

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

#### 4.1 ศึกษาวิธีการคัดเลือกผลมะม่วงตัวอย่าง

แบ่งมะม่วงออกเป็น 5 กลุ่ม ตามความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) คือ กลุ่มความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 1.001, 1.001-1.010, 1.011-1.020, 1.021-1.030, 1.031-1.040 และ 1.041-1.050 ตามลำดับ ทำการแบ่งผลมะม่วงในแต่ละกลุ่มเป็น 2 ชุด ตามการทดลอง แล้วนำมาวิเคราะห์ ดังนี้

##### 4.1.1 การวิเคราะห์คุณภาพผลมะม่วง ณ วันเริ่มต้น ที่ความถ่วงจำเพาะแตกต่างกัน

###### 1. ความแน่นเนื้อ (Firmness)

ความแน่นเนื้อของผลมะม่วงที่ความถ่วงจำเพาะต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 25.00-26.50 kg/cm<sup>2</sup> ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) ของความถ่วงจำเพาะกับความแน่นเนื้อเป็น -0.5986 ดังตาราง 4.1 และ 4.2

###### 2. ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total Soluble Solid; TSS)

ปริมาณ TSS ของมะม่วงที่ความถ่วงจำเพาะต่าง ๆ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 7.3-7.8°Brix ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความถ่วงจำเพาะกับ TSS เป็น 0.2263 ดังตาราง 4.1 และ 4.2

###### 3. ค่าความเป็นกรดค่า (ค่าพีเอช; pH)

มะม่วงที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 1.031 มีค่า pH ไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.95-3.28 เมื่อความถ่วงจำเพาะมีค่ามากขึ้น ค่า pH มีแนวโน้มสูงขึ้นโดยมีค่ามากที่สุดที่ความถ่วงจำเพาะ 1.041-1.050 ค่า pH เป็น 3.68 โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความถ่วงจำเพาะกับค่า pH เป็น 0.8703 ดังตาราง 4.1 และ 4.2

#### 4. ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไตเตรตได้ (Titratable Acidity; TA)

ในมะม่วงกลุ่มที่มีความถ่วงจำเพาะ 1.031-1.050 ปริมาณ TA มีค่าระหว่าง 0.64-0.73% และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความถ่วงจำเพาะลดลง โดยมีค่าแตกต่างจากมะม่วงในกลุ่มที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 1.031 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ปริมาณ TA มีค่าสูงสุดในกลุ่มที่มีความถ่วงจำเพาะ 1.001-1.010 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความถ่วงจำเพาะกับปริมาณ TA เป็น -0.8273 ดังตาราง 4.1 และ 4.2

#### 5. อัตราส่วนระหว่างปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อปริมาณกรดทั้งหมดที่ไตเตรตได้ (TSS : TA)

ค่า TSS : TA ในช่วงความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 1.031 มีค่าอยู่ระหว่าง 5.0-7.4 ในช่วงความถ่วงจำเพาะ 1.031-1.050 พบว่าค่า TSS : TA มีค่าเพิ่มขึ้นและแตกต่างจากกลุ่มที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 1.031 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ค่า TSS : TA สูงสุดในมะม่วงที่มีความถ่วงจำเพาะ 1.041-1.050 โดยมีค่าเท่ากับ 12.0 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความถ่วงจำเพาะกับค่า TSS : TA เป็น 0.8863 ดังตาราง 4.1 และ 4.2

ตาราง 4.1 ความถ่วงจำเพาะกับคุณภาพของผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ ณ วันเริ่มต้น

คุณภาพ	ความถ่วงจำเพาะ						LSD	%CV
	≤1.000	≤1.010	≤1.020	≤1.030	≤1.040	≤1.050		
ความแน่นเนื้อ (kg/cm <sup>2</sup> )	26.50	26.50	25.70	25.93	25.00	25.00	ns	6.50
TSS (°Brix)	7.3	7.6	7.8	7.8	7.4	7.7	ns	6.72
pH	3.04 <sup>c</sup>	2.95 <sup>c</sup>	3.10 <sup>c</sup>	3.28 <sup>bc</sup>	3.49 <sup>ab</sup>	3.68 <sup>a</sup>	0.36	3.93
TA (%)	1.26 <sup>b</sup>	1.54 <sup>a</sup>	1.27 <sup>b</sup>	1.06 <sup>b</sup>	0.73 <sup>c</sup>	0.64 <sup>c</sup>	0.27	7.74
TSS : TA	5.8 <sup>cd</sup>	5.0 <sup>d</sup>	6.1 <sup>cd</sup>	7.4 <sup>c</sup>	10.2 <sup>b</sup>	12.0 <sup>a</sup>	1.7	8.64

หมายเหตุ: อักษรที่ตามหลังค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่เหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ ค่าเฉลี่ยโดยวิธี LSD (Least Significant Difference) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ค่าเฉลี่ยมาจาก 3 ซ้ำ)

ตาราง 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความถ่วงจำเพาะกับคุณภาพของผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ ณ วันเริ่มต้น

คุณภาพ	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
ความถ่วงจำเพาะ	1.0000
ความแน่นเนื้อ	-0.5986
TSS	0.2263
pH	0.8703**
TA	-0.8273**
TSS : TA	0.8863**

หมายเหตุ : \*\* ระดับนัยสำคัญ 0.01

#### 4.1.2 การวิเคราะห์คุณภาพผลมะม่วงสุกที่ความถ่วงจำเพาะแตกต่างกัน

1. ระยะเวลาที่ใช้ในการสุก ลักษณะของผลสุก และเปอร์เซ็นต์สีเหลืองที่ผิวผลสุก

ระยะเวลาที่ใช้ในการสุก ลักษณะของผลสุก และเปอร์เซ็นต์สีเหลืองที่ผิวผลสุกที่ความถ่วงจำเพาะแตกต่างกัน แสดงดังตาราง 4.3 และ 4.4 มะม่วงที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 1.001 เมื่อนำมาบ่มที่อุณหภูมิ  $29.0 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$  สามารถสุกได้ แต่ผลสุกจะมีลักษณะเขียวอ่อน สีผิวและเนื้อภายในจะสุกไม่สม่ำเสมอ มีสีเขียวอมเหลือง ใช้ระยะเวลาในการสุก 15 วัน มะม่วงในกลุ่มที่มีความถ่วงจำเพาะสูงขึ้นจะมีความสม่ำเสมอของสีผิวและเนื้อผลสุกมากขึ้น ผิวเหี่ยวน้อยลง ที่ความถ่วงจำเพาะ 1.021-1.050 ผลสุกสม่ำเสมอ ผิวเหี่ยวน้อย มีกลิ่นหอมและเนื้อนุ่ม ใช้เวลาในการสุก 8-11 วัน แต่ที่ความถ่วงจำเพาะ 1.041-1.050 ในผลสุกจะเริ่มปรากฏอาการของโรคแอนแทรกคโนส โดยเห็นเป็นจุดสีน้ำตาลดำที่บริเวณผิวผล ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความถ่วงจำเพาะกับระยะเวลาในการสุกเป็น -0.7131 ดังตาราง 4.5

ตาราง 4.3 ระยะเวลาที่ใช้ในการสุก ลักษณะของผลสุก และเปอร์เซ็นต์สีเหลืองที่ผิวผลสุกของมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์

ความถ่วงจำเพาะ	ระยะเวลาในการสุก (วัน)	สีเหลืองที่ผิวผลสุก (%)	ลักษณะของผลสุก
≤ 1.000	15	50	ผลสุกไม่สม่ำเสมอ สีเขียวอมเหลือง ผิวหยาบมาก เนื้อแข็ง
1.001-1.010	18	75	ผลสุกสม่ำเสมอขึ้น มีสีเหลืองบริเวณขั้วผลมากขึ้น ผิวหยาบ
1.011-1.020	15	80	ผลสุกค่อนข้างสม่ำเสมอ ผิวหยาบน้อยลง
1.021-1.030	11	100	ผลสุกสม่ำเสมอ ผิวหยาบน้อย มีกลิ่นหอม เนื้อนุ่ม
1.031-1.040	10	100	ผลสุกสม่ำเสมอ ผิวหยาบน้อย มีกลิ่นหอม เนื้อนุ่ม
1.041-1.050	8	100	ผลสุกสม่ำเสมอ มีกลิ่นหอม เนื้อนุ่มมาก มีจุดสีน้ำตาลดำที่บริเวณผิวผล

ตาราง 4.4 ความถ่วงจำเพาะกับคุณภาพของผลมะม่วงสุก

คุณภาพ	ความถ่วงจำเพาะ						LSD	%CV
	≤1.000	≤1.010	≤1.020	≤1.030	≤1.040	≤1.050		
เวลาในการสุก (วัน)	15 <sup>ab</sup>	18 <sup>a</sup>	15 <sup>ab</sup>	11 <sup>bc</sup>	10 <sup>bc</sup>	8 <sup>c</sup>	5	23.54
ความแน่นเนื้อ (kg/cm <sup>2</sup> )	10.44 <sup>a</sup>	6.70 <sup>b</sup>	11.62 <sup>a</sup>	3.29 <sup>c</sup>	3.29 <sup>c</sup>	2.31 <sup>c</sup>	3.27	31.14
TSS (°Brix)	11.3 <sup>b</sup>	12.6 <sup>b</sup>	12.2 <sup>b</sup>	18.1 <sup>a</sup>	17.0 <sup>a</sup>	18.4 <sup>a</sup>	2.4	9.09
pH	3.12 <sup>c</sup>	3.68 <sup>b</sup>	4.00 <sup>b</sup>	4.62 <sup>a</sup>	4.65 <sup>a</sup>	4.52 <sup>a</sup>	4.61	6.45
TA (%)	1.23 <sup>a</sup>	0.48 <sup>b</sup>	0.37 <sup>bc</sup>	0.19 <sup>c</sup>	0.18 <sup>c</sup>	0.19 <sup>c</sup>	0.22	29.33
TSS : TA	8.9 <sup>c</sup>	26.5 <sup>bc</sup>	35.0 <sup>b</sup>	98.3 <sup>a</sup>	103.0 <sup>a</sup>	97.9 <sup>a</sup>	25.1	22.80

หมายเหตุ: อักษรที่ตามหลังค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่เหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ ค่าเฉลี่ยโดยวิธี LSD (Least Significant Difference) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ค่าเฉลี่ยมาจาก 3 ซ้ำ)

ตาราง 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความถ่วงจำเพาะกับคุณภาพของผลมะม่วงสุก

คุณภาพ	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
ความถ่วงจำเพาะ	1.0000
ระยะเวลาในการสุก	-0.7131**
ความแน่นเนื้อ	-0.7142**
TSS	0.8411**
pH	0.8533**
TA	-0.7999**
TSS : TA	0.8864**

หมายเหตุ : \*\* ระดับนัยสำคัญ 0.01

## 2. ความแน่นเนื้อ

ผลมะม่วงที่ความถ่วงจำเพาะ 1.021-1.050 ผลสุกมีความแน่นเนื้ออยู่ระหว่าง 2.31-3.29 kg/cm<sup>2</sup> ซึ่งมีค่าแตกต่างจากมะม่วงสุกในกลุ่มความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความแน่นเนื้อมีค่ามากสุดในกลุ่มความถ่วงจำเพาะ 1.011-1.020 และกลุ่มที่ต่ำกว่า 1.001 โดยมีความแน่นเนื้ออยู่ระหว่าง 10.44-11.62 kg/cm<sup>2</sup> ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความถ่วงจำเพาะกับความแน่นเนื้อเป็น -0.7142 ดังตาราง 4.4 และ 4.5

## 3. ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด

ปริมาณ TSS ของมะม่วงที่ความถ่วงจำเพาะต่าง ๆ แบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ คือ กลุ่มความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 1.021 และกลุ่มความถ่วงจำเพาะ 1.021-1.050 โดยในกลุ่มที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 1.021 จะมี TSS ประมาณ 11.3-12.6°Brix ขณะที่ในกลุ่มความถ่วงจำเพาะ 1.021-1.050 จะมีปริมาณ TSS สูงกว่า มีค่าเป็น 17.0-18.4°Brix ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความถ่วงจำเพาะกับ TSS เป็น 0.8411 ดังตาราง 4.4 และ 4.5

## 4. ค่าความเป็นกรดต่าง

มะม่วงที่ความถ่วงจำเพาะ 1.021-1.050 ในผลสุกมีค่า pH มากที่สุด โดยมีค่า 4.52-4.65 และแตกต่างจากมะม่วงในกลุ่มความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในกลุ่มความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 1.001 มีค่า pH เป็น 3.12 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความถ่วงจำเพาะกับค่า pH เป็น 0.8533 ดังตาราง 4.4 และ 4.5

### 5. ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไตเตรตได้

ในมะม่วงกลุ่มที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 1.001 นั้นมีปริมาณ TA 1.23% และมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น ปริมาณ TA มีค่าต่ำสุดในกลุ่มที่มีความถ่วงจำเพาะ 1.021-1.050 โดยมีค่าเป็น 0.18-0.19% ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความถ่วงจำเพาะกับปริมาณ TA เป็น -0.7999 ดังตาราง 4.4 และ 4.5

### 6. อัตราส่วนระหว่างปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อปริมาณกรดทั้งหมดที่ไตเตรตได้

ค่า TSS : TA ของมะม่วงในกลุ่มที่มีความถ่วงจำเพาะ 1.021-1.050 มีค่าสูงสุด โดยมีค่าเป็น 97.9-103.0 และแตกต่างจากกลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ค่า TSS : TA มีแนวโน้มลดลงเมื่อความถ่วงจำเพาะลดลง โดยมีค่าน้อยสุดในมะม่วงกลุ่มที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 1.001 มีค่าเป็น 8.9 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความถ่วงจำเพาะกับค่า TSS : TA เป็น 0.8864 ดังตาราง 4.4 และ 4.5

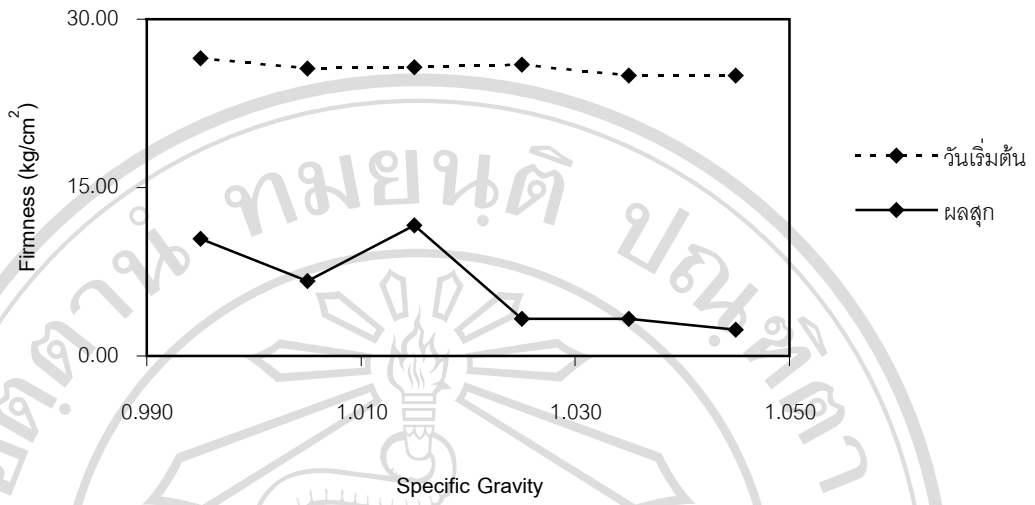
ความถ่วงจำเพาะของมะม่วง โชคอนันต์มีความสัมพันธ์กับคุณภาพในแง่ที่ว่าเมื่อมะม่วงมีความบิบูรณ์มากขึ้นจะมีความถ่วงจำเพาะเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการที่แป้งในผลมีการสะสมมากขึ้นอย่างต่อเนื่องจนผลแก่เต็มที่ ทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับมะม่วงพันธุ์อื่นๆ ได้แก่พันธุ์มหาชนก (สรรพมงคล, 2545) พันธุ์ทองดำ (สายชลและคณะ, 2534) พันธุ์หนังกกลางวัน (อารี, 2530) พันธุ์คาราบาว (दनัยและนิธิยา, 2548) พันธุ์น้ำดอกไม้และพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง (เสาวภา, 2545) ส่งผลให้ความถ่วงจำเพาะมีความเกี่ยวข้องกับลักษณะทางกายภาพและเคมีของมะม่วง

เมื่อนำมะม่วงแต่ละกลุ่มไปบ่มที่สภาวะเดียวกัน พบว่าผลที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่ามีแนวโน้มที่จะสุกได้เร็วกว่าผลที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำ สอดคล้องกับที่จริงแท้ (2544) กล่าวว่าการบ่มมะม่วงที่สภาวะเดียวกัน ผลที่บิบูรณ์กว่าจะสุกก่อนผลที่อ่อนกว่า โดยกระบวนการสุกต่าง ๆ เช่น การเปลี่ยนสี การอ่อนนุ่ม การเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล ก็เกิดขึ้นในอัตราที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นจึงถือได้ว่าความถ่วงจำเพาะเป็นดัชนีความแก่ที่ดีในการเก็บเกี่ยวหรือคัดเกรดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์

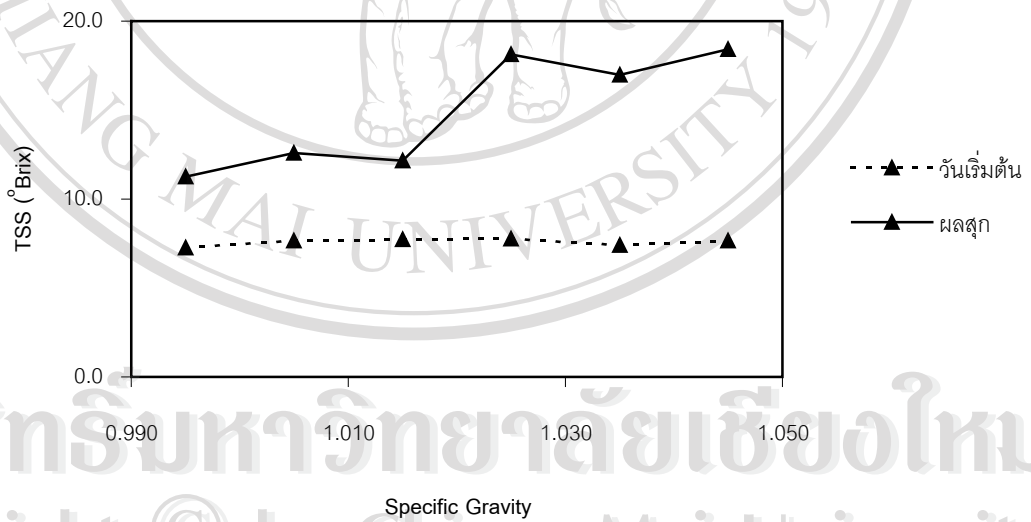
เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพพบว่าความแน่นเนื้อของมะม่วง ณ วันเริ่มต้น มีความแตกต่างกันน้อยมากในแต่ละกลุ่ม ทั้งนี้เพราะผลมะม่วงส่วนมากยังเป็นผลดิบ โมเลกุลต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในผนังเซลล์ยังมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ส่วนใหญ่พบว่าpektinอยู่ในรูปโปรโตpektin ซึ่งไม่ละลายน้ำ ผลไม้ดิบจึงมีลักษณะแข็ง (दनัย, 2540) จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ

ความถ่วงจำเพาะกับความแน่นเนื้อสามารถกล่าวได้ว่าความถ่วงจำเพาะมีความสัมพันธ์กับความแน่นเนื้อของผลมะม่วง ณ วันเริ่มต้นน้อยมาก แต่เมื่อนำมะม่วงในแต่ละกลุ่มไปบ่มให้สุกพบว่าความแน่นเนื้อของมะม่วงสุกจะสัมพันธ์กับความถ่วงจำเพาะ เห็นได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความถ่วงจำเพาะกับความแน่นเนื้อที่ค่อนข้างสูง โดยมะม่วงที่มีความถ่วงจำเพาะสูง (1.021-1.050) มีความแน่นเนื้อน้อยกว่ามะม่วงที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำ เนื่องจากมะม่วงที่มีความบริบูรณ์ของผลน้อยจะมีความถ่วงจำเพาะต่ำ เมื่อนำมาบ่มให้สุก กระบวนการสลายโปรโตพลาสไปอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ จะเกิดในอัตราที่ช้ากว่ามะม่วงที่มีความถ่วงจำเพาะสูง จึงทำให้มีความแน่นเนื้อมากกว่า ดังรูป 4.1

ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะของมะม่วงกับคุณภาพทางเคมีแสดงดังรูป 4.2-4.5 พบว่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) ณ วันเริ่มต้นไม่สัมพันธ์กับความถ่วงจำเพาะ โดยมีค่าใกล้เคียงกันและไม่แตกต่างกันทางสถิติ เนื่องจากมะม่วงดิบจะเก็บสะสมอาหารในรูปแป้งมากกว่าน้ำตาล (Fuchs *et al.*, 1980) ทำให้ปริมาณ TSS ที่ความถ่วงจำเพาะต่าง ๆ มีค่าไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อนำมะม่วงในแต่ละกลุ่มมาบ่มพบว่าปริมาณ TSS ของผลสุกมีความสัมพันธ์กับความถ่วงจำเพาะ เนื่องจากในกระบวนการสุก แป้งจะถูกไฮโดรไลซ์เป็นน้ำตาล ผลที่มีความบริบูรณ์มากจะมีปริมาณน้ำตาลสะสมมากกว่าจึงทำให้ปริมาณ TSS มีค่าสูงกว่า (สายชล, 2528; ดนัยและนิธิยา, 2548) ขณะที่ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของมะม่วงมีความสัมพันธ์กับความถ่วงจำเพาะทั้งในวันเริ่มต้นและในผลสุก ทั้งนี้ค่า pH ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนอิสระและ buffer capacity ของน้ำผลไม้ (दनัยและนิธิยา, 2548) ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไตเตรตได้ (TA) ของมะม่วงที่มีความถ่วงจำเพาะต่าง ๆ มีค่าแตกต่างกันทั้งในวันเริ่มต้นและเมื่อผ่านการบ่มให้สุก โดยในวันเริ่มต้นพบว่าที่ความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 1.031 มะม่วงมีปริมาณ TA สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การที่ปริมาณ TA มีค่ามากกว่า เนื่องจากในช่วงที่ผลมีความบริบูรณ์น้อยจะมีการสะสมกรด แต่เมื่อผลแก่มากขึ้นกรดจะถูกใช้ในการหายใจผ่านวัฏจักรเครปส์ (Mattoo *et al.*, 1975) ปริมาณกรดจึงลดลง และการที่ปริมาณ TA ของมะม่วงมีค่าแตกต่างกันนี้จึงทำให้ค่า TSS : TA ที่ความถ่วงจำเพาะต่าง ๆ มีความแตกต่างกันทั้งในวันเริ่มต้นและเมื่อผลสุกแล้ว

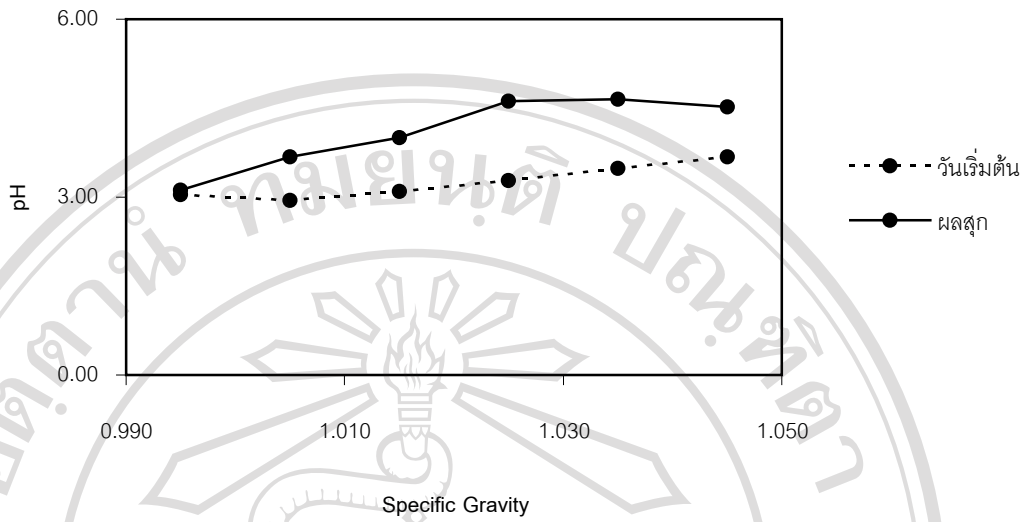


รูป 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับความแน่นเนื้อของผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์

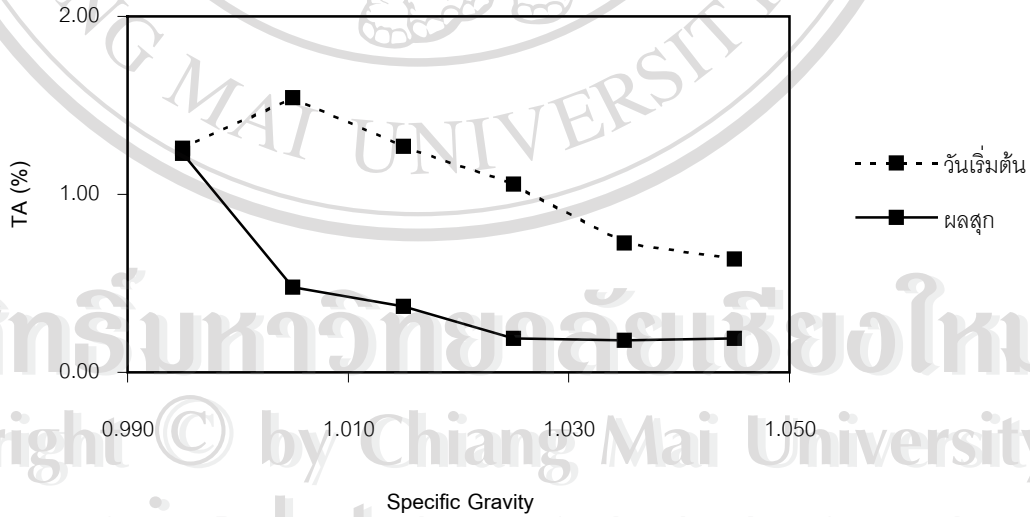


รูป 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์



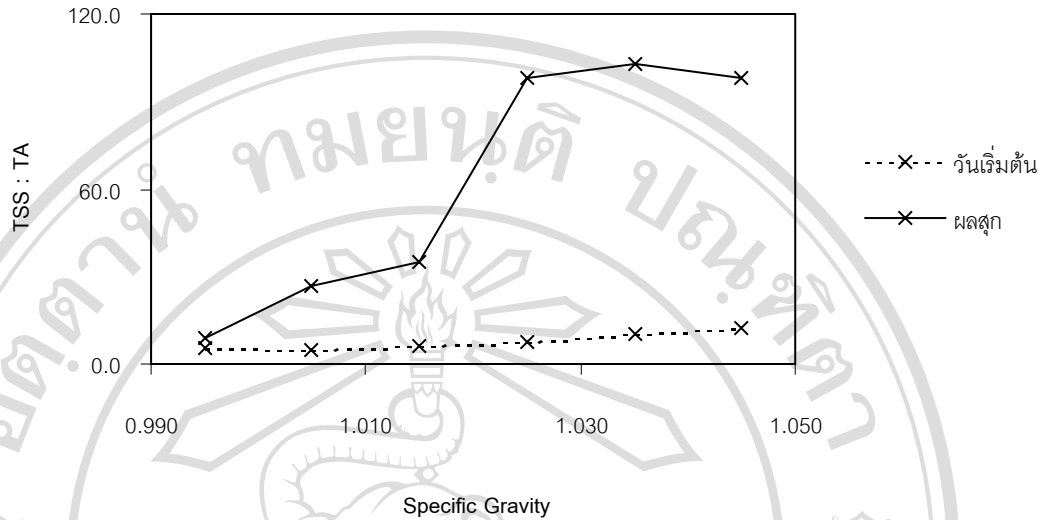


รูป 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับค่าความเป็นกรดต่าง  
ของผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์



รูป 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับปริมาณกรดทั้งหมดที่ไตเตรตได้  
ของผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright © by Chiang Mai University  
All rights reserved



รูป 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับอัตราส่วนระหว่างปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อปริมาณกรดทั้งหมดที่ไตเตรตได้ของผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์

#### 4.1.3 ความถ่วงจำเพาะที่เหมาะสมของผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์

การพิจารณาความถ่วงจำเพาะที่เหมาะสมของผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ในการคัดเลือกมะม่วงตัวอย่างนั้น จะใช้ข้อมูลด้านคุณภาพข้างต้นมาพิจารณาร่วมกัน เนื่องจากมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์เป็นมะม่วงรับประทานสุก จึงพิจารณาคุณภาพมะม่วงสุกเป็นสำคัญ โดยคุณภาพของรสชาติในด้านความหวานพิจารณาจากปริมาณ TSS ความเปรี้ยวพิจารณาจากค่า pH และปริมาณ TA โดยมะม่วงที่มีรสชาติดีควรจะมีปริมาณ TSS สูง ค่า pH สูงและปริมาณ TA ต่ำ อัตราส่วน TSS : TA สูง สภาพผลมีความทนทานต่อการขนส่ง โดยพิจารณาจากค่าความแน่นเนื้อ อายุการวางจำหน่ายพิจารณาจากระยะเวลาที่ใช้ในการสุก จากการทดลองพบว่าช่วงความถ่วงจำเพาะที่เหมาะสม คือ 1.021-1.040 ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะใช้เกณฑ์นี้ในการคัดเลือกมะม่วงเพื่อให้หน่วยทดลองมีความสม่ำเสมอมากที่สุด

## 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์

องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกและเนื้อมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ในวันเริ่มต้น แสดงดังตาราง 4.6

ตาราง 4.6 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกและเนื้อมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	เปลือกมะม่วง	เนื้อมะม่วง
ความชื้น	72.67	83.31
โปรตีน	1.23	0.54
ไขมัน	0.22	0.10
เถ้า	1.23	0.35
คาร์โบไฮเดรต	24.67	16.81

## 4.3 สมบัติทางความร้อนของผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์

วัดสมบัติทางความร้อนของเปลือกและเนื้อมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ในวันเริ่มต้น แสดงดังตาราง 4.7

### 4.3.1 ค่าความร้อนจำเพาะ

ในการศึกษาค่าความร้อนจำเพาะของมะม่วงในช่วงการลดอุณหภูมิจาก 28.0°C ไปเป็น 13.0°C (ภาคผนวก ข 1) และในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิจาก 28.0°C ไปเป็น 46.5°C (ภาคผนวก ข 2) ได้ค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ยที่อุณหภูมิ 28.0°C ดังตาราง 4.7 จะเห็นได้ว่าเปลือกและเนื้อมะม่วงมีค่าความร้อนจำเพาะไม่เท่ากัน ทั้งนี้เพราะมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน โดยในส่วนของเนื้อมะม่วงมีความชื้นสูงกว่าจึงมีค่าความร้อนจำเพาะมากกว่า

### 4.3.2 ค่าการนำความร้อน

การวิเคราะห์ค่าการนำความร้อนของมะม่วงตามวิธีของ ASTM (1998) ได้จากการเตรียมตัวอย่าง 2 ขนาด คือ แผ่นหนาและแผ่นบาง ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการหาค่าการนำความร้อนของเปลือกมะม่วง เพราะการเตรียมตัวอย่างแผ่นหนานั้น กำหนดให้มีความหนา 3.5 mm ในขณะที่

เปลือกมะม่วงมีความหนาเพียง 1.0-1.2 mm ดังนั้นจึงไม่สามารถหาค่าการนำความร้อนของเปลือกมะม่วงโดยวิธีนี้ได้ ส่วนค่าการนำความร้อนของเนื้อมะม่วงที่ 28.0°C แสดงในตาราง 4.7

#### 4.3.3 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของเปลือกและเนื้อมะม่วงที่อุณหภูมิ 28.0°C แสดงในตาราง 4.7

#### 4.3.3 ค่าการแพร่ความร้อน

ค่าการแพร่ความร้อนของเนื้อมะม่วงที่อุณหภูมิ 28.0°C แสดงในตาราง 4.7

ตาราง 4.7 สมบัติทางความร้อนของเปลือกและเนื้อมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ที่ 28.0°C

สมบัติทางความร้อน	เปลือกมะม่วง	เนื้อมะม่วง
ค่าความร้อนจำเพาะ (kJ/kg·°C)	3.345 ± 0.193	3.726 ± 0.176
ค่าการนำความร้อน (W/m·°C)	-	0.4398 ± 0.0899
ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	1069 ± 12	1033 ± 12
ค่าการแพร่ความร้อน (m <sup>2</sup> /s)	-	1.143 x 10 <sup>-7</sup>

#### 4.4 เปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่คำนวณจากองค์ประกอบทางเคมี

##### 4.4.1 เปรียบเทียบค่าความร้อนจำเพาะที่ได้จากการทดลองกับค่าที่คำนวณจากองค์ประกอบทางเคมี

สมการทำนายค่าความร้อนจำเพาะจากองค์ประกอบทางเคมีที่มีผู้รายงานไว้มีหลายรูปแบบ ได้แก่ สมการอย่างง่ายที่คิดจากปริมาณความชื้นเพียงอย่างเดียว สมการที่คิดจากองค์ประกอบทุกตัว และสมการที่คิดถึงผลของอุณหภูมิด้วย โดยทุกสมการจะใช้ได้กับอุณหภูมิเหนือจุดเยือกแข็งของอาหารนั้น แสดงดังนี้

(1) Siebel (1892)

$$C_p = 0.837 + 3.349x_w$$

(2) Backstrom and Emblik (1965) cited in Dincer (1997)

$$C_p = 1.200 + 2.990x_w$$

(3) Lamb (1976)

$$C_p = 1.470 + 2.720x_w$$

(4) Leninger and Beverloo (1975)

$$C_p = 4.180(0.5x_f + 0.3x_s + x_w)$$

(5) Choi and Okos (1983)

$$C_p = 1.547x_c + 1.711x_p + 1.928x_f + 0.908x_a + 4.180x_w$$

(6) Chen (1985) ได้พัฒนาสมการอย่างง่าย เมื่อทราบสัดส่วนมวลของของแข็ง

$$C_p = 4.19 - 2.30x_s - 0.628x_s^3$$

(7) Singh and Heldman (1993)

$$C_p = 1.424x_c + 1.549x_p + 1.675x_f + 0.837x_a + 4.187x_w$$

(8) Fernández-Martín (1972) เสนอสมการที่นำอุณหภูมิของอาหารมาคิดด้วย

$$C_p = 4.19x_w + [(1.370 + 0.113T)(1 - x_w)]$$

เมื่อ  $C_p$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะ (kJ/kg·°C)

$x_w$  คือ สัดส่วนโดยมวลของน้ำ

$x_s$  คือ สัดส่วนโดยมวลของของแข็ง

$x_p$  คือ สัดส่วนโดยมวลของโปรตีน

$x_f$  คือ สัดส่วนโดยมวลของไขมัน

- $x_a$  คือ สัดส่วนโดยมวลของถั่ว  
 $x_c$  คือ สัดส่วนโดยมวลของคาร์โบไฮเดรต  
 $T$  คือ อุณหภูมิของอาหาร ( $^{\circ}\text{C}$ )

ค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกและเนื้อมะม่วงที่คำนวณจากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวมีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทดลอง ดังตาราง 4.8 และ 4.9 สำหรับเปลือกและเนื้อมะม่วงตามลำดับ

ตาราง 4.8 เปรียบเทียบค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ที่  $28.0^{\circ}\text{C}$  ที่ได้จากการทดลองและจากสมการความสัมพันธ์

ค่าความร้อนจำเพาะ ( $\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ )								
ค่าที่วัดได้	ค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์							
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
3.345	3.271	3.373	3.447	3.385	3.455	3.575	3.427	3.506
ค่าความแตกต่าง (ร้อยละ)	2.27	0.83	2.95	1.18	3.20	6.43	2.39	4.61

ตาราง 4.9 เปรียบเทียบค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ที่  $28.0^{\circ}\text{C}$  ที่ได้จากการทดลองและจากสมการความสัมพันธ์

ค่าความร้อนจำเพาะ ( $\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ )								
ค่าที่วัดได้	ค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์							
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
3.726	3.627	3.691	3.736	3.694	3.757	3.809	3.741	3.772
ค่าความแตกต่าง (ร้อยละ)	2.73	0.95	0.27	0.87	0.82	2.17	0.39	1.22

ค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ที่วัดได้โดยใช้เครื่อง DSC เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการ (1) ถึง (8) พบว่าให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยมีความแตกต่างน้อย ในกรณีนี้สมการ (2) ให้ค่าที่ใกล้เคียงมากที่สุด โดยมีความแตกต่างร้อยละ 0.83 ซึ่งสมการนี้ใช้เฉพาะสัดส่วนของความชื้นเท่านั้น ส่วนค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อมะม่วงที่วัดได้โดยใช้เครื่อง DSC เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการ (1) ถึง (8) พบว่าให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ในกรณีนี้สมการ (3) ให้ค่าที่ใกล้เคียงมากที่สุด โดยมีความแตกต่างร้อยละ 0.27 เท่านั้น

แสดงให้เห็นว่าสามารถคำนวณหาความร้อนจำเพาะของมะม่วงจากสมการความถัมภ์กันได้ เมื่อพิจารณาในเรื่องความสะดวกในการวิเคราะห์ ควรใช้สมการที่หาค่าความร้อนจำเพาะจากปริมาณความชื้น ทั้งนี้เพราะให้ค่าที่ใกล้เคียงมากกว่าสมการที่คิดถึงผลขององค์ประกอบอื่น ๆ นอกจากนี้การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีมีความซับซ้อนและใช้เวลาในการวิเคราะห์ค่อนข้างนาน การใช้ค่าความชื้นเพียงอย่างเดียวจึงน่าจะมีความเหมาะสมมากกว่า

#### 4.4.2 เปรียบเทียบค่าการนำความร้อนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่คำนวณจากองค์ประกอบทางเคมี

สมการทำนายค่าการนำความร้อนจากองค์ประกอบทางเคมีที่มีผู้รายงานไว้มีรูปแบบเดียวกับสมการของค่าความร้อนจำเพาะ นั่นคือสมการอย่างง่ายที่คิดจากปริมาณความชื้นเพียงอย่างเดียว สมการที่คิดจากองค์ประกอบทุกตัว และสมการที่คิดถึงผลของอุณหภูมิด้วย โดยทุกสมการจะใช้ได้ที่อุณหภูมิเหนือจุดเยือกแข็งของอาหารนั้น แสดงดังนี้

(1) Backstrom and Emblik (1965) cited in Dincer (1997)

$$k = 0.26 + 0.34x_w$$

(2) Bowman (1970) cited in Lamb (1976)

$$k = 0.056 + 0.567x_w$$

(3) Comini *et al.* (1974)

$$k = 0.26 + 0.33x_w$$

(4) Sweat (1974) พัฒนาสมการที่ใช้สำหรับสำหรับหาค่าการนำความร้อนของผักและผลไม้

$$k = 0.148 + 0.493x_w$$

(5) Dominguez *et al.* (1974)

$$k = 0.60x_w + 0.20x_p + 0.18x_f + 0.245x_c$$

(6) Choi and Okos (1983) พัฒนาสมการที่ใช้ได้ดีกับอาหารเหลว แต่พบว่าสามารถใช้กับอาหารที่มีสถานะเป็นของแข็งได้

$$k = 0.61x_w + 0.20x_p + 0.175x_f + 0.135x_a + 0.205x_c$$

(7) Sweat (1994) ได้พัฒนาสมการสำหรับการหาค่าการนำความร้อนของอาหารเหลว หรืออาหารที่มีสถานะเป็นของแข็ง

$$k = 0.58x_w + 0.155x_p + 0.16x_f + 0.135x_a + 0.25x_c$$

(8) Miles *et al.* (1983) cited in Rahman, (1995) ได้แสดงสมการหาค่าการนำความร้อนที่นำอุณหภูมิของอาหารมาคิดด้วย

$$k = 0.344x_w - 0.0644x_p - 0.133x_f + 0.0008T$$

ค่าการนำความร้อนของเนื้อมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์เปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองดังแสดงในตาราง 4.10

ตาราง 4.10 เปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของเนื้อมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ที่ 28.0°C ที่ได้จากการทดลองและจากสมการความสัมพันธ์

ค่าการนำความร้อน (W/m·°C)								
ค่าที่วัดได้	ค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์							
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
0.4398	0.5433	0.5284	0.5349	0.5587	0.5423	0.5444	0.5267	0.3085
ค่าความแตกต่าง (ร้อยละ)	19.04	16.76	17.78	21.28	18.90	19.21	16.50	42.56



ค่าการนำความร้อนของเนื้อมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ที่วัดได้โดยใช้เครื่อง DSC เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการ (1) ถึง (8) พบว่าสมการ (7) ซึ่งเป็นสมการที่คิดจากองค์ประกอบทุกตัว มีความแตกต่างจากค่าที่วัดได้น้อยที่สุด คือแตกต่างร้อยละ 16.50 สมการที่มีความแตกต่างรองลงมา คือสมการ (2) ซึ่งคิดจากปริมาณความชื้นเพียงอย่างเดียว สาเหตุที่ค่าการนำความร้อนที่ได้จากการวัดแตกต่างจากค่าที่คำนวณจากองค์ประกอบทางเคมีค่าความมาจากวิธีการวิเคราะห์ เนื่องจากการใช้ DSC ในการหาค่าการนำความร้อนเป็นการวัดการถ่ายเทความร้อนในสภาวะคงตัว วิธีนี้ใช้เวลาในการวิเคราะห์นาน ตัวอย่างมะม่วงแบบแผ่นหนามีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากจะเกิดการสูญเสียความชื้น ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนภายในชิ้นตัวอย่างช้าลง ค่าการนำความร้อนที่ได้จึงต่ำกว่าความเป็นจริง

เมื่อนำสมการ (7) มาใช้คำนวณค่าการนำความร้อนของเปลือกมะม่วงจะได้  $0.4692 \text{ W/m}\cdot\text{C}$  ซึ่งค่าที่ได้นี้จะใช้ในการคำนวณต่อไป

อย่างไรก็ตามการคำนวณหาค่าการนำความร้อนจากสมการความสัมพันธ์ เมื่อพิจารณาในเรื่องความสะดวกในการวิเคราะห์ สมการ (2) เป็นสมการที่มีความเหมาะสมในการใช้งานมากกว่าสมการ (7) เพราะการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีมีความซับซ้อนและใช้เวลาในการวิเคราะห์ค่อนข้างนาน การใช้ค่าความชื้นเพียงอย่างเดียวจึงน่าจะมีความเหมาะสมมากกว่า ค่าการนำความร้อนของเปลือกที่คำนวณได้จากสมการ (2) คือ  $0.4680 \text{ W/m}\cdot\text{C}$  ซึ่งแตกต่างกับ  $0.4692 \text{ W/m}\cdot\text{C}$  ที่ได้จากสมการ (7) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แสดงสมบัติทางความร้อนของเนื้อมะม่วงที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ดังตาราง 4.11

ตาราง 4.11 เปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของเนื้อมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ที่  $28.0^{\circ}\text{C}$  ที่ได้จากการทดลองและจากสมการความสัมพันธ์

สมบัติทางความร้อน	จากการทดลอง	คำนวณจากสมการ
ค่าความร้อนจำเพาะ ( $\text{kJ/kg}\cdot\text{C}$ )	3.726	3.736 (3)
ค่าการนำความร้อน ( $\text{W/m}\cdot\text{C}$ )	0.4398	0.5284 (2)
ค่าการแพร่ความร้อน ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$1.143 \times 10^{-7}$	$1.369 \times 10^{-7}$

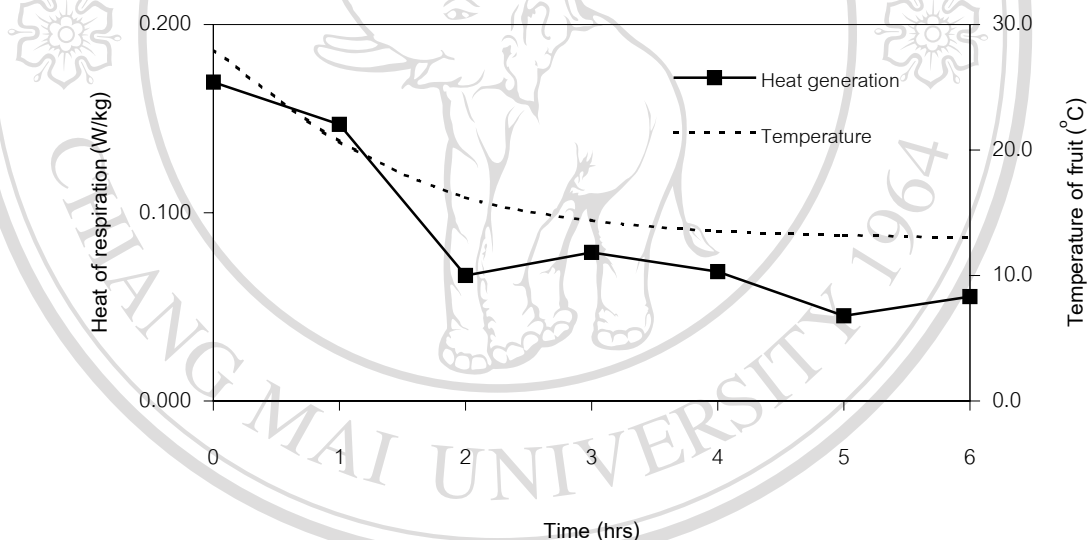
หมายเหตุ: เนื้อมะม่วงมีความชื้น 83.31%

#### 4.5 การวัดปริมาณความร้อนจากการหายใจของผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์

ทำการหาปริมาณความร้อนจากการหายใจของผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ขณะผ่านกระบวนการทางความร้อนที่เวลาต่าง ๆ ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังนี้

##### 4.5.1 ปริมาณความร้อนจากการหายใจขณะทำการลดอุณหภูมิจาก 28.0°C ไปเป็น 13.0°C

ทำการเก็บมะม่วงซึ่งมีอุณหภูมิเริ่มต้น 28.0°C ไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (13.0 ± 0.5°C) วัดอัตราการหายใจของผลมะม่วงในช่วงที่มีการลดอุณหภูมิจาก 28.0°C ไปเป็น 13.0°C และคำนวณออกมาในรูปของความร้อนที่ผลมะม่วงผลิตขึ้น ดังรูป 4.6 และภาคผนวก ข 3

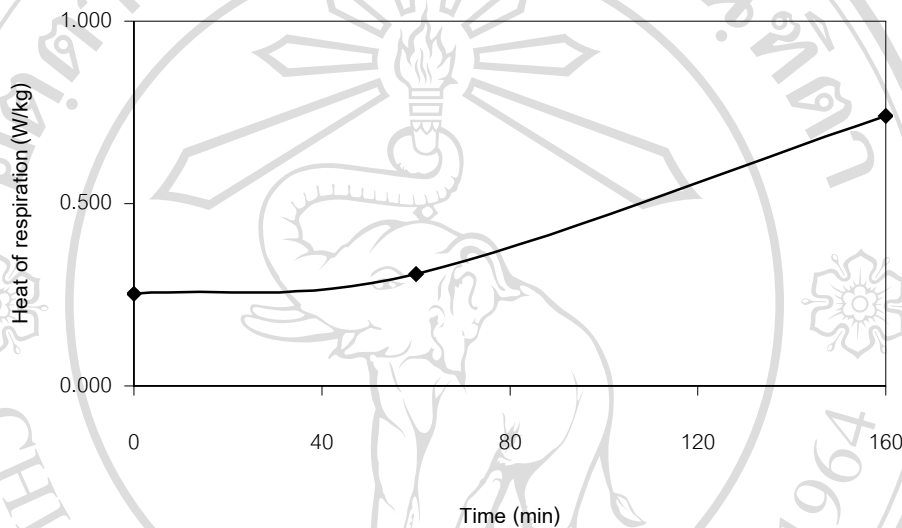


รูป 4.6 ความร้อนจากการหายใจของผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (13.0 ± 0.5°C)

พบว่าในช่วงเริ่มต้นปริมาณความร้อนจากการหายใจมีค่าสูง เนื่องจากผลิตผลที่เก็บเกี่ยวมาใหม่ยังคงมีอัตราการหายใจที่สูงอยู่ จากนั้นพบว่าปริมาณความร้อนที่มะม่วงผลิตขึ้นมีแนวโน้มลดลงพร้อม ๆ กับอุณหภูมิภายในผลที่ลดลง โดยที่สองชั่วโมงแรกของการเก็บรักษาปริมาณความร้อนจากการหายใจมีค่าสูงและแตกต่างจากในช่วงที่ 2-6 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปสองชั่วโมง อุณหภูมิของมะม่วงลดลง ซึ่งจะช่วยลดอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในผลิตผล และเป็นไปตามกฎของ Van't Hoff (คณัย, 2540)

#### 4.5.2 ปริมาณความร้อนจากการหายใจขณะทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก 28.0°C ไปเป็น 46.5°C

ทำการเก็บมะม่วงซึ่งมีอุณหภูมิเริ่มต้น 28.0°C ไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (50.0 ± 0.5°C) วัดอัตราการหายใจของผลมะม่วงในช่วงที่มีการเพิ่มอุณหภูมิจาก 28.0°C ไปเป็น 46.5°C และคำนวณออกมาในรูปของความร้อนที่มะม่วงผลิตขึ้น ดังรูป 4.7 และภาคผนวก ข 4



รูป 4.7 ความร้อนจากการหายใจของผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (50.0 ± 0.5°C)

ในช่วงเริ่มต้นปริมาณความร้อนจากการหายใจมีค่าเป็น 0.253 W/kg จากนั้นพบว่าปริมาณความร้อนที่มะม่วงผลิตขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วพร้อม ๆ กับอุณหภูมิภายในผลที่เพิ่มขึ้น โดยความร้อนจากการหายใจที่เวลาเริ่มต้น ในนาที่ที่ 60 และในนาที่ที่ 160 มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิสูงจะทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีในผลผลิตเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับที่อุณหภูมิต่ำ

ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลมะม่วงเมื่อเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (13.0 ± 0.5°C) โดยทำการเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงเวลาต่าง ๆ แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ค 3 ผลที่ได้แสดงดังตาราง 4.12

ถึงแม้ว่าความร้อนจากการหายใจที่ผลิตผลผลิตขึ้นจะมีปริมาณเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ แต่เมื่อพิจารณาจากตาราง 4.12 พบว่าความร้อนปริมาณนี้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในผลมะม่วงน้อยมากเมื่อเทียบกับผลของตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งเป็นไปตาม

สมมติฐาน การคำนวณในตอนต่อไปจึงไม่คิดผลของความร้อนจากการหายใจที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในผลมะม่วง

ตาราง 4.12 ค่าถ่วงน้ำหนักของปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในผลมะม่วงเมื่อเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ( $13.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ )

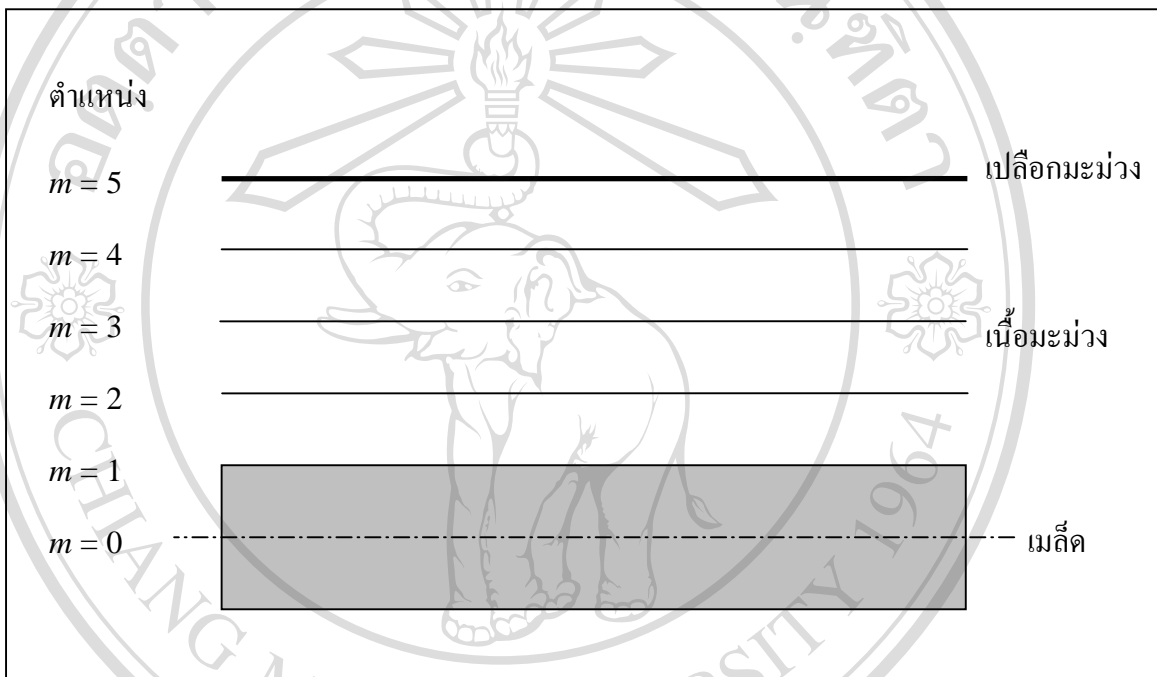
ชั่วโมงที่	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง $\Delta t$		ค่าถ่วงน้ำหนัก (ร้อยละ)	
	โดยตัวกลาง	โดยความร้อนจากการหายใจ	ตัวกลาง	ความร้อนจากการหายใจ
0	-1.900	+0.004	99.79	0.21
1	-0.161	+0.004	97.58	2.42
2	-0.102	+0.002	98.08	1.92
3	-0.063	+0.002	96.92	3.08
4	-0.038	+0.002	95.00	5.00
5	-0.023	+0.001	95.83	4.17
6	-0.014	+0.001	93.33	6.67
เฉลี่ย			96.65	3.35

4.6 การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ขณะผ่านกระบวนการทางความร้อน

อุณหภูมิที่ตำแหน่งใด ๆ ภายในผลมะม่วง ณ เวลาเริ่มต้นของการทำนายจะได้อาจการวัด เมื่อเข้าสู่กระบวนการทางความร้อนการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นจากการพาความร้อนเนื่องจากตัวกลางที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่บริเวณผิวหน้า ส่วนความร้อนภายในผลมะม่วงเกิดจากการนำความร้อนของผลมะม่วงเอง จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในผล

การศึกษาการกระจายอุณหภูมิภายในผลมะม่วงที่เวลาต่าง ๆ ในเบื้องต้นได้กำหนดสมมติฐานตามที่กล่าวไปในบทที่ 3 แผนภาพของมะม่วงที่ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยวิธี finite difference แสดงดังรูป 4.8 กำหนดให้มะม่วงมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก รัศมี  $r$  (m) แบ่งมะม่วงตามระยะทางในแนวรัศมีเป็น 5 ส่วน แต่ละส่วนมีความลึกเท่ากันคือ  $\Delta r$  (m) ใช้

สัญลักษณ์แทนตำแหน่งต่าง ๆ เป็น  $m$  โดยที่  $m = 0$  จะเป็นตำแหน่งแกนกลางเมล็ด พื้นที่ที่เรเงาแสดงถึงเมล็ดมะม่วงซึ่งมีความหนาเมื่อวัดจากแกนกลางเป็น  $\Delta r$  ดังนั้นที่  $m = 1$  จึงเป็นตำแหน่งของเนื้อส่วนที่ติดกับเมล็ด ที่  $m = 5$  เป็นตำแหน่งของผิวมะม่วง สมบัติทางความร้อนที่ใช้ในการทำนายได้จากการทดลองตามที่รายงานในหัวข้อที่ 4.3 และได้จากการคำนวณจากองค์ประกอบทางเคมีตามที่รายงานในหัวข้อ 4.4



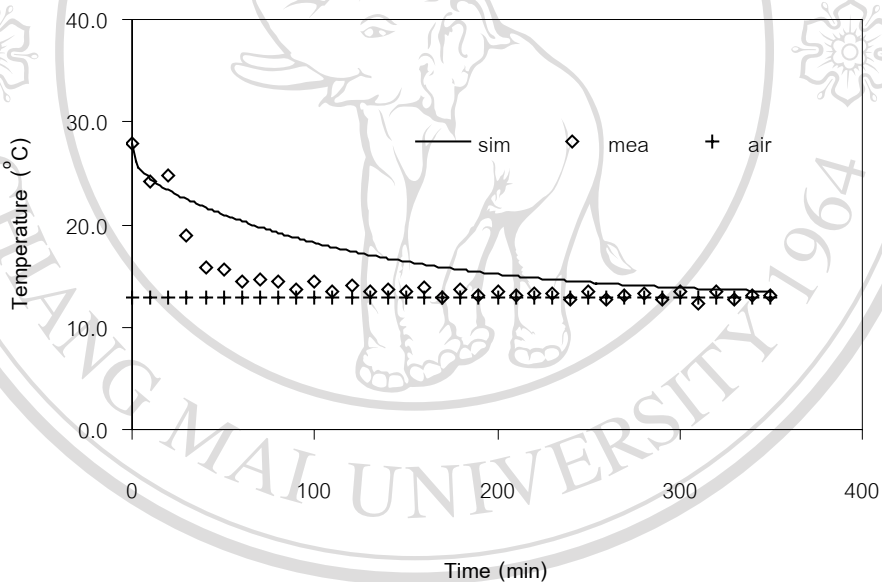
รูป 4.8 แผนภาพของมะม่วงที่ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยวิธี finite difference

4.6.1 การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในผลมะม่วงขณะผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยใช้สมบัติทางความร้อนที่ได้จากการทดลอง

4.6.1.1 การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ โดยนำผลมะม่วงมาเก็บรักษาในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (อุณหภูมิอากาศ  $13.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ )

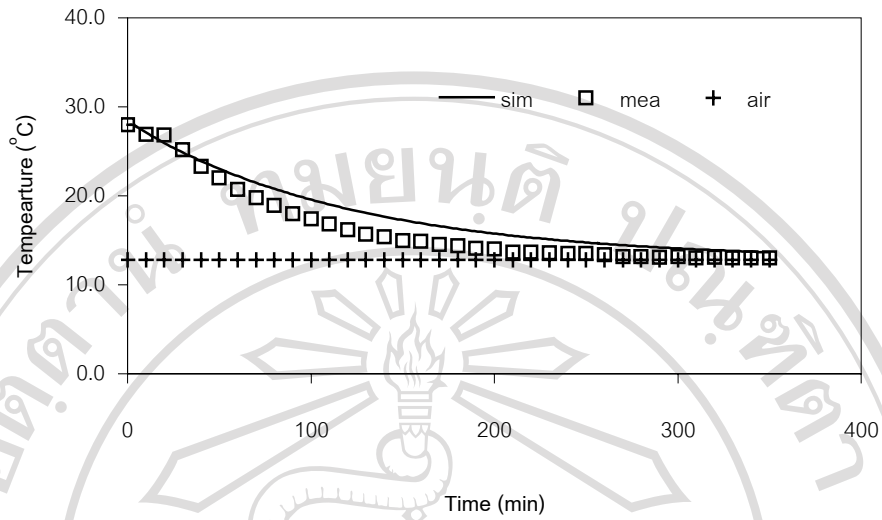
ตู้ควบคุมอุณหภูมิมีระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ (forced convection circulation) ความเร็วและอุณหภูมิของอากาศถูกควบคุมด้วย microprocessor อุณหภูมิอากาศวัดได้  $12.8^{\circ}\text{C}$  และถือว่าคงที่ตลอดการทดลอง ความเร็วในการไหลของอากาศเย็นมีค่าเฉลี่ยเป็น

0.6 m/s อุณหภูมิเริ่มต้นของมะม่วงเท่ากับ  $28.0^{\circ}\text{C}$  และสม่ำเสมอตลอดทั้งผล ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานเบื้องต้น เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของมะม่วงเป็น 0.06775 m ความหนาของเปลือกมะม่วงเฉลี่ยเป็น 0.00115 m คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สภาวะดังกล่าวได้เป็น  $9.17 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$  (ภาคผนวก ค 1) กำหนดค่า  $F_0 = 1/4$  โดยที่  $\Delta r = 6.78 \times 10^{-3} \text{ m}$  คำนวณ  $\Delta t = 100.54 \text{ s}$  (ภาคผนวก ค 4) ปริมาณความร้อนจากการหายใจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ น้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้ แบบจำลองการถ่ายเทความร้อน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ โดยวิธี finite difference เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้แสดงผลดังรูป 4.9-4.11 (ภาคผนวก ข 5)

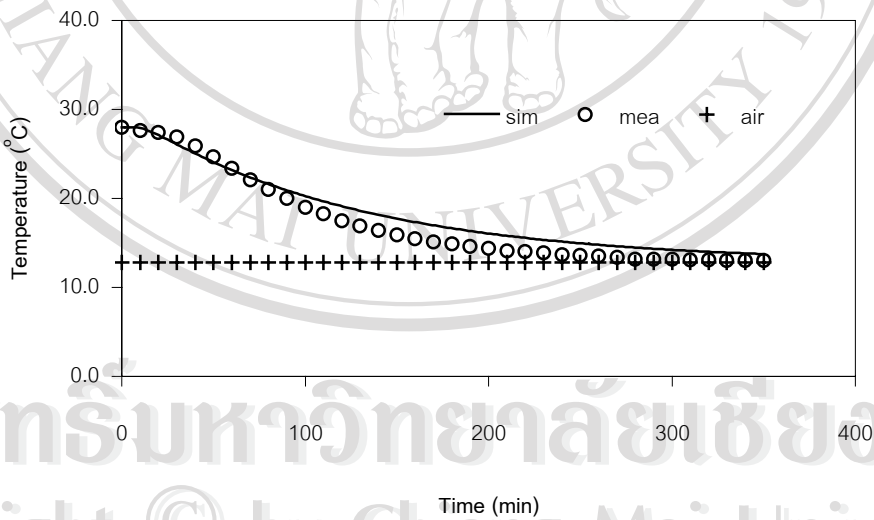


รูป 4.9 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการวัด (mea) และจากแบบจำลอง (sim) ที่ผิว ( $m = 5$ ) ของมะม่วง (เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.06775 m)

ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ( $13.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ )



รูป 4.10 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการวัด (mea) และจากแบบจำลอง (sim) ณ ตำแหน่ง  
 ลึกจากผิว  $2\Delta r$  ( $m = 3$ ) ของมะม่วง (เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.06775 m)  
 ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ( $13.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ )



รูป 4.11 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการวัด (mea) และจากแบบจำลอง (sim) ณ ตำแหน่ง  
 เนื้อติดเมล็ด ( $m = 1$ ) ของมะม่วง (เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.06775 m)  
 ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ( $13.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ )

ความแม่นยำของแบบจำลองพิจารณาจากค่า Root Mean Square Error (*RMSE*) ดังสมการ (3.21) ณ ตำแหน่งเนื้อติดเมล็ด ( $m = 1$ ) ซึ่งอยู่ลึกจากผิว  $4\Delta r$  พบว่ามีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิอยู่ที่  $1.25^{\circ}\text{C}$  และที่ตำแหน่งลึกจากผิวมะม่วง  $2\Delta r$  ( $m = 3$ ) ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิอยู่ที่  $1.54^{\circ}\text{C}$  ค่า *RMSE* มากที่สุดคือตำแหน่งผิวมะม่วง ( $m = 5$ ) มีค่าเป็น  $2.89^{\circ}\text{C}$  โดยความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวนั้นมีค่ามากในช่วงเริ่มต้น (60 นาทีแรก) แต่เมื่อเวลาผ่านไป ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิจะลดลงโดยที่เวลา 350 นาที ความแตกต่างมีค่าเพียง  $0.5^{\circ}\text{C}$

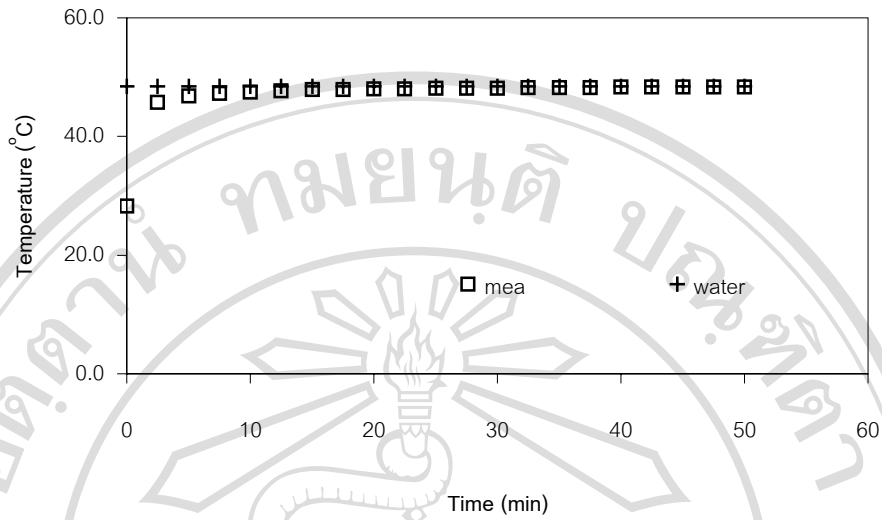
อย่างไรก็ตาม หลักสำคัญในการพิจารณาการลดอุณหภูมิของมะม่วงจะพิจารณาที่ใจกลางผลเป็นหลัก ในที่นี้จะใช้ข้อมูลที่ทำนายได้ ณ ตำแหน่ง  $m = 1$  พบว่าที่เวลา 300 นาที เป็นต้นไป ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ทำนายกับอุณหภูมิที่วัดได้มีค่าน้อยกว่า  $1.0^{\circ}\text{C}$  ซึ่งถือว่าน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าการสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนสามารถนำมาใช้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในผลิตผลในสภาวะอุณหภูมิทำได้

#### 4.6.1.2 การให้ความร้อนด้วยน้ำร้อน โดยจุ่มผลมะม่วงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (อุณหภูมิน้ำ $48.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ )

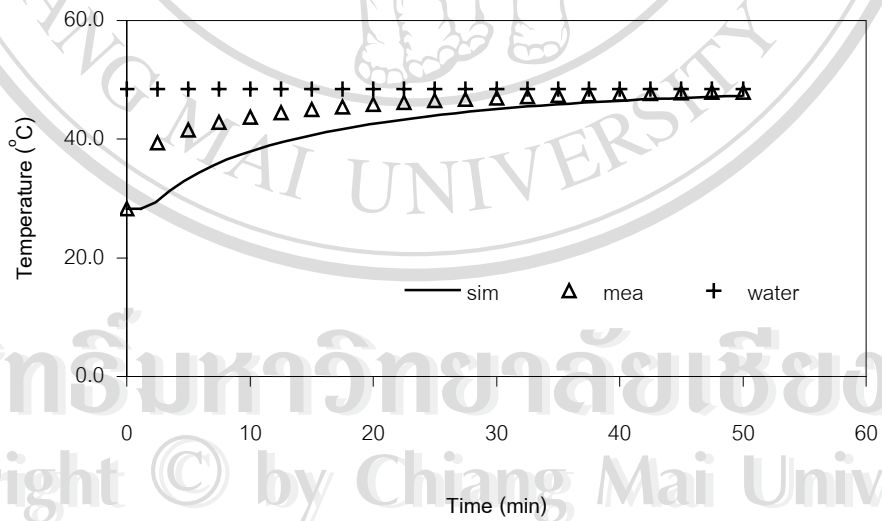
ศึกษาการเพิ่มอุณหภูมิภายในผลมะม่วงเมื่อจุ่มลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ อุณหภูมิน้ำวัดได้  $48.4^{\circ}\text{C}$  และถือว่าคงที่ตลอดการทดลอง อุณหภูมิเริ่มต้นของมะม่วงเท่ากับ  $28.3^{\circ}\text{C}$  และสมมติว่าผลตลอดทั้งผล เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของมะม่วงเป็น  $0.05642\text{ m}$  ความหนาของเปลือกมะม่วงเฉลี่ยเป็น  $0.00100\text{ m}$  กำหนดค่า  $F_0 = 1/4$  โดยที่  $\Delta r = 5.64 \times 10^{-3}\text{ m}$  จำนวน  $\Delta t = 69.57\text{ s}$  (ภาคผนวก ค 5) ปริมาณความร้อนจากการหายใจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ผิวมะม่วงจะเพิ่มอย่างรวดเร็ว และเข้าใกล้อุณหภูมิน้ำร้อนภายในเวลาน้อยกว่า 15 นาที ดังรูป 4.12 ทั้งนี้เนื่องจากน้ำร้อนมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงมาก ดังนั้น ในการจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในผลมะม่วงจะสมมติให้อุณหภูมิที่ผิวเท่ากับอุณหภูมิน้ำร้อน แบบจำลองการถ่ายเทความร้อน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ โดยวิธี finite difference เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้แสดงดังรูป 4.13-4.14 (ภาคผนวก ข 6)





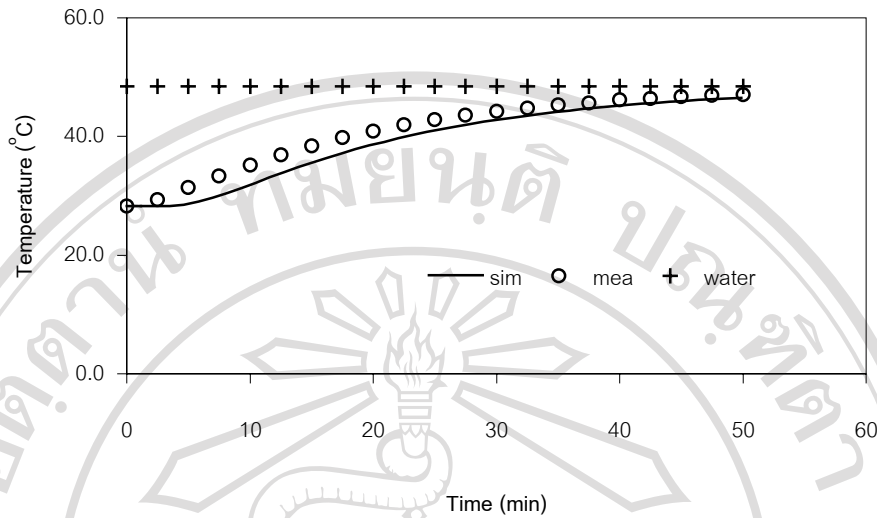
รูป 4.12 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่บริเวณผิวของมะม่วง (mea) ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ( $48.4 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ )



รูป 4.13 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการวัด (mea) และจากแบบจำลอง (sim) ณ ตำแหน่ง

ลึกจากผิว  $2\Delta r$  ( $m = 3$ ) ของมะม่วง (เส้นผ่าศูนย์กลาง  $0.05642$  m)

ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ( $48.4 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ )



รูป 4.14 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการวัด (mea) และจากแบบจำลอง (sim) ณ ตำแหน่งเนื้อติดเมล็ด ( $m = 1$ ) ของมะม่วง (เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.05642 m) ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ( $48.4 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ )

เมื่อพิจารณาจากค่า  $RMSE$  ณ ตำแหน่งเนื้อติดเมล็ด ( $m = 1$ ) ซึ่งอยู่ใกล้จากผิว  $4\Delta r$  พบว่ามีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิอยู่ที่  $1.99^{\circ}\text{C}$  และที่ตำแหน่งลึกจากผิวมะม่วง  $2\Delta r$  ( $m = 3$ ) ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิอยู่ที่  $4.21^{\circ}\text{C}$  โดยความแตกต่างของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง  $m = 3$  นั้นมีค่ามากในช่วงเริ่มต้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปค่าความแตกต่างของอุณหภูมิจะลดลง

อย่างไรก็ตาม หลักสำคัญในการศึกษากระบวนการทางความร้อนของผลิตผลจะพิจารณาจากอุณหภูมิที่ใจกลางผลเป็นหลัก ในที่นี้จะใช้ข้อมูลที่ทำนายได้ ณ ตำแหน่ง  $m = 1$  พบว่าเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิจาก  $28.3^{\circ}\text{C}$  ไปเป็น  $46.5^{\circ}\text{C}$  ที่วัดได้จากการทดลองเป็น 43 นาที ซึ่งเวลานี้จากการทำนายจะมีอุณหภูมิ  $45.7^{\circ}\text{C}$  ต่างจากอุณหภูมิจริงเพียง  $0.8^{\circ}\text{C}$  เท่านั้น ในการทำนายจะต้องใช้เวลา 50 นาที จึงจะมีอุณหภูมิ  $46.5^{\circ}\text{C}$  จะเห็นว่าผลจากการสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนสามารถนำมาใช้พยากรณ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในผลิตผลได้

จากรูป 4.9-4.11 และ 4.13-4.14 พบว่าลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากแบบจำลองจะมีอัตราที่ช้ากว่าความเป็นจริง ทั้งนี้เนื่องจากสมมติฐานเริ่มต้นที่กำหนดให้มะม่วงมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ระยะรัศมีวัดจากส่วนที่หนาที่สุดและคิดการถ่ายเทความร้อนในมิติเดียว (คือในแนวรัศมีเท่านั้น) ซึ่งจะส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนโดยตรง เพราะในความเป็นจริงบริเวณส่วน

หัวและส่วนปลายของมะม่วงมีขนาดเล็กกว่าตรงกลาง การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นเร็วกว่า อีกทั้งการถ่ายเทความร้อนน่าจะเกิดขึ้นทั้งในแนวรัศมีและแนวแกนด้วย

#### 4.6.2 การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในผลมะม่วงขณะผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยใช้สมบัติทางความร้อนที่คำนวณจากองค์ประกอบทางเคมี

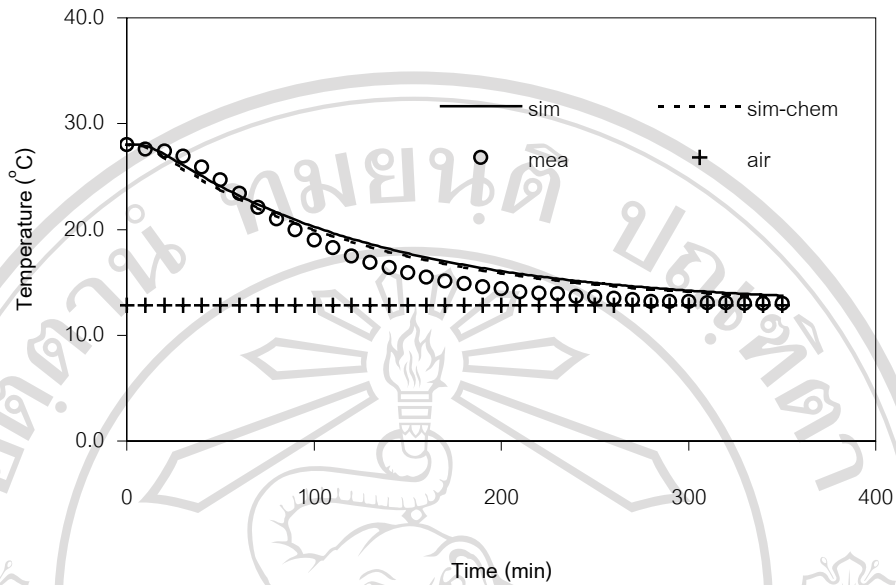
จากหัวข้อ 4.4 เปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่คำนวณจากองค์ประกอบทางเคมี พบว่าสมบัติทางความร้อนของมะม่วงสามารถคำนวณได้จากองค์ประกอบทางเคมี โดยมีความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงได้ทำการคำนวณค่าความร้อนจำเพาะและค่าการนำความร้อนจากสมการความสัมพันธ์ที่คิดจากความชื้นเพียงอย่างเดียว โดยเลือกสมการที่ให้ค่าความแตกต่างน้อยที่สุด ค่าที่คำนวณได้แสดงในตาราง 4.13 ค่าการแพร่ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก  $1.143 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  ไปเป็น  $1.369 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

##### 4.6.2.1 การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ โดยนำมะม่วงมาเก็บรักษาในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ $13.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$

สมบัติทางความร้อนที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ ส่งผลให้ค่าการแพร่ความร้อนเพิ่มขึ้น จากสภาวะที่กำหนดตามหัวข้อ 4.6.1.1 ค่าเวลา  $\Delta t = 83.94 \text{ s}$  และค่า  $Bi = 0.117$  ซึ่งลดลงเนื่องจากค่าการนำความร้อนของเนื้อมะม่วงมีค่าเพิ่มขึ้น

แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนโดยวิธี finite difference ณ ตำแหน่งเนื้อติดเมล็ด ( $m = 1$ ) ที่คิดสมบัติทางความร้อนจากองค์ประกอบทางเคมีเปรียบเทียบกับที่วัดได้จากการทดลองแสดงดังรูป 4.15 ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ของการทำนายอุณหภูมิโดยใช้สมบัติทางความร้อนจากวิธีที่ต่างกันแสดงในตาราง 4.13

ความแม่นยำของแบบจำลองพิจารณาจากค่า RMSE พบว่า ณ ตำแหน่งเนื้อติดเมล็ด ( $m = 1$ ) ความแตกต่างของอุณหภูมิอยู่ที่  $1.11^\circ\text{C}$  ขณะที่การทำนายโดยใช้สมบัติทางความร้อนที่ได้จากการทดลองมีค่าเป็น  $1.25^\circ\text{C}$  และที่ตำแหน่งลึกจากผิวมะม่วง  $2\Delta r$  ( $m = 3$ ) ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิอยู่ที่  $1.42^\circ\text{C}$  ขณะที่การทำนายโดยใช้สมบัติทางความร้อนที่ได้จากการทดลองมีค่าเป็น  $1.54^\circ\text{C}$  ค่า RMSE ที่ผิวมะม่วง ( $m = 5$ ) มีค่าเป็น  $2.94^\circ\text{C}$  ขณะที่การทำนายโดยใช้สมบัติทางความร้อนที่ได้จากการทดลองมีค่าเป็น  $2.89^\circ\text{C}$



รูป 4.15 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการวัด (mea) ได้จากแบบจำลอง (sim) และได้จากแบบจำลองที่ใช้สมบัติทางความร้อนซึ่งคำนวณจากองค์ประกอบทางเคมี (sim-chem) ณ ตำแหน่งเนื้อติดเมล็ด ( $m = 1$ ) ของมะม่วง (เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.06775 m) ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ( $13.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ )

ตาราง 4.13 เปรียบเทียบค่า Root Mean Square Error ของอุณหภูมิมะม่วงในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ( $13.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ) โดยใช้สมบัติทางความร้อนของมะม่วงจากวิธีที่ต่างกัน

สมบัติทางความร้อน	RMSE ( $^{\circ}\text{C}$ )		
	ที่ผิว ( $m = 5$ )	( $m = 3$ )	เนื้อติดเมล็ด ( $m = 1$ )
วัดโดยตรง	2.89	1.54	1.25
สมการความสัมพันธ์	2.94	1.42	1.11

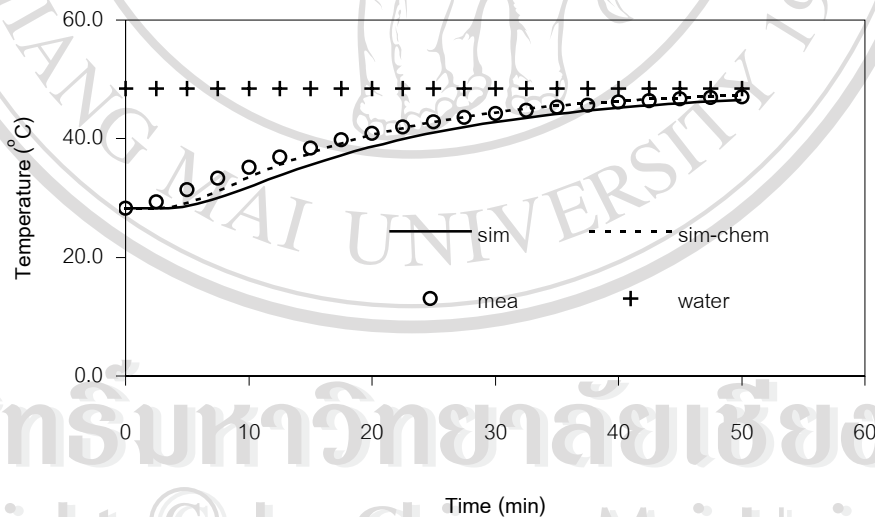
All rights reserved

#### 4.6.2.2 การให้ความร้อนโดยจุ่มผลมะม่วงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ $48.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$

สมบัติทางความร้อนที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ ส่งผลให้ค่าการแพร่ความร้อนเพิ่มขึ้น จากสถานะที่กำหนดตามหัวข้อ 4.6.1.2 จำนวน  $\Delta t = 58.09$  s

แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนโดยวิธี finite difference ณ ตำแหน่งเนื้อติดเมล็ด ( $m = 1$ ) ที่คิดสมบัติทางความร้อนจากองค์ประกอบทางเคมีเปรียบเทียบกับที่วัดได้จากการทดลอง แสดงดังรูป 4.16 ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ของวิธีการทำนายอุณหภูมิโดยใช้สมบัติทางความร้อนจากวิธีที่ต่างกัน แสดงในตาราง 4.14

ความแม่นยำของแบบจำลองพิจารณาจากค่า RMSE พบว่า ณ ตำแหน่งเนื้อติดเมล็ด ( $m = 1$ ) ความแตกต่างของอุณหภูมิอยู่ที่  $1.05^{\circ}\text{C}$  ขณะที่การทำนายโดยใช้สมบัติทางความร้อนที่ได้จากการทดลองมีค่าเป็น  $1.99^{\circ}\text{C}$  และ ณ ตำแหน่งลึกจากผิวมะม่วง  $2\Delta r$  ( $m = 3$ ) ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิอยู่ที่  $3.85^{\circ}\text{C}$  ขณะที่การทำนายโดยใช้สมบัติทางความร้อนที่ได้จากการทดลองมีค่าเป็น  $4.21^{\circ}\text{C}$



รูป 4.16 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการวัด (mea) ได้จากแบบจำลอง (sim) และได้จากแบบจำลองที่ใช้สมบัติทางความร้อนซึ่งคำนวณจากองค์ประกอบทางเคมี (sim-chem)

ณ ตำแหน่งเนื้อติดเมล็ด ( $m = 1$ ) ของมะม่วง (เส้นผ่าศูนย์กลาง  $0.05642$  m)

ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ( $48.4 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ )

ตาราง 4.14 เปรียบเทียบค่า Root Mean Square Error ของอุณหภูมิมะม่วงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ( $48.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ) โดยใช้สมบัติทางความร้อนของมะม่วงจากวิธีที่ต่างกัน

สมบัติทางความร้อน	RMSE ( $^{\circ}\text{C}$ )	
	( $m = 3$ )	เนื้อคิมเมิ้ลด์ ( $m = 1$ )
จากวิธีการวัดโดยตรง	4.21	1.99
สมการความสัมพันธ์	3.85	1.05

จากการทดลองพบว่าแบบจำลองอุณหภูมิที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่วัดได้จริง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการนำหลักการถ่ายเทความร้อนร่วมกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในผลมะม่วงได้

ในกรณีที่ไม่สามารถวัดสมบัติทางความร้อนได้โดยตรง สามารถคำนวณค่าสมบัติทางความร้อนจากองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้น ซึ่งการหาปริมาณความชื้นนั้นสามารถทำได้ง่ายและสะดวก นอกจากนี้ยังพบว่าแบบจำลองที่ได้โดยใช้สมบัติทางความร้อนที่คำนวณจากปริมาณความชื้นนั้นมีความแม่นยำมากกว่าแบบจำลองที่ได้โดยใช้สมบัติทางความร้อนจากการวัดโดยตรง