาเซลเซียส โดยการเพิ่มของค่าการนำความร้อนของเปลือกมะม่วงที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสเป็นผลเนื่องจากอาการสะท้อนหนาวที่เปลือก แตกต่างจากการเพิ่มของค่าการนำความร้อนของเปลือกมะม่วงที่อุณหภูมิ 13 และ 25 องศาเซลเซียส ที่เป็นผลจากการที่เปลือกมีการพัฒนาเข้าสู่กระบวนการสุก

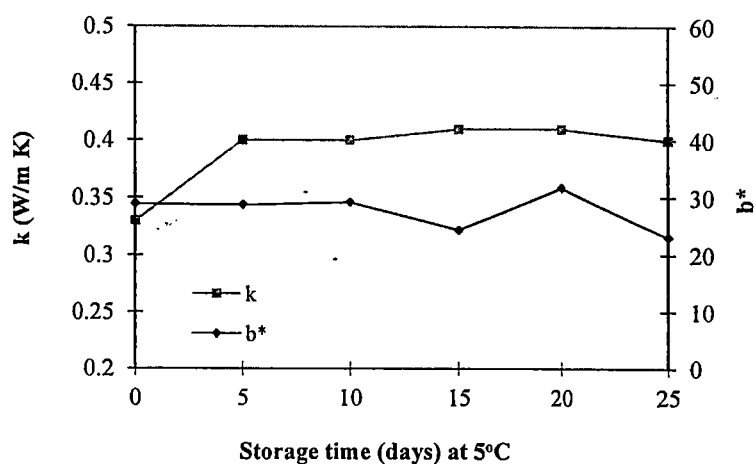
การเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อนของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5, 13 และ 25°C พบว่า ค่าการนำความร้อนของเนื้อมะม่วงที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.33 W/m K และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง 5 วันของการเก็บรักษาโดยมีค่าเท่ากับ 0.40 W/m K หลังจากนั้นค่าการนำความร้อนจะมีค่าคงที่จนถึงที่สุดการเก็บรักษาที่ 25 วัน เมื่อพิจารณาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีอื่นๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงค่า  $b^*$  (ภาพที่ 48), อัตราการหายใจ (ภาพที่ 49), ความแน่นเนื้อ (ภาพที่ 50), ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (ภาพที่ 51) และค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโตรไลต์ (ภาพที่ 52) เป็นต้น พบว่า ผลมะม่วงที่เก็บรักษาที่อุณหภูมินี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีต่าง ๆ น้อยมาก หรือกล่าวได้ว่าผลมะม่วงที่เก็บรักษา ณ อุณหภูมินี้ ไม่มีการพัฒนาเข้าสู่กระบวนการสุก หรือผลยังคงิบอยู่ Srivichien (2006) รายงานว่า ผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่มีอายุการเก็บรักษานาน 15 วันที่ 5 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาบ่มให้สุกที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะมีการสุกที่ผิดปกติ ซึ่งเป็นอาการอย่างหนึ่งของการเกิดอาการ

สะท้อนหนาว จึงกล่าวได้ว่าการที่ผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองค่าการนำความร้อนคงที่ระหว่างการเก็บรักษาเป็นผลจากการที่เกิดอาการสะท้อนหนาวกับเนื้อมะม่วงนั่นเอง

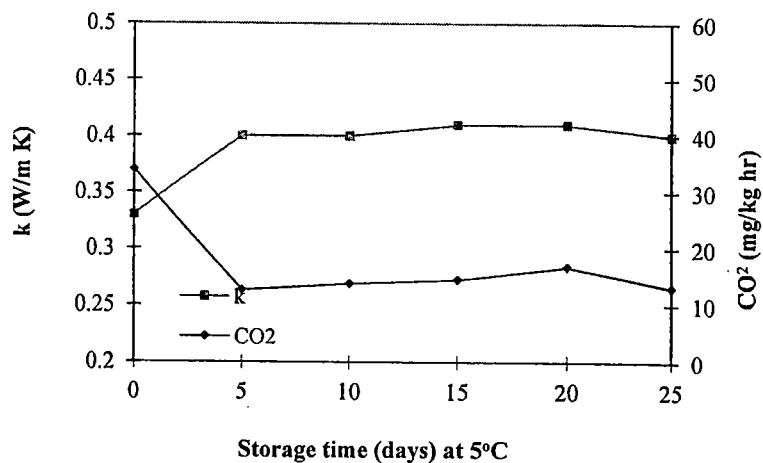
Thermal conductivity of mango flesh



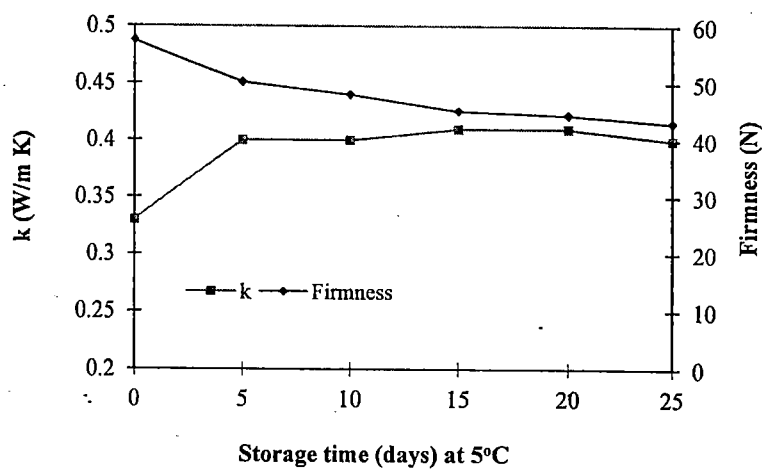
ภาพที่ 48 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อนของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่เก็บรักษาในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 5, 13 และ 25°C



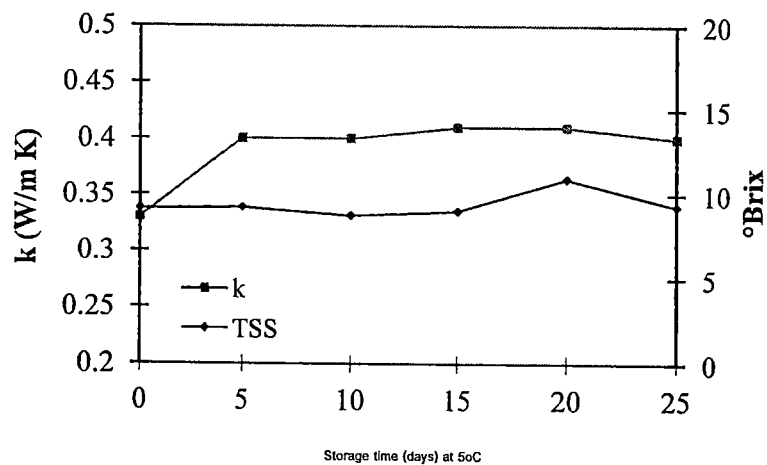
ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและการเปลี่ยนแปลงค่า  $b^*$  ในเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส



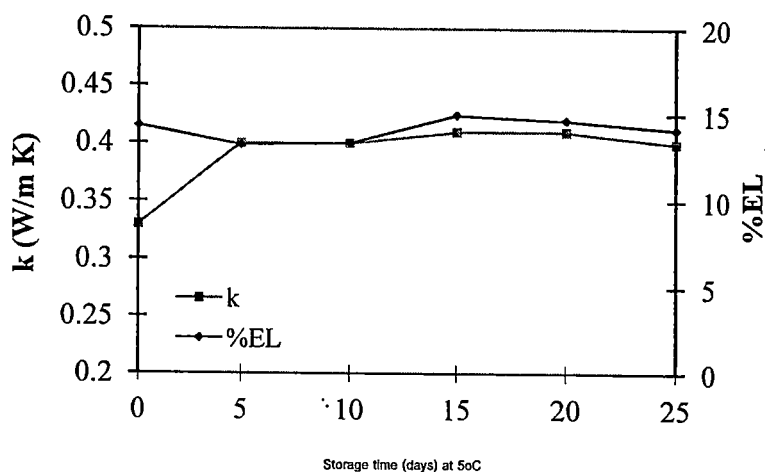
ภาพที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนของเนื้อและอัตราการหายใจของผลมะม่วง  
น้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและค่าความแน่นเนื้อของผลมะม่วง  
น้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส

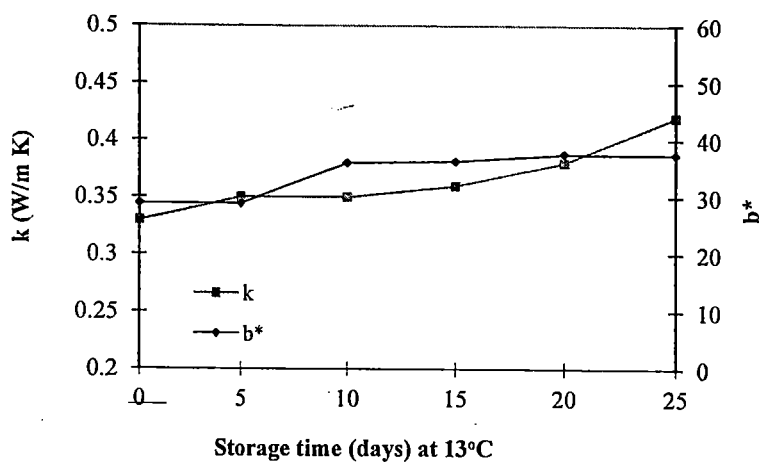


ภาพที่ 52 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและปริมาณของแข็งมีละลายน้ำได้ในเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส



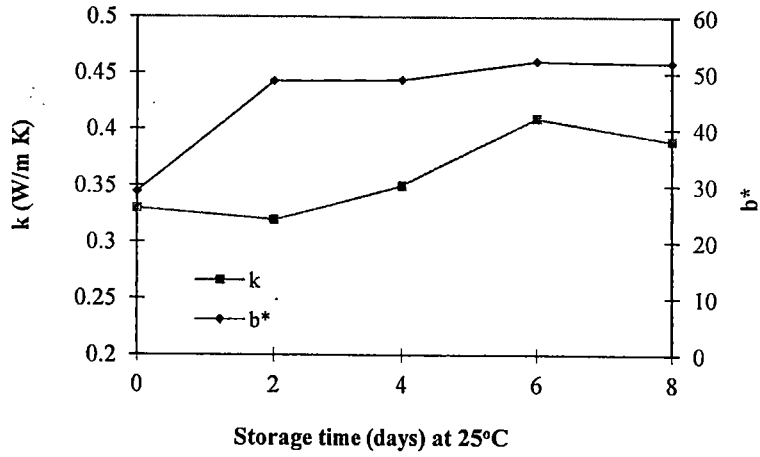
ภาพที่ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ในเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส

เนื้อมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 13 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อนเช่นเดียวกับค่าการนำความร้อนของเนื้อมะม่วงที่ 5 องศาเซลเซียส กล่าวคือในช่วง 5 ถึง 15 วันของการเก็บรักษา ค่าการนำความร้อนของเนื้อมะม่วงจะมีค่าคงที่คือมีค่าเท่ากับ  $0.36 \text{ W/m K}$  หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา โดยมีค่าเท่ากับ  $0.42 \text{ W/m K}$  ในวันที่ 25 ของการเก็บรักษา (ภาพที่ 48) สำหรับผลมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 25 องศาเซลเซียส พบว่าค่าการนำความร้อนของเนื้อมะม่วงมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาโดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากวันเริ่มต้นที่มีค่าเท่ากับ  $0.33 \text{ W/m K}$  เพิ่มขึ้นเป็น  $0.39 \text{ W/m K}$  ในวันที่ 8 ของการเก็บรักษา การเพิ่มขึ้นของค่าการนำความร้อนของเนื้อมะม่วงเป็นผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีระหว่างการสุกของผล เช่น การเปลี่ยนแปลงค่า  $b^*$  (ภาพที่ 54 และ 55), อัตราการหายใจ (ภาพที่ 56 และ 57), ค่าความแน่นเนื้อ (ภาพที่ 58 และ 59), ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (ภาพที่ 60 และ 61) หรือค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ (ภาพที่ 62 และ 63) เป็นต้น

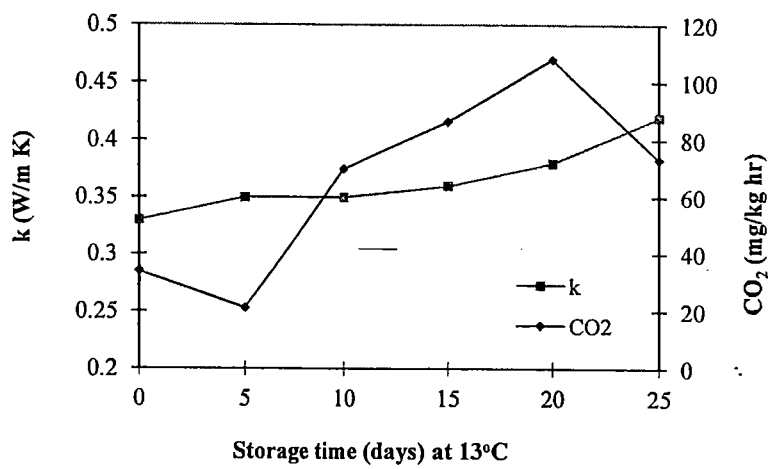


ภาพที่ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและการเปลี่ยนแปลงค่า  $b^*$  ของเนื้อมะม่วง

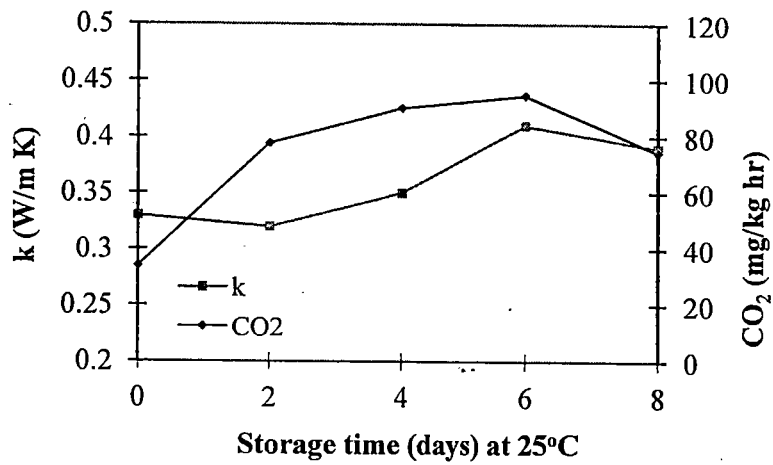
น้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส



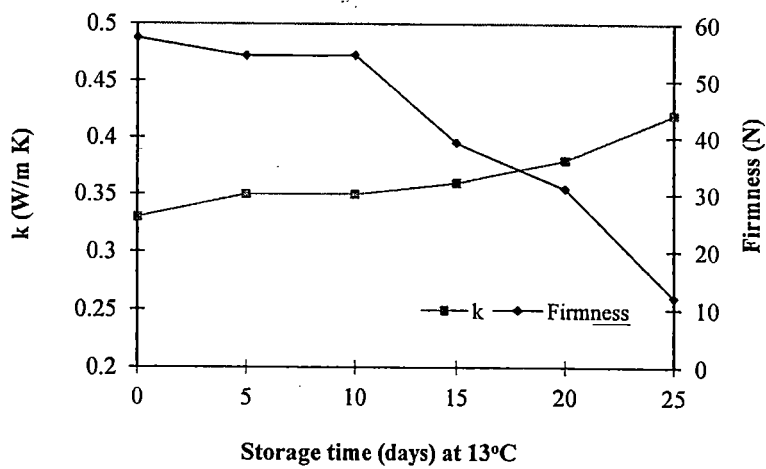
ภาพที่ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและการเปลี่ยนแปลงค่า  $b^*$  ของเนื้อมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



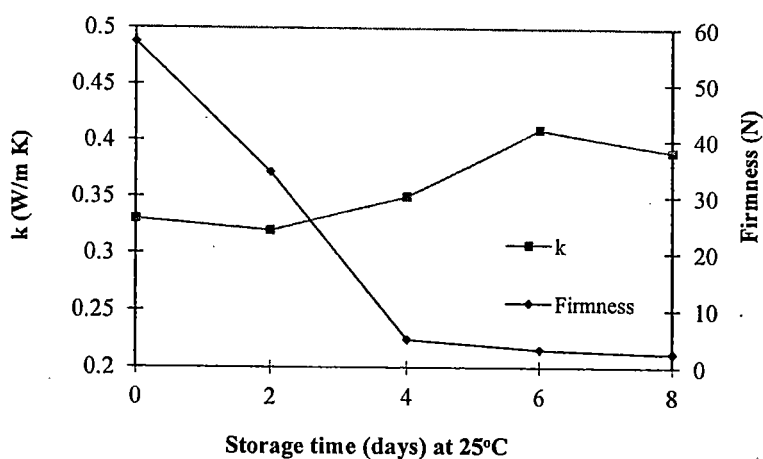
ภาพที่ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนของเนื้อและอัตราการหายใจของผล มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส



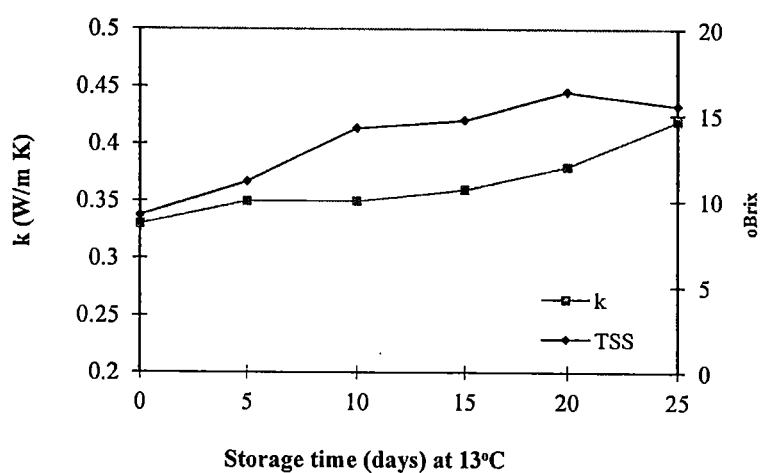
ภาพที่ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนของเนื้อและอัตราการหายใจของผล  
มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



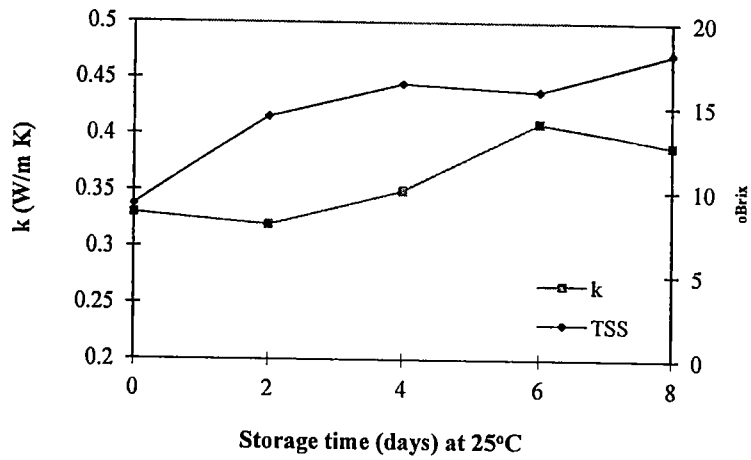
ภาพที่ 58 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและค่าความแน่นเนื้อปริมาณของเนื้อ  
มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส



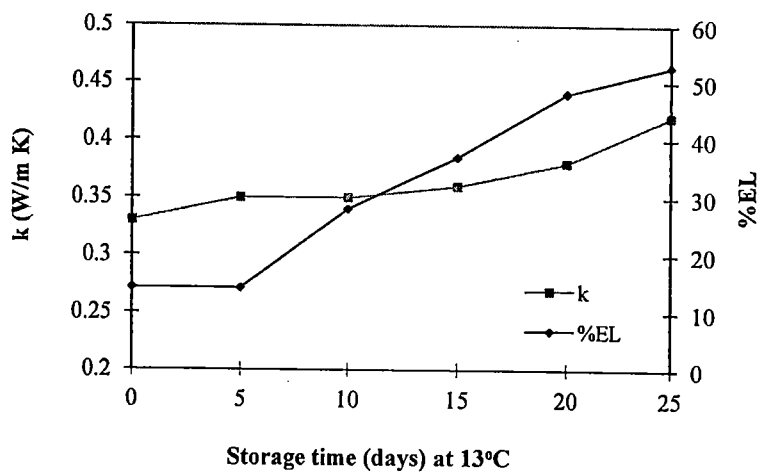
ภาพที่ 59 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและค่าความแน่นเนื้อปริมาณของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



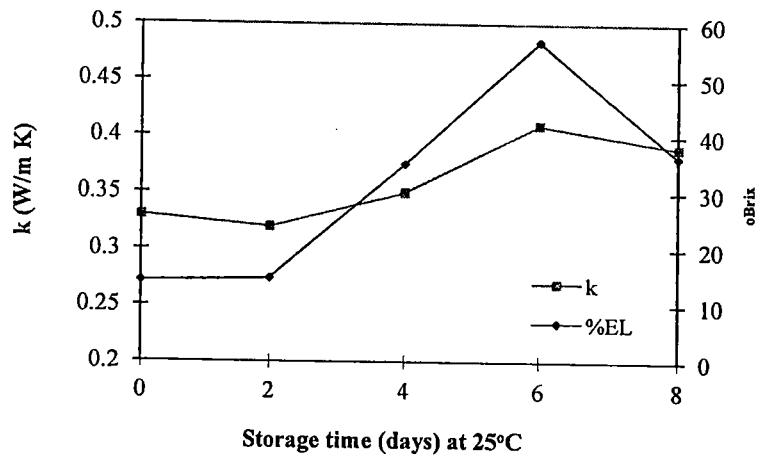
ภาพที่ 60 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (TSS) ในเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 61 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (TSS) ในเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 62 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ในเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 63 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและค่าการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ในเนื้อ  
มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

1. ค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกมะม่วงจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาและการสุก โดยมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 25 องศาเซลเซียสจะมีการเพิ่มของค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกเร็วกว่ามะม่วงที่เก็บรักษาที่ 13 องศาเซลเซียส ส่วนเปลือกมะม่วงที่เกิดอาการสะท้านหนาวจะมีค่าความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการเกิด แต่หลังจากนั้นค่าความร้อนจำเพาะจะลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้น
2. การเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อมะม่วงที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี ระหว่างการสุกของผล
3. การเพิ่มขึ้นของค่าการนำความร้อนของเปลือกและเนื้อมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 13 และ 25 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นช้า ๆ แตกต่างจากการเพิ่มขึ้นของค่าการนำความร้อนของเปลือกและเนื้อมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 5 องศาเซลเซียสที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเก็บรักษานานกว่า 15 วัน และมีค่าสูงกว่าค่าการนำความร้อนของเปลือกและเนื้อมะม่วงที่เก็บรักษาที่ 13 และ 25 องศาเซลเซียส โดยการเพิ่มของค่าการนำความร้อนของเปลือกและเนื้อมะม่วงที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสเป็นผลเนื่องจากอาการสะท้านหนาวแตกต่างจากการเพิ่มของค่าการนำความร้อนของเปลือกและเนื้อมะม่วงที่อุณหภูมิ 13 และ 25 องศาเซลเซียส ที่เป็นผลจากการพัฒนาเข้าสู่กระบวนการสุกของผลมะม่วง
4. จากผลการศึกษาจึงเป็นไปได้ที่จะใช้สมบัติทางความร้อนในการทำนายการเกิดอาการสะท้านหนาวในผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

## เอกสารอ้างอิง

- จริงแท้ สิริพานิช. 2544. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- อนันต์ จิตรธรรม, ศิริชัย กัลยาณรัตน์ และ เฉลิมชัย วงษ์อารี. 2545. ผลของ Heat Treatment และ  $\text{CaCl}_2$  ต่อการเกิด Chilling injury ของผลละมุดพันธุ์มะกอก (*Archras sapota* Linn.). การประชุมสัมมนาวิชาการวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว/หลังการผลิตแห่งชาติ ครั้งที่ 1/ 22-23 สิงหาคม 2545 โรงแรมอิมพีเรียลแม่ปิ้ง เชียงใหม่ หน้า 46
- Aggarwal, P. 2000. Phase transition of apple cuticle: A DSC study. *Thermochemica Acta.* 367-368: 9-13.
- Kader, A. A. 1992. Postharvest Biology and Technology: An Overview. pp. 15-28. *In*: A. A. Kader, (ed.), *Postharvest Technology of Horticultural Crops.* University of California, California.
- Lay-Yee, M. 1994. Responses of Fruit to High Temperature Disinfestation. *In*: Annual International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reduction. November 13-16, 1994, pp66-1.
- Lurie, S. 1998. Postharvest heat treatments *Postharvest Biology and Technology.* 14: 257-269.
- Marisela, R. D. and E. M. Yahia. 1995. Use of a Differential Calorimeter for Characterizing the Respiration of Fruits in Low Oxygen Atmosphere. *In* *Proceeding of the International Conference Harvest and Postharvest Technologies for Fresh Fruits and Vegetables* 20-24 February 1995. Guanajuato, Mexico. 554-561.
- Mitra, S. K. and E. A. Baldwin. 1997. Mango. pp. 12-20. *In* : S. Mitra, (Ed.), *Postharvest Physiology and Storage of Tropical and Subtropical Fruits.* CAB International, Wallingford, Florida.
- Nair, R., Singh, Z. and Ta, S. C. 1994. Heat Treatments Affect Development Chilling Injury, Respiration, Ethylene Production and Fruit Quality of Mango. *Acta Horticulture* 553: IV International Conference on Postharvest Science. p.127. [Available online]  
[www.actahort.org/book/553/553\\_127.htm](http://www.actahort.org/book/553/553_127.htm)

- Ortega-Zaleta, D. and Yahia, E.M. 2000. Tolerance and quality of mango fruit exposed to controlled atmospheres at high temperatures. *Postharvest Biology and Technology*. 20:195-201.
- Raison, J. K. and G. R. Orr. 1986. Phase transitions in the thylakoid polar lipid of chilling-sensitive plants: a comparison of detection methods. *Plant Physiol.* 80: 638-645.
- Suwapanich, R. and Haewsungcharern, M. 2005. Effect of temperature on thermal properties of mango cv. Nam Dok Mai Si Thong. *Tropentag 2005: Conference on International Agricultural Research for Development*. Stuttgart-Hohenheim, October 11-13, 2005.
- Whangchai, K., Saengnil, K. and Uthaibutra, J. 2002. Effect of Vapor Heat Treatment on Chilling Injury and Polyamine Content of 'Nam Dok Mai' Mango Fruit. *Chiang Mai J. Sci.* 29(2): 81-88.