

จลนพลศาสตร์การอบแห้งมะม่วงด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกล



ชญานิศ รัตนมงคล

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2561

จลนพลศาสตร์การอบแห้งมะม่วงด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกล



ชญานิศ รัตนมงคล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

จลนพลศาสตร์การอบแห้งมะม่วงด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกล

ชญาณิช รัตนมงคล

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวัฒน์ นิตศน์วิจิตร)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หยาดฝน ทนงการกิจ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

ประธานอาจารย์ประจำหลักสูตร

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.เกอริยศักดิ์ เม่งอำพัน)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

ชื่อเรื่อง	จลนพลศาสตร์การอบแห้งมะม่วงด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกล
ชื่อผู้เขียน	นางสาวชญาณีศ รัตนมงคล
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งมะม่วงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด โดยทำการศึกษาภายใต้เงื่อนไขความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 kPa และอุณหภูมิ 50, 60 และ 70 °C จากการศึกษาพบว่า การอบแห้งมะม่วงที่สภาวะสุญญากาศทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น เมื่อทำการลดความดันและเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้ง โดยที่สภาวะความดันสัมบูรณ์ 5 kPa และอุณหภูมิ 70 °C จะมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ  $3.03 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry mass}} \text{ h}$  หลังการอบแห้งผลิตภัณฑ์มีความแข็งและค่าวอเตอร์แอกติวิตี้เท่ากับ 4.98 N และ 0.278 ตามลำดับ ส่วนค่า  $L^*$  และ  $b^*$  เท่ากับ 68.71, 7.17 และ 49.13 ตามลำดับ ส่วนค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 38.44 kWh/kg นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งชั้นบางยังพบว่าแบบจำลอง Modified Page สามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งได้ดี โดยสามารถนำพารามิเตอร์ที่ได้ดังกล่าวไปศึกษาต่อถึงการขยายขนาดการผลิตเชิงการค้า ทั้งด้านการผลิตและการลงทุน จากการศึกษาการเปรียบเทียบการอบแห้งมะม่วงแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด แบบแช่เยือกแข็งและแบบอินฟราเรด พบว่า การอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดใช้ระยะเวลาที่น้อยที่สุด ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์อบแห้งแบบแช่เยือกแข็งมากที่สุด และประหยัดพลังงานมากที่สุด

<b>Title</b>	Drying Kinetics of Vacuum Far-Infrared Drying of Mango
<b>Author</b>	MissChayanit Rattanamongkol
<b>Degree</b>	Master of Engineering in Food Engineering
<b>Advisor Committee Chairperson</b>	Associate Professor Dr.Somkiat Jaturonglumert

## ABSTRACT

This research aimed to study the drying of mango cultivar “Nam dok mai” using vacuum-infrared technique. The experiments were carried out under the conditions: pressures in drying chamber (5, 10 and 15 kPa) and product temperature (50, 60 and 70 °C). The results showed, the drying rate under vacuum infrared could be increased by reducing pressure and increasing drying temperature. The optimum condition was conducted at 5 kPa of absolute pressures at 70 °C temperature which showed the average drying rate at  $3.03 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry mass}} \text{ h}$ . As for the quality after drying, the value of hardness and water activity were 4.98 N and 0.278 respectively, and the colors  $L^*$   $a^*$  and  $b^*$  value were 68.71, 7.17 and 49.13 respectively. The specific energy consumption was calculated at 38.44 kWh/kg. Furthermore, it was found that among thin layer mathematical models, the modified Page model gave the most comprehensive data that could described the drying characteristic of mango drying under vacuum-infrared technique. These parameters can be used as guidelines in order to move up from laboratory scale to commercial scale for production and investment. Moreover, the comparative study on the performance of vacuum-infrared drying, freeze drying and infrared drying were also observed. The results showed, the vacuum-infrared drying was better than that of other drying methods as well as using the minimum of drying time and being most suitable for energy saving.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นผลงานที่ผู้วิจัยได้ทุ่มเทความตั้งใจ สติปัญญา กำลังกายและกำลังใจ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์ คำแนะนำและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาสละเวลาอันมีค่า ให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษาในการวางแผนการดำเนินงานทดลองตลอดจนช่วยสนับสนุนวัสดุ อุปกรณ์สำหรับใช้ในการดำเนินงานจนกระทั่งงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีจึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีสุวรรณ นฤนาทวงศ์สกุล ประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำในการแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวิวัฒน์ นิตศน์วิจิตร และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หยาดฝน ทนงการกิจ กรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำ ตลอดจนช่วยตรวจสอบแก้ไขจนสำเร็จเป็นวิทยานิพนธ์อย่างสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ คุณตาประสงค์ ใจอ้าย คุณพ่ออมร รัตน์มงคล และคุณแม่อมรรัตน์ รัตน์มงคล ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษา เป็นกำลังใจที่ดี ให้การสนับสนุน และให้คำปรึกษาทั้งในด้านการเรียนและการดำเนินชีวิต จนทำให้ผู้จัดทำโครงการประสบความสำเร็จในการเรียน

ชญาณิช รัตน์มงคล

มีนาคม 2561

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ .....	ค
ABSTRACT .....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ .....	ญ
สารบัญภาพผนวก .....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย .....	3
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร .....	4
2.1 ความรู้เกี่ยวกับมะม่วง.....	4
2.2 การอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด .....	6
2.3 รังสีอินฟราเรด .....	7
2.3.1 กลไกการแผ่รังสีอินฟราเรด .....	8
2.3.2 ฮีตเตอร์อินฟราเรด .....	8
2.3.3 การประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดในอุตสาหกรรม .....	9
2.4 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง .....	10
2.4.1 กราฟการอบแห้ง (Drying curve).....	10
2.4.2 กราฟอัตราการอบแห้ง (Drying rate curve).....	11



2.4.3 อัตราเร็วของการทำแห้งอาหาร (นิธิยา และพิมพ์เพ็ญ, 2552).....	12
2.5 สมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง .....	13
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง .....	22
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	22
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	23
3.2.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ .....	23
3.2.2 การศึกษาระบบการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกล .....	24
3.3.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด .....	25
3.3.4 การตรวจสอบคุณภาพ.....	26
3.3.5 การหาอัตราการอบแห้ง.....	27
3.3.6 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ.....	28
3.3.7 การเปรียบเทียบรูปแบบการอบแห้ง .....	28
3.3.8 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งมะม่วงแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด .....	29
3.3.9 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient, $D_{eff}$ ) .....	30
3.3 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย .....	31
3.4 สถานที่ดำเนินการวิจัย .....	32
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ .....	33
4.1 คุณสมบัติเริ่มต้นของมะม่วง .....	33
4.1.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้ง .....	34
4.2 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง .....	34
4.3 คุณภาพผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง .....	40



4.4 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ.....	43
ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ.....	43
4.5 การเปรียบเทียบรูปแบบการอบแห้งชนิดต่างๆ .....	44
4.5.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง.....	44
4.5.2 คุณภาพผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง.....	46
4.5.3 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ .....	49
4.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งมะม่วงแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด.....	49
4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล .....	54
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ .....	57
5.1 สรุปผลการศึกษา .....	57
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	57
บรรณานุกรม.....	58
ภาคผนวก.....	62
ภาคผนวก ก ภาพถ่ายชุดทดสอบการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง .....	63
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ผลทางสถิติ .....	69
ภาคผนวก ค เอกสารเผยแพร่งานวิจัย.....	78
ประวัติผู้วิจัย.....	88

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1	แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอบแห้ง ..... 14
2	สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 19
3	คุณภาพหลังการอบแห้งมะม่วงแบบอินฟราเรด (IRD) ..... 29
4	ผลการทดสอบหาคุณสมบัติเบื้องต้นของมะม่วง ..... 33
5	สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งในท้องตลาด ..... 34
6	ตารางบันทึกผลการทดลองของการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด ..... 40
7	ตารางบันทึกผลการทดลองการตรวจสอบคุณภาพ ..... 42
8	ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งมะม่วงด้วยสุญญากาศ ร่วมกับอินฟราเรด ..... 44
9	เปรียบเทียบจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ..... 45
10	เปรียบเทียบคุณภาพระหว่างการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด (VID) การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FD) และการอบแห้งแบบลมร้อน (IRD) ..... 48
11	เปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ..... 49
12	การวิเคราะห์ความแม่นยำทางสถิติของแบบจำลองต่าง ๆ ..... 50
13	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ..... 55
14	ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ..... 55

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ผลมะม่วงหลังการเก็บเกี่ยวและบรรจุกล่อง .....	2
2 มะม่วงน้ำดอกไม้.....	5
3 แผนภูมิสถานะ (Phase diagram) ของน้ำบริสุทธิ์ .....	6
4 สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า.....	8
5 ฮีตเตอร์อินฟราเรด.....	9
6 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง (ข) ความชื้นกับอัตราการอบแห้ง. 10	
7 ชิ้นมะม่วงน้ำดอกไม้ขนาด 30x30x10 mm.....	23
8 แผนภูมิชุดทดสอบการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกล .....	25
9 ผลมะม่วงสุกพันธุ์น้ำดอกไม้ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นทดสอบ.....	33
10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ (a) ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa.....	35
11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ (a) อุณหภูมิ 50 °C .....	36
12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับปริมาณความชื้นที่ (a) ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa ....	38
13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับปริมาณความชื้นที่ (a) อุณหภูมิ 50 °C.....	39
14 ผลผลิตกัณฑ์มะม่วงอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C.....	41
15 ผลผลิตกัณฑ์มะม่วงอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C.....	41
16 ผลผลิตกัณฑ์มะม่วงอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C.....	42
17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง .....	45
18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้ง (VID) .....	45
19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้ง (FD) .....	46
20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้ง (IRD) .....	46
21 ตัวอย่างผลผลิตกัณฑ์มะม่วงอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด.....	47
22 ตัวอย่างผลผลิตกัณฑ์มะม่วงอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง.....	47

ภาพที่	หน้า
23 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งแบบอินฟราเรด .....	48
24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลอง เทียบกับแบบจำลอง Newton.....	51
25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลอง เทียบกับแบบจำลอง Page .....	51
26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลอง เทียบกับแบบจำลอง Modified Page .....	51
27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลอง เทียบกับแบบจำลอง Henderson and Pabis .....	52
28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลอง เทียบกับแบบจำลอง Logarithmic.....	52
29 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลอง เทียบกับแบบจำลอง Wang-Singh .....	52
30 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลอง เทียบกับแบบจำลอง Two term .....	53
31 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลอง เทียบกับแบบจำลอง Verma et al.....	53
32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลอง เทียบกับแบบจำลอง Modified Henderson and Pabis.....	53
33 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลอง เทียบกับแบบจำลอง Midili et al.....	54
34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล .....	56

## สารบัญภาพผนวก

ภาพผนวกที่	หน้า
1 ชุดทดสอบการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด .....	64
2 ปุ่มสุญญากาศ .....	64
3 เครื่อง Hand refractometer.....	65
4 เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ .....	65
5 เครื่องวัดค่าสี .....	65
6 เครื่อง Texture analyzer .....	66
7 เครื่อง Infrared moisture determination balance .....	66
8 มะม่วงสุกพันธุ์น้ำดอกไม้ที่ใช้อบแห้ง .....	67
9 ขั้นตอนทดสอบก่อนการอบแห้ง .....	67
10 ขั้นตอนทดสอบหลังทำการอบแห้ง.....	68
11 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง .....	68
12 การป้อนข้อมูลวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน.....	70
13 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนทางสถิติ .....	70
14 หน้าต่างการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ .....	71
15 การเลือกวิธีการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนทางสถิติ.....	71
16 ผลการวิเคราะห์ค่า Drying time, $D_t$ .....	72
17 ผลการวิเคราะห์ค่า Drying rate, $D_r$ .....	72
18 ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็ง (Hardness, H).....	73
19 ผลการวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ (Water activity, $a_w$ ).....	73
20 ผลการวิเคราะห์ค่า $L^*$ .....	74
21 ผลการวิเคราะห์ค่า $a^*$ .....	74

ภาพผนวกที่	หน้า
22 ผลการวิเคราะห์ค่า $b^*$ .....	74
23 ผลการวิเคราะห์ค่า $\Delta E$ .....	75
24 ผลการวิเคราะห์ค่า SEC .....	75
25 การป้อนข้อมูล .....	76
26 การเลือกวิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น .....	76
27 การป้อนสมการในการวิเคราะห์และค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ $k$ .....	77
28 ผลการวิเคราะห์ค่า $k$ .....	77





## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

มะม่วง (*Mangifera indica* L.) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งของประเทศไทย โดยมีศักยภาพการส่งออกสูงและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี ตลาดส่งออกผลมะม่วงสดที่สำคัญของไทย ได้แก่ จีน เกาหลีใต้ เวียดนาม และญี่ปุ่น ตลาดส่งออกมะม่วงอบแห้งที่สำคัญ ได้แก่ สหรัฐอเมริกา ฮองกง และสหราชอาณาจักร ขณะที่มะม่วงแช่แข็งตลาดส่งออกที่สำคัญ ได้แก่ ญี่ปุ่น เกาหลีใต้ และเนเธอร์แลนด์ แม้มะม่วงไทยจะมีจุดเด่น แต่ปัจจุบันคู่แข่งสำคัญคือ ฟิลิปปินส์ และอินเดีย ทำให้ไทยต้องเร่งศักยภาพการผลิตมากขึ้น เช่น การผลิตนอกฤดู การพัฒนามาตรฐานสินค้า เพื่อให้สอดคล้องกับตลาดส่งออกมากยิ่งขึ้น สำหรับการส่งออก ในประเทศไทยจะมีการปลูกมะม่วงอย่างแพร่หลายทั่วภูมิภาค แต่พบว่า การส่งออกมะม่วงไปต่างประเทศนั้นมีเพียง 1.7% เท่านั้น ส่วน 98% เป็นการบริโภคในประเทศ สถานการณ์การผลิตและการตลาดมะม่วงไทย ข้อมูลจากศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร โดยความร่วมมือกับกรมส่งเสริมการเกษตร ระบุว่า ในปี พ.ศ. 2557 มีพื้นที่ปลูกมะม่วงทั่วประเทศ 2,131,590 ไร่ ผลผลิต 3,308,230 ตัน พบว่ามูลค่าส่งออกมะม่วงในตลาดโลก 170,460.64 ล้านบาท ไทยได้มีส่วนแบ่งทางการตลาดอยู่อันดับที่ 9 โดยประเทศที่มีการส่งออกมากที่สุดคือ เม็กซิโก 22.64% รองลงมาคือ อินเดีย 20.25% บราซิล 13.18% ปากีสถาน 6.94% เนเธอร์แลนด์ 6.42%เปรู 5.71% เอกวาดอร์ 4.31% ฟิลิปปินส์ 3.61% และจีน 1.31% ส่วนไทยมีส่วนแบ่งทางการตลาดเพียง 1.55% เท่านั้น ซึ่งถือว่าเรายังสามารถขยายตลาดสู่ต่างประเทศได้อีกมาก อย่างไรก็ตามมูลค่าการส่งออกของมะม่วงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี โดยในปี 2557 มีมูลค่าเฉลี่ยประมาณ 3,000 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558) ส่วนในปี 2558 ส่งออกมากถึง 6 หมื่น 5 พันตัน คิดเป็นมูลค่า 3,149 ล้านบาท รูปแบบที่ส่งออกมากที่สุดคือ มะม่วงอบแห้ง รองลงมาเป็น มะม่วงสดหรือมะม่วงแช่แข็ง และมะม่วงบรรจุภาชนะที่อากาศผ่านเข้าไม่ได้ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558) ดังนั้นเมื่อประมวลข้อมูลดังกล่าวแล้วจะเห็นได้ว่า ประเทศไทยยังสามารถพัฒนาการส่งออกมะม่วงให้สามารถแข่งขันกับตลาดโลกให้ดีกว่านี้ ทั้งในแง่ต้นทุน เทคนิค และคุณภาพของมะม่วงที่ทำการส่งออกดังแสดงในภาพที่ 1 (กลุ่มสื่อส่งเสริมการเกษตร, 2544)





ภาพที่ 1 ผลมะม่วงหลังการเก็บเกี่ยวและบรรจุกล่อง

ที่มา: (ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว, ม.ป.ป.)

การอบแห้งเป็นวิธีหนึ่งในการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ซึ่งน้ำหรือองค์ประกอบความชื้นจะถูกกำจัดออกจากผลิตภัณฑ์ทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งขึ้น จนกระทั่งจุลินทรีย์ไม่สามารถนำน้ำหรือองค์ประกอบความชื้นที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์อาหารมาใช้ในการดำเนินกิจกรรมหรือการเจริญเติบโตได้ (รวมพร, 2549) การอบแห้งทั่วไปประกอบด้วย การอบแห้งโดยการตากแดด, การอบแห้งโดยใช้ลมร้อน, การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง, การทำแห้งแบบโฟมแมท, การอบแห้งแบบพ่นฝอย และวิธีการอบแห้งหนึ่งที่น่าสนใจคือ การอบแห้งแบบสุญญากาศ หลักการทั่วไปของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศเป็นการระเหยน้ำออกจากวัตถุดิบภายใต้สุญญากาศและต่ำกว่าความดันบรรยากาศ เพื่อให้น้ำระเหยได้เร็วขึ้นแม้จะใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก อาหารที่นิยมใช้วิธีการอบประเภทนี้มักเป็นอาหารที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายเมื่อใช้อุณหภูมิสูง (Heat sensitive food) เช่น ผักหรือผลไม้ที่มีกลิ่นหอม ทั้งนี้เพื่อป้องกันการสลายตัวของวิตามินบางชนิดที่ไม่ทนต่อความร้อน การสูญเสียกลิ่นรสเนื่องจากการสูญเสียสารระเหยง่ายทั้งหลาย นอกจากนี้ข้อดีของการอบแห้งด้วยระบบสุญญากาศเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนคือ ใช้พลังงานในการดำเนินงานน้อยกว่าเมื่อคิดรวมกันระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับเชื้อเพลิงการอบแห้งแบบสุญญากาศมีอัตราการอบแห้งสูงที่อุณหภูมิต่ำ (ใช้ได้กับวัสดุที่เสื่อมคุณภาพง่ายเมื่อโดนความร้อนและการอบแห้งวัสดุที่ต้องการคุณภาพที่ดี) และห้องอบแห้งมีความสะอาดง่ายต่อการชำระล้างทำให้ไม่มีกลิ่นเหม็นตกค้าง การนำรังสีอินฟราเรดมาเป็นแหล่งผลิตความร้อนให้กับเครื่องอบแห้งกำลังเป็นที่นิยม เนื่องจากรังสีอินฟราเรดสามารถแผ่ทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุเกิดความร้อน ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิในเนื้อวัสดุสูงขึ้น ส่งผลให้ผิวภายนอกของวัสดุอบแห้งไม่เหี่ยวแห้ง และยังคงสมบัติของผลิตภัณฑ์ไว้ใกล้เคียงกับวัตถุดิบที่นำมาอบแห้ง (Boudhrioua et al., 2009; Glouannec et al., 2002) นอกจากนี้ รังสีอินฟราเรดสามารถให้ความร้อนได้อย่างรวดเร็ว และกระจายความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอ ติดตั้งง่าย ช่วยในการประหยัดพลังงานและลดระยะเวลาในการอบแห้ง (Chua and Chou, 2003; Vogt, 2007) จากข้อได้เปรียบดังกล่าว จึงมีแนวคิดที่จะนำรังสีอินฟราเรดมาเป็นแหล่งให้ความร้อนในการอบแห้งร่วมกับสุญญากาศ (ศักดิ์ชัย, 2553)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดของมะม่วงน้ำดอกไม้
2. เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดของมะม่วงน้ำดอกไม้

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดของขึ้นมะม่วง
2. ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดของขึ้นมะม่วง

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ที่ใช้ในการศึกษาจะต้องมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดอยู่ในช่วง 16.0-20.0 °Brix (Harnkarnsujarit and Sangsri, 2011)
2. ทำการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดของขึ้นมะม่วง ด้วยเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด เท่านั้น

## บทที่ 2

### ตรวจเอกสาร

#### 2.1 ความรู้เกี่ยวกับมะม่วง

มะม่วง มีถิ่นกำเนิดอยู่ในเขตประเทศพม่าและอินเดีย และแพร่กระจายไปยังประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (บุญเลิศ, 2532) มะม่วงเป็นผลไม้เมืองร้อนที่ทนแล้งได้ปานกลางต้องการสภาพอากาศที่มีความชุ่มชื้นและแห้งแล้งสลับกันไป มะม่วงเจริญได้ดีที่อุณหภูมิระหว่าง 24 – 27 °C สามารถปรับตัวเข้ากับสภาพดินปลูกในช่วงกว้าง ทั้งในดินร่วนที่มีความอุดมสมบูรณ์ไปจนถึงดินที่มีแต่ทราย ดินลูกรัง ดินตามเนินเขา และดินที่ขาดความอุดมสมบูรณ์อื่นๆ แต่ดินที่ปลูกมะม่วงได้ผลดีที่สุดควรเป็นดินร่วนที่หน้าดินลึก ซึ่งสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยมีความเหมาะสมสำหรับปลูกมะม่วงเป็นอย่างมาก (เกศิณี, 2530; วิจิตร, 2529)

#### มะม่วงน้ำดอกไม้ (Nam dok mai)

ชื่อวงศ์ Anacardiaceae

ชื่อวิทยาศาสตร์ *Mangifera indica* Linn.

ชื่อสามัญ Mango (Nam Dok Mai)

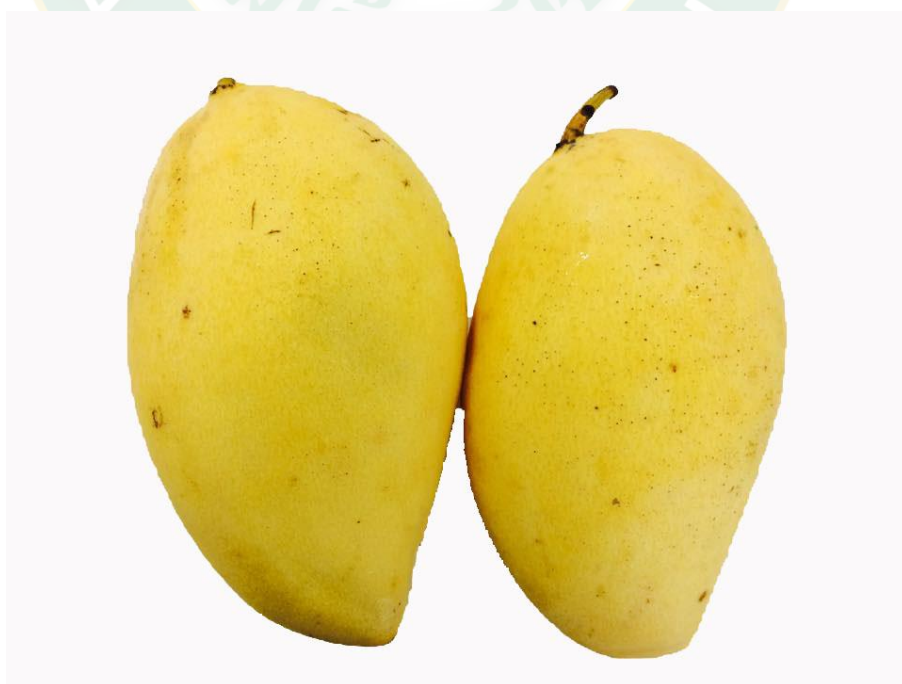
ชื่อท้องถิ่น มะม่วงน้ำดอกไม้

มะม่วงน้ำดอกไม้ เป็นไม้ยืนต้นไม่ผลัดใบขนาดกลาง มีอายุประมาณ 15-20 ปี ลำต้นสูงประมาณ 10-15 เมตร ลำต้นแตกกิ่งน้อย แลดูเป็นทรงพุ่มโปร่ง เปลือกลำต้นสีน้ำตาลอมเทา ออกใบเป็นใบเดี่ยว เรียงสลับกันบนกิ่งแขนง ใบมีรูปหอก โคนใบสอบแหลม ปลายใบแหลม ขอบใบโค้งเป็นลูกคลื่น แผ่นใบมีขนาดใหญ่ สีเขียวเข้ม และเป็นมัน ออกดอกเป็นช่อแขนงที่ปลายกิ่ง บนช่อแขนงมีดอกย่อยจำนวนมาก แต่ละดอกย่อยมีกลีบเลี้ยง 5 กลีบ และกลีบดอก 5 กลีบ ทั้งนี้ ดอกมะม่วงน้ำดอกไม้ มีทั้งดอกกระเทย และดอกสมบูรณ์เพศ ที่มีเกสรตัวผู้ และเกสรตัวเมียในดอกเดียวกัน ผลมะม่วงน้ำดอกไม้ มีลักษณะอ้วนจนถึงเกือบกลม ผลด้านซ้ายผลมีขนาดใหญ่ และเล็กลงที่ท้ายผล ขนาดผลกว้างประมาณ 6.5-7.5 เซนติเมตร ยาวประมาณ 12-15 เซนติเมตร มีน้ำหนักต่อผลประมาณ 250-400 กรัม หรือมากกว่า ผลอ่อนมีสีเขียวนวล ผลสุกมีสีเหลืองครีมหรือเหลืองทอง เปลือกค่อนข้างบาง จึงง่าย ส่วนเนื้อผลมีสีเหลืองอมครีม เนื้อละเอียด มีรสหวาน และมีกลิ่นหอม ส่วนเมล็ดมีขนาดเล็กและแบนลีบ ไม่มีเส้นใย ([www.puechkaset.com](http://www.puechkaset.com), ม.ป.ป.)

มะม่วงน้ำดอกไม้ เป็นมะม่วงท้องถิ่นในไทย ปัจจุบันพบปลูกในทุกภาค และมีการปลูกเพื่อการค้ามากในภาคกลาง ภาคเหนือ ภาคอีสาน ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก เป็นมะม่วงที่นิยมรับประทานสุก ทั้งในประเทศและนอกประเทศ โดยเฉพาะประเทศญี่ปุ่น เนื่องจากผลสุกมีสีเหลืองทองสวยงาม เนื้อมีสีเหลืองอมครีม เนื้อแน่นปานกลาง มีความนุ่มและรสหวาน นิยมรับประทานเป็นผลไม้สุกหรือใช้ทำขนมหวาน อาทิ ข้าวเหนียวมะม่วง ไอศกรีม และแยม เป็นต้น (www.puechkaset.com, ม.ป.ป.)

พันธุ์ของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่นิยม

1. น้ำดอกไม้สีทอง เป็นมะม่วงที่กลายพันธุ์มาจากมะม่วงน้ำดอกไม้พระประแดง ผลดิบมีสีเขียวนวล เนื้อผลมีสีขาว มีรสเปรี้ยวจัด ผลแก่ที่อยู่บนต้นมีสีเหลืองอมครีม คล้ายกับมะม่วงสุก ผลเมื่อสุกจัดจะมีสีเหลืองอมส้มหรือสีเหลืองทอง ดังภาพที่ 2 เนื้อละเอียด และมีเสี้ยนเล็กน้อย น้ำหนักต่อผลประมาณ 300-400 กรัม ถือเป็นพันธุ์ที่มีเปลือกหนาขึ้น หนากว่ามะม่วงน้ำดอกไม้เบอร์ 4 และมีความหวานมากกว่า นอกจากนั้น ทนโรค และแมลงได้ดี รวมถึงตอบสนองต่อการบังคับให้ติดผลนอกฤดูได้ดี
2. น้ำดอกไม้เบอร์ 4 ผลดิบมีสีเขียวนวล เนื้อมีสีขาวแน่น และหนา มีรสเปรี้ยวจัด ผลสุกมีสีเหลืองเข้มหรือเหลืองทอง เปลือกผลบาง เนื้อผลละเอียด ไม่มีเสี้ยน มีกลิ่นหอม ไม่มีเสี้ยน น้ำหนักผล 280-300 กรัม ความหวานประมาณ 19 °Brix (ศรีนทร, 2558)

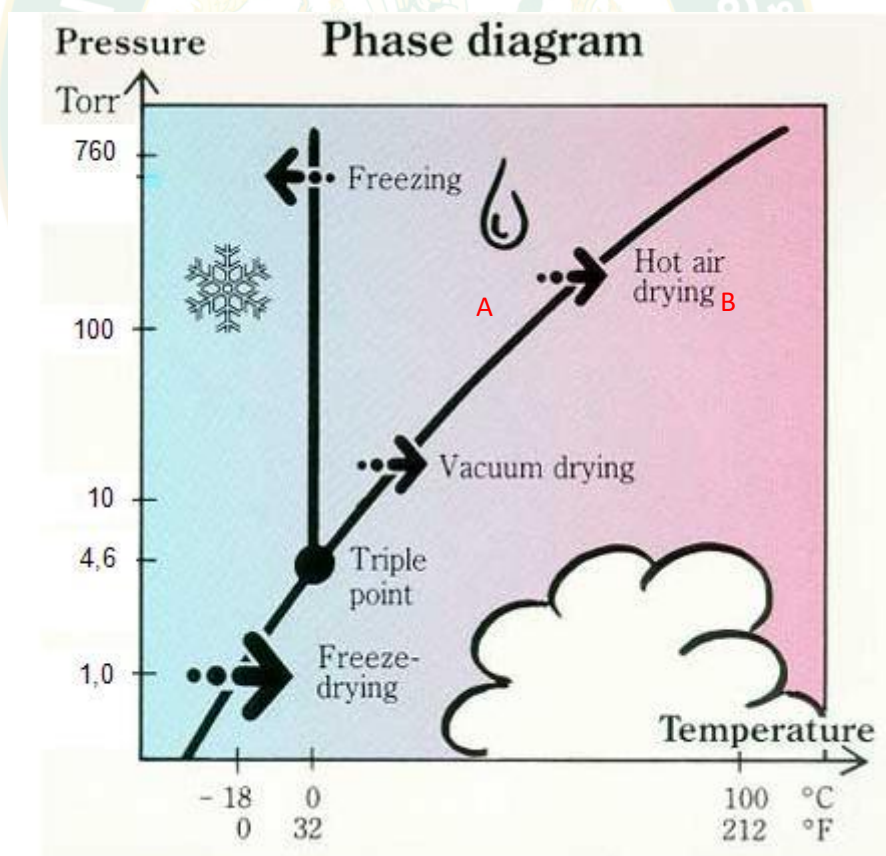


ภาพที่ 2 มะม่วงน้ำดอกไม้



## 2.2 การอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

หลักการพื้นฐานของการอบแห้งชนิดต่าง ๆ สามารถอธิบายได้จากแผนภูมิสถานะ (Phase diagram) ของน้ำบริสุทธิ์ ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยจุด A ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศปกติ (30 °C และ 105 Pa) น้ำอยู่ในสถานะของเหลว การทำแห้งโดยทั่วไป (Conventional drying) จะใช้พลังงานความร้อนกับผลิตภัณฑ์ จนถึงระดับความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (Latent heat of evaporation) น้ำภายในผลิตภัณฑ์ระเหยเปลี่ยนสถานะเป็นไอที่จุด B แต่ในการทำแห้งแบบสุญญากาศ เครื่องอบที่ใช้ในการทำแห้งอาหาร ที่ทำงานภายใต้ภาวะที่ความดันอากาศต่ำกว่าความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure) สุญญากาศตาม Phase diagram ทำให้น้ำระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำลง การทำให้เกิดสุญญากาศในห้องอบนี้จะใช้ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) เพื่อสูบน้ำออกจากห้อง ซึ่งการทำแห้งด้วยเครื่องอบสุญญากาศ จะช่วยรักษาคุณภาพของอาหารได้ดีกว่าการทำแห้งที่ความดันบรรยากาศ



ภาพที่ 3 แผนภูมิสถานะ (Phase diagram) ของน้ำบริสุทธิ์

ที่มา: (นิธิยา และพิมพ์เพ็ญ, ม.ป.ป.)

เทคนิคการอบแห้ง (Drying technique) เป็นวิธีการกำจัดน้ำ (Dehydration) วิธีหนึ่ง น้ำหรือองค์ประกอบความชื้น (Moisture content) จะถูกกำจัดออกจากผลิตภัณฑ์ทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งขึ้น จนกระทั่งจุลินทรีย์ไม่สามารถนำน้ำหรือองค์ประกอบความชื้นที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์อาหารมาใช้ในการดำเนินกิจกรรมหรือการเจริญเติบโตได้เทคนิคการอบแห้งมีทั้งแบบง่าย ๆ ไม่ซับซ้อน เช่น การตากแดด (Solar drying) อาศัยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์แผ่รังสีไปยังผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการอบแห้ง การใช้ลมร้อน (Hot air drying) เทคนิคนี้อาศัยอากาศที่ถูกทำให้ร้อนถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนไปสู่ผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการอบแห้ง ตัวอย่างเครื่องอบแห้งประเภทนี้เช่น เครื่องอบแห้งแบบถาด (Tray dryer) เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed dryer) เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลมร้อน (Tunnel dryer) เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการพัฒนาขึ้นมา และวิธีการอบแห้งหนึ่งที่น่าสนใจคือ การอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum drying) เป็นการอบแห้งที่อาศัยหลักการลดความดันอากาศ เพื่อลดจุดเดือดของน้ำทำให้น้ำระเหยกลายเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 °C น้ำจะระเหยได้เร็วขึ้นแม้จะใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก (ณัญญา, 2545) การลดลงของจุดเดือดของน้ำแปรผกผันกับระดับความเป็นสุญญากาศ การอบแห้งอาหารด้วยเทคนิคนี้เหมาะกับอาหารที่ไวต่อความร้อนหรืออาหารที่ต้องการคงคุณค่าทางโภชนาการให้ใกล้เคียงหรือเท่ากับอาหารสด

หลักการแห้งของการทำแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด คือการทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นลดลง โดยการแผ่รังสีของอินฟราเรดสามารถแผ่ทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุทำให้โมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุเกิดความร้อน ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิในเนื้อวัสดุสูงขึ้น ทำให้น้ำระเหยออกไปจากวัสดุได้ไวมากยิ่งขึ้น

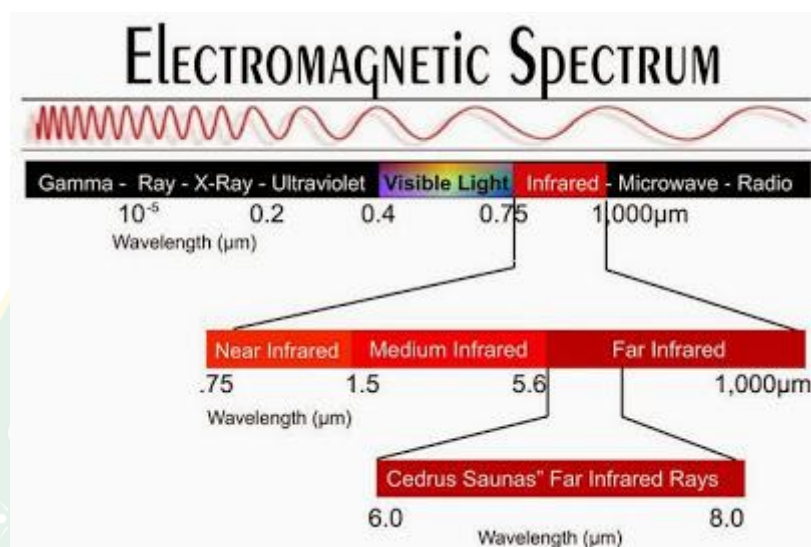
### 2.3 รังสีอินฟราเรด

การแผ่รังสี (Radiation) คือพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกจาก สสาร (Matter) ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) หรือโฟตอน (Photon) เนื่องมาจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมหรือโมเลกุล เป็นการถ่ายเทพลังงานโดยไม่ต้องอาศัยสารตัวกลาง ซึ่งมีความเร็วสูงสุดเท่ากับความเร็วแสงและเกิดได้ในสุญญากาศ การถ่ายเทพลังงานความร้อนนั้นเกิดจากรังสีที่ปลดปล่อยจากวัตถุต่าง ๆ เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของตัวมันเองและอุณหภูมิที่ล้อมรอบรังสีอินฟราเรด (Infrared radiation, IR) เป็นพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (วัชรินทร์, 2014) สามารถแยกตามความยาวของคลื่นได้ 3 ระดับ คือ

1. รังสีอินฟราเรดใกล้ (Near infrared radiation, NIR) มีความยาวคลื่นประมาณ 0.7-1.5 ไมโครเมตร มักประยุกต์ใช้ในงานภาพถ่ายความร้อน

2. รังสีอินฟราเรดกลาง (Middle infrared radiation, MIR) มีความยาวคลื่นประมาณ 1.5-5.6 ไมโครเมตร มักประยุกต์ใช้ในระบบนำวิถีของจรวด Missile

3. รังสีอินฟราเรดไกล (Far infrared radiation, FIR) มีความยาวคลื่นประมาณ 5.6 ไมโครเมตรขึ้นไป รังสีประเภทนี้จะมีพลังงานความร้อนไม่มากนักจึงมักประยุกต์ใช้ในงานทางการแพทย์และเทคโนโลยีการอบแห้ง



ภาพที่ 4 สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา: (FLIR THAILAND, 2013)

### 2.3.1 กลไกการแผ่รังสีอินฟราเรด

การทำงานของรังสีอินฟราเรดที่แผ่มายังวัสดุนั้นเป็นการอบแห้งที่พื้นผิว (Surface drying) พื้นผิวของวัตถุจะรับรังสีและสะสมพลังงานความร้อนและทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุ รวมถึงส่งผ่านพลังงานความร้อนส่วนหนึ่งเข้าไปด้านในของวัสดุเองด้วยการนำความร้อนผ่านเนื้อวัสดุ (Conduction) นอกจากนี้รังสีอินฟราเรดส่วนหนึ่งจะทะลุผ่านเข้าไปด้านในด้วยทำให้วัสดุสะสมพลังงานความร้อนได้รวดเร็วขึ้น อย่างไรก็ตามพลังงานความร้อนจำนวนมากที่สะสมอยู่บริเวณผิวอาจทำให้พื้นผิวถูกทำลายจนไหม้เกรียมและสูญเสียคุณสมบัติที่ดีของวัสดุได้ในระหว่างการอบแห้ง (ณัฐวุฒิ และคณะ, 2554)

### 2.3.2 ฮีตเตอร์อินฟราเรด

ฮีตเตอร์อินฟราเรด (Infrared Heater) มีลักษณะการทำงานเป็นการส่งผ่านความร้อนแบบแผ่รังสี (เหมือนกับที่ดวงอาทิตย์ส่งความร้อนมายังโลก) จึงมีประสิทธิภาพสูง ความสูญเสียต่ำ



ประหยัดไฟได้ 30 – 50 % สามารถให้ความร้อนวัตถุได้ถึงเนื้อใน จึงทำให้ประหยัดเวลาได้ 1 – 10 เท่า (การให้ความร้อนแบบการพา และการนำความร้อนจะทำให้วัตถุร้อนเฉพาะที่ผิว แล้วค่อย ๆ ซึมเข้าไปเนื้อในจึงใช้เวลานาน) มีขนาดเล็กกว่าฮีตเตอร์แบบทั่ว ๆ ไป ทำให้ประหยัดเนื้อที่ในการติดตั้ง และการถอดเปลี่ยนเพื่อซ่อมบำรุงง่ายมีความปลอดภัยสูง เนื่องจากไม่มีเปลวไฟ ตัวเรือนมีความเป็นฉนวนสูง ไฟไม่รั่ว และให้รังสีช่วง 3 – 10 mm. ซึ่งเป็นช่วงที่วัสดุเกือบทุกชนิดสามารถดูดซับรังสีได้ดี



ภาพที่ 5 ฮีตเตอร์อินฟราเรด

ที่มา: (บริษัท สุพรีมไลน์ส์ จำกัด, ม.ป.ป.)

### 2.3.3 การประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดในอุตสาหกรรม

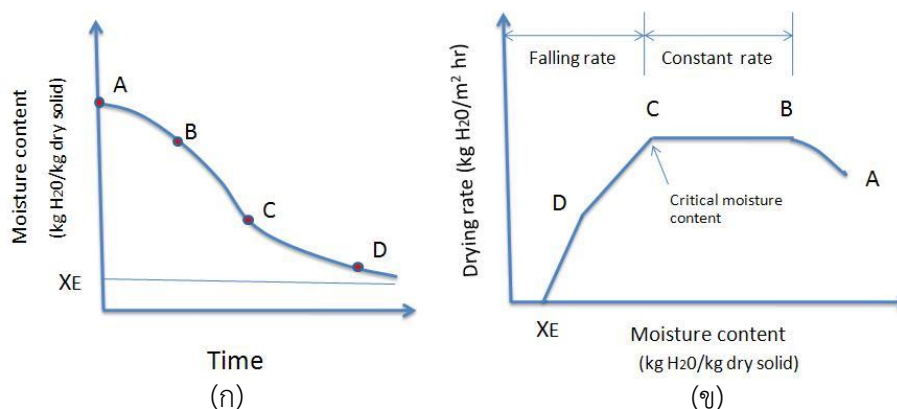
กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับอาหารนั้น มักจะใช้ตัวทำความร้อนจากการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นยาว (FIR) มากกว่า ตัวทำความร้อนจากรังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น (NIR) เพราะ อาหารจะดูดกลืนพลังงานที่แผ่รังสีได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงความคลื่นที่ยาวกว่า ตัวทำความร้อนที่อาศัยการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นยาว (FIR) มักจะทำด้วยลวดนิโครม (Nichrome) และหุ้มด้วยเซรามิกส์ (Ceramics) ขดลวดนิโครม มีอุณหภูมิระหว่าง 600-950 K ความยาวคลื่นของพลังงานที่แผ่รังสีสูงสุดระหว่าง 3-5  $\mu\text{m}$  ในขณะที่ตัวทำความร้อนที่อาศัยการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น (NIR) เช่น หลอดไฟฟ้าที่ทำด้วยขดลวด ทังสแตน (Tungsten) ขดลวดทังสแตนมีอุณหภูมิ ระหว่าง 2400-2500 K ความยาวคลื่นของพลังงานที่แผ่รังสีสูงสุดระหว่าง 1.1-1.3  $\mu\text{m}$  (Sasaori, 1988)

กระบวนการทางความร้อนในอุตสาหกรรมอาหารในนั้นเทคนิคการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นยาว มักจะถูกใช้ในรูปของตัวทำความร้อน ความยาวคลื่นระหว่าง 2.5-30  $\mu\text{m}$  ความร้อนจะให้กับอาหารโดยการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทางอากาศและถูกดูดกลืนโดยอาหาร คุณสมบัติเด่นของความร้อนจากรังสีอินฟราเรดได้แก่ถ่ายความร้อนสู่อาหารอย่างมีประสิทธิภาพจึงสามารถช่วยลด

เวลาของกระบวนการและค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน อากาศภายในอุปกรณ์ไม่ได้ถูกทำให้ร้อนและด้วยเหตุนี้อุณหภูมิอากาศโดยรอบจึงสามารถคงที่อยู่ในระดับปกติ มีความเป็นไปได้ที่จะออกแบบอุปกรณ์ให้มีขนาดกะทัดรัดและทำงานได้อย่างอัตโนมัติ ซึ่งสามารถควบคุมได้ง่ายและปลอดภัย สามารถควบคุมความร้อนได้โดยตรงตามที่ต้องการ (วัชรินทร์, 2014)

## 2.4 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

จลนพลศาสตร์การอบแห้ง (Drying kinetics) คือ การศึกษาอัตราการอบแห้ง จากข้อมูลการอบแห้ง โดยการพลอตกราฟการอบแห้ง (Drying curve) หรือกราฟอัตราการอบแห้ง (Drying rate curve) ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง (ข) ความชื้นกับอัตราการอบแห้ง  
ที่มา: (นิธิยา และพิมพ์เพ็ญ, 2552)

### 2.4.1 กราฟการอบแห้ง (Drying curve)

กราฟการอบแห้ง (Drying curve) คือกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับความชื้น ค่าความชื้น (Moisture content, MC) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเทียบกับมวลของวัสดุตามมาตรฐาน AOAC ความชื้นในวัสดุสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis,  $M_w$ ) และความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis,  $M_d$ ) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$M_w (\%) = \frac{(w - d)}{w} \times 100 \quad (1)$$

$$M_d (\%) = \frac{(w - d)}{d} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ  $M_w$  คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)

$M_d$  คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (% d.b.)

w คือ มวลเปียกของวัสดุ (kg)

d คือ มวลแห้งของวัสดุ (kg)

การวิเคราะห์การอบแห้งนอกจากค่าความชื้น (Moisture content, MC) ยังมีค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้น เมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินไปตลอดเวลาใด ๆ คือ อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) (อิลีหัยะ และคณะ, 2015) โดยอัตราส่วนความชื้นสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$MR = \frac{M_1 - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (3)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (-)

$M_1$  คือ ความชื้นฐานแห้งที่เวลาใดๆ (%d.b.)

$M_0$  คือ ความชื้นฐานแห้งที่เวลาเริ่มต้น (%d.b.)

$M_{eq}$  คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ (%d.b.)

การคำนวณอัตราส่วนความชื้นในงานวิจัยนี้ เป็นการคำนวณค่าโดยประมาณ คือ ไม่คิดค่าความชื้นสมดุล โดยการตั้งสมมติฐานว่า ความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น

#### 2.4.2 กราฟอัตราการอบแห้ง (Drying rate curve)

กราฟอัตราการอบแห้ง (Drying rate curve) คือ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับอัตราการอบแห้ง ทั้งนี้อัตราการอบแห้ง (Drying rate,  $D_r$ ) คือ มวลของเหลวที่ระเหยต่อพื้นที่ที่เกิดการระเหยต่อเวลา จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเครื่องอบแห้ง คุณสมบัติของวัสดุ และขนาดของวัสดุที่ต้องการอบแห้ง ซึ่งมีผลอย่างมากต่อการอบแห้ง โดยเฉพาะในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยสามารถคำนวณหาอัตราการอบแห้ง ( $D_r$ ) จากสมการ (4) (KAR and Gupta, 2003) เพื่อนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาที่ใช้

$$D_r = \frac{M_1 - M_0}{t} \quad (4)$$

เมื่อ	$D_r$	คือ อัตราการอบแห้ง ( $g_{H_2O}/g_{dry\ mass} \cdot h.$ )
	$M_0$	คือ ความชื้นเริ่มต้น (% d.b.)
	$M_1$	คือ ค่าความชื้นที่เวลาใดๆ (% d.b.)
	$t$	คือ เวลาในการอบแห้ง (h)

กราฟระหว่างอัตราการอบแห้ง (Drying rate) และความชื้นในสารนั้น (Moisture content) ดังภาพที่ 6 (ข) แบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

ช่วงที่ 1 คือ ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial adjustment period - AB) เป็นช่วงเริ่มต้นที่อาหารที่ใช้ในการอบแห้ง มีความชื้นเริ่มต้น (A) ของอาหารยังสูงอยู่ ผิวของอาหารจะมีลักษณะเปียกชื้นมาก เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางลมร้อนกับอาหาร ทำให้อุณหภูมิพื้นผิวอาหาร มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature) ของกระแสลมร้อนที่ใช้เป็นตัวกลาง อัตราการอบแห้งค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จนถึงช่วงอัตราอบแห้งคงที่ (Constant rate)

ช่วงที่ 2 คือ ช่วงอัตราอบแห้งคงที่ (Constant rate period - BC) เป็นช่วงที่น้ำภายในวัสดุเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้า พลังงานความร้อนที่วัสดุได้รับจะใช้ในการระเหยน้ำออกจากของวัสดุอย่างต่อเนื่อง ความชื้นเฉลี่ยของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในการอบแห้ง จุดสุดท้ายของช่วงการอบแห้งความเร็วคงที่ อัตราเร็วในการอบแห้งจะเริ่มลดลง ความชื้นของวัสดุ ณ เวลานี้ เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical moisture content)

ช่วงที่ 3 คือ ช่วงอัตราอบแห้งลดลง (Falling rate period CD และ DE) เป็นช่วงที่ความชื้นในอาหารเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารอย่างไม่ต่อเนื่อง ผิวหน้าของอาหารเริ่มแห้ง ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของอาหารสูงขึ้นเรื่อย ๆ อัตราการอบแห้งจะลดลงความชื้นจะลดลงเรื่อย ๆ จนถึงค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, XE) ซึ่งเป็นความชื้นที่ต่ำสุด ภายใต้สภาวะที่ใช้อุณหภูมิในขณะนั้น ที่ความชื้นนี้ อัตราการอบแห้งเป็นศูนย์ น้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก

#### 2.4.3 อัตราเร็วของการอบแห้งอาหาร (นิธิยา และพิมพ์เพ็ญ, 2552)

1. ลักษณะธรรมชาติของอาหาร อาหารที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีความพรุน (Porosity) มากจะมีอัตราการอบแห้งเร็วเนื่องจากน้ำในอาหารสามารถเคลื่อนจากภายในออกมาภายนอกได้ง่าย นอกจากนี้อาหารที่มีพื้นที่ผิวมากอัตราการอบแห้งสามารถเกิดได้เร็วเช่นกัน ทั้งนี้ก็เนื่องจากพื้นที่การระเหยของน้ำในวัสดุเพิ่มขึ้นของมันเอง

2. ขนาด รูปร่าง ปริมาตร และพื้นที่ผิวของอาหาร เป็นสมบัติทางกายภาพของอาหาร ที่มีผลต่อการทำแห้ง อาหารที่มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก จะมีพื้นที่ระเหยน้ำมาก จะมีอัตราการแห้งเร็วขึ้น ดังนั้นหากอาหารที่มีความหนามากอัตราการอบแห้งจะช้ากว่าอาหารที่มีความหนาน้อยกว่าเนื่องจากอัตราการแห้งจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของอาหาร

3. ปริมาณของอาหารที่นำมาอบแห้ง อาหารที่นำมาอบแห้งในปริมาณมากๆ จะมีอัตราการอบแห้งที่ช้าเนื่องจากอากาศร้อนไม่สามารถสัมผัสกับอาหารที่นำมาอบแห้งได้อย่างทั่วถึง จึงไม่สามารถถ่ายเทความร้อนให้กับอาหารได้ จึงทำให้อัตราการอบแห้งช้าลง

4. ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความชื้นจำเพาะ (Specific humidity) ของอากาศเป็นสิ่งสำคัญมาก การระเหยน้ำออกจะทำได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับความชื้นของอากาศและความเร็วลม

5. ความดัน เกี่ยวเนื่องกับการระเหยของน้ำ เนื่องจากในที่มีความดันต่ำๆ ลงมา น้ำจะเดือดได้ที่อุณหภูมิต่ำลง ดังนั้นการทำแห้งภายใต้ความดันจะทำให้อัตราการแห้งเร็วขึ้น

## 2.5 สมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง

แบบจำลองการอบแห้งเป็นการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งจะช่วยในการออกแบบระบบการอบแห้งต่างๆ จากการตรวจเอกสารรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งอาหารหรือวัสดุชีวภาพ พบว่าแบบจำลองการอบแห้งที่นิยมใช้ในการศึกษาอาหารหรือวัสดุชีวภาพจำพวกผักและผลไม้ ได้แก่ แบบจำลองในรูปของสมการเอมพิริคัล (Empirical Equation) (สกาเวเดียน, 2557; อนุสุรา และคณะ, 2555; อัมไพศักดิ์ และศักดิ์ชัย, 2553; Assawarachan, 2013; Nazmi et al, 2017) ซึ่งสามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดี แต่มีข้อจำกัดที่การนำไปใช้งานต้องอยู่ภายใต้สภาวะทดสอบที่ใช้สร้างสมการเท่านั้น โดยมีหลายสมการให้เลือกใช้จัดเป็นรูปสมการที่เหมาะสมได้ดังตารางที่ 1



**ตารางที่ 1** แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอบแห้ง

Model name	Model expression
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Modified Page	$MR = \exp((-kt)^n)$
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
Wang and Sing	$MR = 1 + at + bt^2$
Two Term	$MR = a \exp(-k_1t) + b \exp(-k_2t)$
Verma et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$
Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$
Midill et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$

**หมายเหตุ** เมื่อ a b c g h k<sub>1</sub> k<sub>2</sub> n คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับวัสดุ และ k คือ สัมประสิทธิ์การอบแห้ง (ชั่วโมง<sup>-1</sup>)

การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมของการอบแห้งมะม่วง สามารถทำได้โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใดๆ จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับสมการอบแห้งชั้นบางที่ใช้สำหรับทำนายค่าความชื้น ซึ่งอยู่ในรูปสมการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี (Semi-Theoretical Drying Equation) ซึ่งการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการอบแห้งชั้นบางใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression) มีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R<sup>2</sup>) ค่าไคสแควร์ (χ<sup>2</sup>) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) ดังสมการ (5) ถึง (7)

$$R^2 = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pred} - MR_{pre,i})^2} \right) \quad (5)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z} \quad (6)$$

$$RMSE = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right)^{1/2} \quad (7)$$

เมื่อ	$MR_{pre,i}$	คือ	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนาย
	$MR_{exp,i}$	คือ	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง
	$MR_{pred}$	คือ	อัตราส่วนความชื้นจากการประมาณ
	N	คือ	จำนวนข้อมูลจากการทดลอง
	Z	คือ	พารามิเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อนุสรนา นาคี และคณะ (2555) ศึกษาแนวทางการอบแห้งใบเตยเพื่อใช้ทำชาด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน โดยเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะพิจารณาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง คุณภาพของใบเตยหลังการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง การทดลองอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 45-65 °C กำลังรังสีอินฟราเรด 500 และ 1,000 W ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของใบเตยอยู่ในช่วง 400-600% มาตรฐานแห้ง และ 8-12% มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ จากผลการทดลอง พบว่าอัตราการอบแห้งจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้นขณะที่ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง การทำนายผลของจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 1,000 W ร่วมกับลมร้อนและการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว คือ แบบจำลอง Logarithmic ส่วนแบบจำลองที่ใช้ทำนายการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 500 W ร่วมกับลมร้อน คือ แบบจำลองของ Page โดยผลการทดลองที่ค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองดังกล่าว ในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ พบว่า การคืนตัวและค่าสีในระบบ CIE ( $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$ ) ของใบเตยอบแห้งในทุกกรณีไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p < 0.05$ )

อำไพศักดิ์ ทีบุญมา และศักดิ์ชัย จงจำ (2553) ได้ศึกษาการอบแห้งชิงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด และหาสมการการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งชิง โดยทำการทดลองอบแห้งภายใต้เงื่อนไขความดันสัมบูรณ์ 5 10 และ 15 kPa และอุณหภูมิอบแห้ง 40 50 และ 60 °C ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษาคืออัตราส่วนความชื้นอัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อลดความดันสัมบูรณ์หรือเพิ่มอุณหภูมิมอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง



นอกจากนี้ยังพบว่า สมการของ Modified Henderson and Pabis สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งซึ่งด้วยเทคนิคสูญญากาศร่วมกับอินฟราเรดได้ดีที่สุด โดยให้ค่า  $R^2$  มากที่สุด และ RMSE น้อยที่สุด

Guy et al. (2013) งานวิจัยนี้ศึกษาการสร้างแบบจำลองและการจำลองเชิงตัวเลขของอัตราการอบแห้งระหว่างกระบวนการอบแห้งของมะม่วงภายใต้สภาวะความร้อนที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้ได้ทำการอบแห้งชิ้นบาง โดยคำนวณสมการความร้อนและมวล ณ เวลาที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ทำให้แบบจำลองที่คาดการณ์จลนพลศาสตร์การอบแห้งของมะม่วงไว้ภายใต้ตัวแปรนั้น แบบจำลองการอบแห้งมะม่วงที่อุณหภูมิ (40° 50° 60°C) มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งมากขึ้นเมื่อเทียบกับการอบแห้งที่ 60°C คุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งจะได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้นเนื่องจากประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้ง

Isabel et al. (2016) ได้ทำการศึกษาการเก็บรักษาวิตามินซีและแคโรทีนอยด์ในมะม่วง "Tommy Atkins" ที่ทำแห้งด้วยวิธีออสโมซิส (Osmotic dehydration, OD) ที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง โดยใช้สารละลายซูโครส 45° Brix และไม่ใช้แคลเซียมคลอไรด์ 1% (w/w) หรือ 1% ascorbic acid ในอัตราส่วน 1:10 (w/w) และมะม่วงที่ถูกทำแห้งโดย OD จะถูกนำไปอบที่ 50 หรือ 70 °C การทำ OD เป็นการช่วยลดระยะเวลาการอบแห้งและป้องกันการเปลี่ยนแปลงสีของมะม่วงอบแห้ง การเปลี่ยนแปลงสีของมะม่วงอบแห้งหลังเติมแคลเซียมคลอไรด์จะช่วยเก็บรักษาวิตามินซีได้เฉลี่ย 44-57% การเติม ascorbic acid ในวิธีออสโมซิสนั้นช่วยเพิ่มการเก็บปริมาณวิตามินซี การเก็บรักษา all-trans- $\beta$  carotene มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญในตัวอย่างมะม่วงอบแห้งที่ 50°C แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงในมะม่วงอบแห้งที่มีการเติมแคลเซียมหรือวิตามินที่ 70°C นอกจากนี้ การทำแห้งด้วย OD ทั้งแบบเติมและไม่เติมสารปรุงแต่งลดอัตราส่วนของ 13-cis- $\beta$  carotene กับ all-trans- $\beta$  carotene ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการเติมแคลเซียมหรือวิตามินซีในสารละลายออสโมติกสามารถพิสูจน์ได้ว่าเก็บรักษาคคุณค่าทางโภชนาการของมะม่วงให้ดีขึ้นได้

Kamenan et al. (2009) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งของกล้วย มะม่วงและมันสำปะหลัง โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการการอบแห้งชิ้นบาง ซึ่งพารามิเตอร์การอบแห้งที่สำคัญคือความชื้นของผลิตภัณฑ์ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการประเมินค่าคงที่ของแบบจำลอง พบว่าสมการของ Henderson and Pabis เป็นสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอธิบายการอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการวิเคราะห์เพื่อให้ประสิทธิภาพในช่วงที่อัตราการอบแห้งลดลง

kaewdam et al. (2013) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งมะม่วงแบบแช่เยือกแข็ง โดยใช้มะม่วงสุกพันธุ์น้ำดอกไม้ แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40°C และหาสภาวะของการอบแห้งที่เหมาะสมเพื่อนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการ

อบแห้ง พบว่า สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งมะม่วงแบบแช่เยือกแข็งคือ การอบแห้งขั้นต้นตามลำดับคือ ที่อุณหภูมิ  $-40^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 10 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ  $-10^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมง การอบแห้งขั้นที่สอง อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยควบคุมความดันอยู่ที่ 20 Pa ตลอดการอบแห้ง หลังการอบแห้งผลิตภัณฑ์มีค่าความแข็ง 6.1834 N ค่าวอเตอร์แอกติวิตี 0.276 และค่าสี  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  เท่ากับ 79.86, 4.29 และ 53.62 ตามลำดับ ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 6.8 % และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 253.07 kWh/kg อัตราการอบแห้งเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ  $0.294 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{dry mass}}\text{-h}$  และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าอยู่ในช่วง  $5.54 \times 10^{-11}$  ถึง  $2.90 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งขั้นต้นบางพบว่า แบบจำลอง Modified Page สามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งได้ดีที่สุด โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.998 และค่า RMSE และ  $\chi^2$  มีค่าเท่ากับ 0.016215 และ 0.00026 ตามลำดับ

Mongpraneet et al. (2002) ได้ทำการวิจัยคุณลักษณะของการอบแห้งใบหอมหั่นด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลเอินของงานวิจัยคือความหนาใบหอมหั่น ความแรงของรังสีอินฟราเรดไกลและระยะห่างระหว่างใบหอมหั่นกับหลอดรังสีอินฟราเรดค่าชี้ผลของงานวิจัยนี้คืออัตราการอบแห้งใบหอมหั่นและคุณภาพของใบหอมหั่นอบแห้งโดยวัดจากอัตราการคืนตัวของใบหอมหั่นเมื่อจุ่มในน้ำร้อนและการเปลี่ยนสีของใบหอมหั่นงานวิจัยนี้อบแห้งใบหอมหั่นชิ้นเล็กๆยาวชิ้นละ 5 และ 10 มิลลิเมตรวางในถาดขนาด  $20 \times 25 \times 3$  ลูกบาศก์เซนติเมตรห้องอบแห้งมีขนาด  $40 \times 30 \times 40$  ลูกบาศก์เซนติเมตรหลอดรังสีอินฟราเรดไกลมีพื้นที่ผิว  $23 \times 18$  ตารางเซนติเมตรควบคุมระดับความดันที่ 2.6 และ 5 kPa พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายความชื้นได้อย่างแม่นยำ เมื่อได้รับพลังงานความร้อนเริ่มต้นที่ 80 W โดยระยะห่างของเครื่องทำความร้อนกับต้นหอมอยู่ที่ 10 cm จะทำให้เกิดประสิทธิภาพของการอบแห้งดีที่สุด

Nazmi et al. (2017) งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบผลของการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ (120 และ 350 W) และเทคนิคการอบแห้งแบบลมร้อน (60, 70 และ 80  $^{\circ}\text{C}$ ) โดยการตรวจสอบคุณภาพด้านสี สารต้านอนุมูลอิสระและปริมาณฟีนอลิกรวมของชิ้นมะม่วงอบแห้ง พบว่าแบบจำลอง Two-term และ Page models มีความเหมาะสมมากที่สุด โดยค่าที่วัดได้มีความใกล้เคียงกับตัวอย่างสด และเมื่อเปรียบเทียบมะม่วงอบแห้งกับกลุ่มตัวอย่างสดพบว่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระลดลง 18.4-54.6% ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดมีค่าสูงสุดในมะม่วงการอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 350 W และปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดมีค่าต่ำสุดในมะม่วงอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 80  $^{\circ}\text{C}$  ( $P < 0.05$ ) งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 350 W สามารถให้ผลมะม่วงที่มีคุณภาพสูงโดยใช้ประโยชน์จากเวลาในการอบแห้งที่สั้นลงเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

Swasdisevi et al. (2007) ได้ศึกษาการการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกลของกล้วยหอมหั่นบาง โดยศึกษากล้วยหอมหั่นบางที่มีความชื้นเริ่มต้น 300% มาตรฐานแห้ง ถูกทำให้แห้งที่ความดัน (5 10 และ 15 kPa) อุณหภูมิ (50 55 และ 60°C) และความหนา (2 3 และ 4 มิลลิเมตร) จนกระทั่งได้ความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 7% มาตรฐานแห้ง ผลการศึกษาพบว่า ความดันสุญญากาศ อุณหภูมิ และความหนา มีผลต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง และคุณภาพของกล้วยอบแห้งทางด้านสี ความแข็ง และการหดตัว การอบแห้งด้วยเครื่องสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล แสดงให้เห็นว่ามีศักยภาพที่ดีในการนำไปผลิตผลิตภัณฑ์ขบเคี้ยวจากกล้วย โดยจุดเหมาะสมสำหรับการอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล คือ ที่อุณหภูมิ 50°C ความดัน 5 kPa และความหนา 2 มิลลิเมตร

Villa-Corrales et al. (2010) ได้ศึกษาทฤษฎีและการทดลองสำหรับจลนพลศาสตร์การอบแห้งของมะม่วง “Ataulfo” โดยศึกษาความแตกต่างของความหนา อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง และการถ่ายเทความร้อนโดยการแพร่ของมวลแบบ non-isotropic มีการคาดการณ์ความแตกต่างของอุณหภูมิและความชื้นที่กระจายภายในด้วยการใช้แบบจำลองทางทฤษฎี ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลา (Drying curve) และอุณหภูมิตั้งตรงกลางได้ตามรูปแบบของการทดลอง การศึกษาพารามิเตอร์ของการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50-70°C ความหนา 2-5 มิลลิเมตร และระดับความสุกที่ 13.2-22°Brix ผลการทดลองพบว่ามะม่วงมีพฤติกรรมที่ไม่แน่นอน 2.47% อัตราการอบแห้งลดลง 4.5% เมื่อความหนาเพิ่มขึ้น 1 mm และอัตราการอบแห้งลดลง 8.0% ของ 1°Brix ที่เพิ่มขึ้น

Yunhong Liu et al. (2014) ได้ทำการศึกษา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายโอนมวลและความร้อนสำหรับการอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกลของชิ้นมันฝรั่งโดยวัดจากอุณหภูมิเครื่องทำความร้อน (120 140 และ 160°C) ความดัน (1,500 8,000 และ 15,000 Pa) ความหนาของตัวอย่าง (0.004 0.006 และ 0.008 เมตร) และระยะทางรังสี (0.08 0.12 และ 0.16 เมตร) ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นในช่วงเวลาที่แตกต่างกันของการอบแห้ง จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของความชุ่มชื้นที่ใกล้เคียงกับ 1.0 และความผิดพลาดมีค่าน้อยกว่า 10%

ดังนั้นจึงนำข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมาเปรียบเทียบดังแสดงตารางที่ 2 ซึ่งผู้วิจัยได้นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษามาประยุกต์ใช้ในการทดลองการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดภายใต้เงื่อนไขความดันสัมบูรณ์ 5 10 และ 15 kPa และใช้อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C (อำไพศักดิ์ และศักดิ์ชัย, 2553; Nazmi et al.; Mongpranee et al., 2002 และ Thanit et al., 2007) และข้อมูลจาก Kaewdam et al. และ Nazmi et al. มาใช้ในการเปรียบเทียบคุณภาพการอบแห้งในรูปแบบต่างๆ

ตารางที่ 2 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา	สิ่งที่ศึกษา	การทดสอบ
อนุสรานาตี และคณะ	จลนพลศาสตร์การอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและลมร้อน	ใบเตย	- เปรียบเทียบจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนกับการอบแห้งแบบลมร้อนเพียงอย่างเดียว	- สมการที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน - ความดัน 5, 10 และ 15 kPa - อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 °C
อำเภอศักดิ์ ทีบุญมา และศักดิ์ชัย จงจำ	การอบแห้งซึ่งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด	ชิง	- สมการการอบแห้งซึ่งบางที่เหมาะสมสำหรับทำจลนพลศาสตร์การอบแห้งซึ่ง	- อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 °C
Guy et al.	Numerical Simulation of Convective Drying of Mangoes (mangifera Indica L.) Under Variable Thermal Conditions	มะม่วง	- แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งมะม่วง ในการทำงานจลนพลศาสตร์การอบแห้งภายใต้ตัวแปรความร้อน	
Isabel et al.	Retention of $\beta$ -carotene and vitamin C in dried mango osmotically pretreated with osmotic solutions containing calcium or ascorbic acid	มะม่วง	- การเก็บรักษาวิตามินซีและแคโรทีนอยด์ในมะม่วงอบแห้งด้วยวิธีออสโมติกก่อนทำการอบแห้งด้วยลมร้อน	- ใช้สารละลายซูโครส 45° Brix - เติม/ไม่เติม แคลเซียมคลอไรด์ 1% (w/w) หรือ 1% ascorbic acid ในอัตราส่วน 1:10 (w/w)

ตารางที่ 2 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา	สิ่งที่ศึกษา	การทดสอบ
Isabel et al.	Retention of $\beta$ -carotene and vitamin C in dried mango osmotically pretreated with osmotic solutions containing calcium or ascorbic acid	มะม่วง	- การเก็บรักษาวิตามินซีและแคโรทีนอยด์ในมะม่วงอบแห้งด้วยวิธีออสโมซิสก่อนทำการอบแห้งด้วยลมร้อน	- ใช้สารละลายซูโครส 45° Brix - เติมน้ำ/ไม่เติมน้ำ แคลเซียมคลอไรด์ 1% (w/w) หรือ 1% ascorbic acid ในอัตราส่วน 1:10 (w/w)
Kamenan et al.	Mathematical modelling of the thin layer solar drying of banana, mango and cassava	กล้วย มะม่วง มันสำปะหลัง	- สมการการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งของกล้วย มะม่วง และมันสำปะหลัง โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์	- ความดันที่ 2.6 และ 5 kPa - ระยะห่าง - กำลังไฟฟ้าที่ใช้
Mongpraneet et al.	Kinematic Model for a Far Infrared Vacuum Dryer	ใบต้นหอม	- สมการที่ใช้ในการทำนายการอบแห้งแบบสุญญากาศโดยใช้อินฟราเรดไกล	- ความดันที่ 2.6 และ 5 kPa - ระยะห่าง - กำลังไฟฟ้าที่ใช้
Nazmi et al.	Influence of different drying techniques on drying parameters of mango	มะม่วง	- ความแตกต่างของคุณภาพของการอบแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง ไมโครเวฟ และอบลมร้อน	- แช่เยือกแข็งที่ -5°C ความดัน 52 Pa - ไมโครเวฟที่ 120 และ 350 W - อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 °C

ตารางที่ 2 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา	สิ่งที่ศึกษา	การทดสอบ
Kaewdam et al.	Mathematical model of freeze drying on mango	มะม่วง	- แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการการอบแห้งซึ่งนึ่งสำหรับการแช่เยือกแข็งของมะม่วง	- ชั้นที่ 1 แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40°C, 4 hr. -20°C, 10 hr. และ -10°C, 6 hr. - ชั้นที่ 2 อบแห้งที่อุณหภูมิ 30°C, 6 hr. โดยควบคุมความดันที่ 20 Pa
Thanit et al.	Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice	กล้วยหอม	- แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งกล้วยหอมด้วยสเปกตรัมอินฟราเรดไกล	- ความดัน 5, 10 และ 15 kPa - อุณหภูมิ 50, 55 และ 60°C - ความหนา 2, 3 และ 4 mm
Villa-Corrales et al.	Numerical and experimental analysis of heat and moisture transfer during drying of Ataulfo mango	มะม่วง	- ทฤษฎีและการทดลองของจลนพลศาสตร์การอบแห้งของมะม่วง	- อบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50-70°C - ความหนา 2-5 mm - ระดับความสุก 13.2-22°Brix
Yunhong Liu et al.	A Mathematical Model for Vacuum Far-Infrared Drying of Potato Slices	มันฝรั่ง	- แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายโอนมวลและความร้อนสำหรับการอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกลของชิ้นมันฝรั่ง	- ความดัน 1,500 8,000 และ 15,000 Pa



### บทที่ 3

## อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งมะม่วงแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด ขั้นตอนของการศึกษาเริ่มจากการเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ วัสดุ และวิธีการดำเนินงานวิจัย รวมถึงสถานที่ดำเนินงานวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

การศึกษานี้มีอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย วัสดุที่ใช้ในการทดลอง อุปกรณ์ที่ใช้ในการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคุณภาพของชิ้นมะม่วงอบแห้งโดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง
  - มะม่วงสุกพันธุ์น้ำดอกไม้ (*Mangifera indica* Linn. Mango (Nam Dok Mai))
2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด
  - เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด 1 ชุด  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 เซนติเมตร ยาว 90 เซนติเมตร
  - บั๊มสุญญากาศ ขนาด 2 แรงม้า 1 ชุด  
ยี่ห้อ Woosung รุ่น MVP60
  - อินฟราเรด แบบเซรามิกส์ ขนาด 9.5x2 นิ้ว 1 อัน
  - Temperature controller 1 เครื่อง
  - Thermocouple type k (0-1,500 °C) 1 อัน
  - เครื่องชั่งน้ำหนักแบบตัวเลข ยี่ห้อ e-Accura รุ่น WA2 1 เครื่อง  
Max. cap: 3,000 กรัม Readability 0.1 กรัม
3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคุณภาพของชิ้นมะม่วงอบแห้ง
  - เครื่องมือวัดสี (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Hunterlab 1 เครื่อง  
รุ่น MiniScan XE plus
  - เครื่องมือวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี ( $a_w$  meter) 1 เครื่อง  
ยี่ห้อ AQUA lab รุ่น 3 TE
  - เครื่อง Texture Analyzer 1 เครื่อง



รุ่น TA.XT2i.plus		
- เครื่องมือวัดปริมาณของแข็งละลายได้ (Hand refractometer)	1	เครื่อง
ยี่ห้อ Atago รุ่น N-1 $\alpha$ (Brix 0-32%)		
- เครื่องวัดเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยรังสีอินฟราเรด	1	เครื่อง
ยี่ห้อ AND รุ่น MX-50		

### 3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.2.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

1. นำมะม่วงน้ำดอกไม้สุก ที่มีขนาดผล สีเปลือก และความหนาแน่น ใกล้เคียงกัน โดยที่ความหนาแน่นหาได้จากการลอยผลมะม่วงในสารละลายน้ำเกลือ (NaCl) ความเข้มข้น 4-5 % ค่าความชื้นเริ่มต้นที่ 80-90% และปริมาณของแข็งละลายได้อยู่ในช่วง 16 - 20 °Brix (Harnkarnsujarit and Sanguansri, 2011) มาปอกเปลือก และล้างน้ำให้สะอาด
2. หั่นเนื้อมะม่วงให้ได้ตามขนาดที่กำหนด คือความกว้าง 30 mm ยาว 30 mm และความหนา 10 mm (kaewdam, 2012) ดังภาพที่ 7

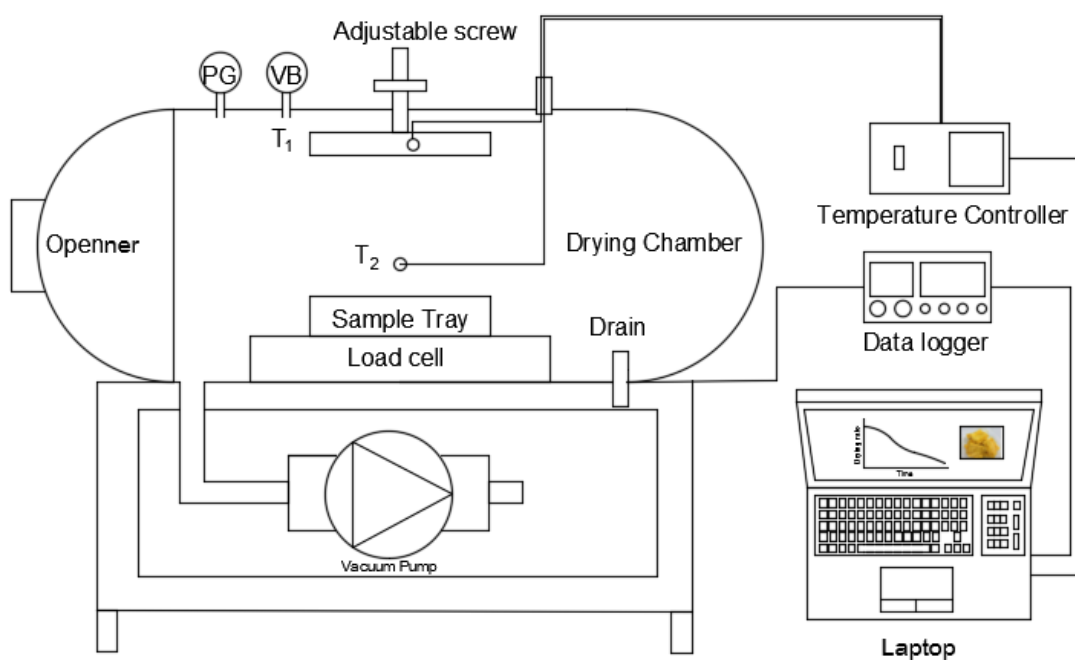


ภาพที่ 7 ชิ้นมะม่วงน้ำดอกไม้ขนาด 30x30x10 mm.

### 3.2.2 การศึกษาระบบการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกล

ในการศึกษาการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกลนั้น ใช้ชุดทดสอบการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกล ดังภาพที่ 8 ประกอบด้วย

1. ห้องอบแห้ง (Drying Chamber) ภายในห้องอบแห้งเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 เซนติเมตร ยาว 90 เซนติเมตร รูปทรงกระบอก (แคปซูล) วางตัวในแนวนอน
2. แผ่นอินฟราเรดสำหรับให้ความร้อน (Infrared Heater,  $T_1$ ) ซึ่งเป็นตัวให้ความร้อนแก่วัสดุที่ต้องการศึกษา
3. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple type K,  $T_2$ ) ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่าง
4. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) ใช้สำหรับตั้งค่าอุณหภูมิในการทำแห้งให้กับตัวอย่าง
5. ฝาเปิด (Opener)
6. ก้านปรับระดับแผ่นอินฟราเรด (Adjustable screw) ใช้ในการปรับระดับแผ่นอินฟราเรด
7. โหลดเซลล์ (Load Cell) ทำหน้าที่รับน้ำหนักของตัวอย่าง
8. เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger)
9. ถาดสำหรับวางตัวอย่าง (Sample Tray)
10. เกจวัดความดัน (Pressure Gauge, PG) ใช้สำหรับวัดความดันภายในห้องอบแห้ง
11. วาล์วป้องกันสุญญากาศ (Vacuum Breaker, VB) เพื่อปรับความดันป้องกันการเกิดสุญญากาศเนื่องจากปริมาณไอน้ำหรือน้ำหยดตัวลง ซึ่งเป็นสาเหตุให้เครื่องจักรหรือถังปิดยุบหรือบิดเบี้ยวผิดรูปร่างได้
12. ท่อระบายน้ำ (Drain)
13. ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) จะดูดเอาอากาศภายในห้องอบแห้งออกไป เพื่อให้ภายในห้องอบแห้งคงสภาพเป็นระบบสุญญากาศ
14. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer) สำหรับเก็บบันทึกและวิเคราะห์ข้อมูล



ภาพที่ 8 แผนภูมิชุดทดสอบการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกล

### 3.3.3 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด โดยใช้มะม่วงสุกพันธุ์น้ำดอกไม้ จากการเตรียมชิ้นทดสอบในขั้นตอนที่ 1 จำนวน 100 กรัม และวัดคุณภาพหลังการอบแห้ง โดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพหลังการอบแห้ง 2 ตัวแปร คือ ความดัน และอุณหภูมิในการอบแห้ง วางแผนการทดลองแบบ Full factorial 2 ตัวแปร ตัวแปรละ 3 ปัจจัย และวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of variance, ANOVA) ด้วยโปรแกรม SPSS ของค่าสังเกตทุกค่า และหากผลการวิเคราะห์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจะมีการเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธี Duncan's multiple range test, DMRT และหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่สำคัญที่ใช้ในการบ่งบอกคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้แก่ ค่าความแข็ง (Hardness) และค่าสี (Color Measurement) ด้วยเทคนิค Regression

#### 1. ศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง

อำไพศักดิ์ ทีบุญมา และศักดิ์ชัย จงจำ (2553) ได้ศึกษาการอบแห้งซึ่งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด โดยทำการทดลองอบแห้งภายใต้อุณหภูมิตั้ง 40 50 และ 60 °C ความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 990 – 1,020 %d.b. และความชื้นหลังอบแห้งเหลือประมาณ 10 %d.b.

Mongpraneet et al. (2002) ได้ทำการวิจัยคุณลักษณะของการอบแห้งใบหอมแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล ความคุมระดับอุณหภูมิที่ใช้ คือ 65 °C โดยความชื้นเริ่มต้นของใบหอมอยู่ที่ 91.3 - 93.5 %w.b. และความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 5 %w.b.

Thanit et al. (2007) ได้ศึกษาการการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกลของกล้วยหอมแห้งบาง โดยศึกษากล้วยหอมแห้งบางที่มีความชื้นเริ่มต้น 300 %d.b. จนกระทั่งได้ความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 7 %d.b. ถูกทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 55 และ 60 °C

จากงานวิจัยที่กล่าวมา จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ในช่วง 40 - 65 °C แต่อย่างไรก็ตาม สภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งขึ้นมะม่วง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งที่มีคุณภาพดีนั้น ยังไม่มีงานวิจัยที่ระบุชัดเจน จึงได้ทำการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้ง โดยใช้ช่วงความดันที่ 50 60 และ 70 °C จากนั้นตรวจสอบคุณภาพหลังการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ และเลือกการทดลองที่เหมาะสม จากความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่มีค่าต่ำกว่า 6 %d.b. (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2554) โดยการวิเคราะห์ผลทางสถิติ

## 2. การศึกษาความดันในการอบแห้ง

หลังจากได้อุณหภูมิในการอบแห้งที่เหมาะสมแล้ว จึงศึกษาความดันในการอบแห้งที่เหมาะสม จากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ความดันที่ใช้ในการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดอยู่ในช่วง 2.6 - 15 kPa แต่อย่างไรก็ตาม สภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งขึ้นมะม่วง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์มะม่วงการอบแห้งที่มีคุณภาพดีนั้น ยังไม่มีงานวิจัยที่ระบุชัดเจน จึงได้ทำการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้ง โดยใช้ช่วงความดันที่ 5 10 และ 15 kPa จากนั้นตรวจสอบคุณภาพหลังการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ และเลือกการทดลองที่เหมาะสม จากความชื้นของผลิตภัณฑ์ (Final moisture content,  $M_f$ ) ที่มีค่าต่ำกว่า 6 %d.b. (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2554) หรือมีค่าเท่ากับอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio) ที่ 0.1

### 3.3.4 การตรวจสอบคุณภาพ

หลังการอบแห้ง จะตรวจสอบคุณภาพหลังการอบแห้ง เพื่อเปรียบเทียบกับในแต่ละการทดลอง และเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งมะม่วงด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดต่อไป โดยคุณสมบัติที่ศึกษา ได้แก่

#### 1. ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (Water activity, $a_w$ )

ค่า  $a_w$  วัดโดยใช้เครื่องวัด  $a_w$  meter (ยี่ห้อ Aqua Lab รุ่น Series 3TE) ซึ่งแสดงค่า  $a_w$  ออกมาเป็นตัวเลขที่ไม่มีหน่วย มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยสุ่มมะม่วงอบแห้งมา 5 กรัม เครื่องวัด  $a_w$  จะทำ

การอ่านค่า  $a_w$  ออกมา โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 136/2558 กำหนดว่าผลไม้บอบแห้งจะต้องมีค่าแอมพลิจูดความชื้นไม่เกิน 0.6 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2558)

## 2. การทดสอบคุณภาพด้านสี

การทดสอบคุณภาพด้านสีของมะม่วงอบแห้งจะใช้เครื่องวัดค่าสีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Hunter lab รุ่น Mini Scan XE Plus การตรวจสอบสีจะตรวจสอบด้วยระบบ CIE โดยการตรวจวัดค่าสีในเทอมของค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ค่าสีแดงและสีเขียว ( $a^*$ ) และค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน ( $b^*$ ) พร้อมทั้งคำนวณหาความแตกต่างสีโดยรวม (Total Color Difference,  $\Delta E$ ) ดังสมการที่ 8

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad (8)$$

เมื่อ  $L_0$ ,  $a_0$  และ  $b_0$  คือ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งตามท้องตลาด

## 3. การตรวจสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส (TPA)

การตรวจสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสความแข็ง (Hardness) ในหน่วย N ทำได้โดยใช้เครื่อง Texture Analyser รุ่น TA.XT.plus (Stable microsystems Texture Technologies Inc., UK) ทำการทดสอบด้วยแรงกด 0.05 N ด้วยหัวกดรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.5 cm และใช้ความเร็วในการกด 5 มิลลิเมตรต่อวินาที

## 4. การตรวจสอบปริมาณความชื้น (Moisture Content, MC)

การตรวจสอบปริมาณความชื้นสามารถตรวจสอบได้โดยใช้เครื่อง Infrared moisture determination balance (ยี่ห้อ AND รุ่น AD-4714A บริษัท A&D จำกัด)

### 3.3.5 การหาอัตราการอบแห้ง

หลังจากได้สภาวะที่เหมาะสม จึงทำการเก็บข้อมูลอย่างละเอียดซ้ำที่สภาวะดังกล่าว โดยจะทำการทดลอง และเก็บค่าน้ำหนัก และความชื้นที่เปลี่ยนไปของชิ้นตัวอย่างทุก ๆ 5 นาที จนเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราการอบแห้ง ( $D_r$ ) จากสมการ (4) เพื่อนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาที่ใช้



### 3.3.6 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ในกระบวนการอบแห้ง พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง พลังงานจากวัสดุ และพลังงานที่ให้กับวัสดุอบแห้ง ซึ่งได้แก่ พลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นถึงคุณภาพผลิตภัณฑ์และพลังงานที่ใช้ นั่นคือ จะต้องไม่สิ้นเปลืองพลังงาน ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) คือ พลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำที่ระเหย ซึ่งเป็นส่วนกลับของอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (อีลิเยะ และคณะ, 2015) สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$SEC = \frac{E_{total}}{M_w} \quad (9)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kWh/kg)

$E_{total}$  คือ พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง (kWh)

$M_w$  คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเนื้อวัสดุ (kg)

โดยค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้ นั่นคือ หากค่า SEC สูง จะมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่ำ และหากค่า SEC ต่ำ จะมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูง

### 3.3.7 การเปรียบเทียบรูปแบบการอบแห้ง

ในการเปรียบเทียบรูปแบบการอบแห้งนี้ จะเปรียบเทียบการทดลองการอบแห้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ การอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด (Vacuum infrared drying, VID) การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying, FD) และการอบแห้งแบบอินฟราเรด (Infrared radiation drying, IRD) โดยการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดจะทำการทดลองที่สภาวะที่ดีที่สุดจากงานวิจัยนี้ การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง จะใช้สภาวะที่ดีที่สุดจากศึกษาบทความของ Kaewdam (2012) โดยทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง คือ การอบแห้งขั้นต้นที่อุณหภูมิ  $-40^{\circ}\text{C}$  เวลา 6 ชั่วโมง  $-20^{\circ}\text{C}$  เวลา 10 ชั่วโมง และ  $-10^{\circ}\text{C}$  เวลา 6 ชั่วโมง การอบแห้งขั้นที่สอง อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  เวลา 6 ชั่วโมง และความดัน 20 Pa และได้ทำการตรวจสอบคุณภาพหลังการอบแห้ง จึงนำข้อมูลจากบทความวิจัยที่ศึกษามาเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ใช้ในการเปรียบเทียบในการศึกษาคุณสมบัติหลังการอบแห้งจากการทดลอง ดังตารางที่ 3 เนื่องจากผลิตภัณฑ์อบแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง



และจากการศึกษาบทความวิจัยของ Nazmi et al. (2017) ทำการศึกษาผลการอบแห้งแบบ แชนเยือกแข็ง ไมโครเวฟ และลมร้อน ของขึ้นมะม่วงที่ส่งผลต่อค่าสี พฤติกรรมการอบแห้ง สารต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณสารฟีนอลิก ซึ่งในบทความวิจัยนี้ได้มีการตรวจสอบคุณภาพสีในการอบแห้ง พบว่า การอบแห้งแบบแชนเยือกแข็งให้คุณภาพสีที่ใกล้เคียงกับมะม่วงสดมากที่สุด รองลงมาเป็นการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C จึงนำข้อมูลจากบทความวิจัยที่ศึกษามาเป็นผลิตภัณฑ์เปรียบเทียบในการศึกษาคุณสมบัติหลังการอบแห้งจากการทดลอง ซึ่งพบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 1.5 m/s สามารถทำให้คุณภาพสีของมะม่วงมีความแตกต่างรองลงมาจากการอบแห้งแบบแชนเยือกแข็ง แต่ขนาดของขึ้นตัวอย่างมีความแตกต่างกัน ผู้วิจัยจึงทำการทดลองการอบแห้งมะม่วงด้วยอินฟราเรด (Infrared radiation drying, IRD) โดยใช้ขนาดมะม่วงที่ 3x3x1 cm ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 1.5 m/s ทำการทดลองทั้งหมด 3 ชั่วโมง เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การอบแห้ง ตรวจวัดคุณภาพหลังอบแห้ง และค่าความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะ ดังตารางที่ 3

**ตารางที่ 3** คุณภาพหลังการอบแห้งมะม่วงแบบอินฟราเรด (IRD)

Product	Quality					SEC (kWh/kg)
	H (N)	a <sub>w</sub>	Color Measurement			
			L*	a*	b*	
VID						
FD	6.18	0.276	79.86	4.29	42.62	253.07
IRD	3.62	0.543	60.09	16.90	53.22	170.27

### 3.3.8 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งมะม่วงแบบสุญญากาศ

#### ร่วมกับอินฟราเรด

ในการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมของการอบแห้งมะม่วงแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด เพื่อทำนายพฤติกรรมการอบแห้ง จะเลือกศึกษาแบบจำลองอัตราการอบแห้งจากสมการเอมพิริคัล 10 แบบจำลอง ดังนี้ แบบจำลองของ Newton, Page, Modified Page, Henderson and Pabis, Logarithmic, Wang and Singh, Two Term, Verma et al. Modified Henderson and Pabis และ Midilli et al. ซึ่งมีรูปแบบดังตารางที่ 1 และทุกกรณีการทดสอบจะมีการวิเคราะห์ความแม่นยำทางสถิติ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of

determination,  $R^2$ ) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) และค่าไคสแควร์ (Chi-square, ) ดังสมการ (5) ถึง (7)

### 3.3.9 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient, $D_{eff}$ )

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล คือ คุณสมบัติเฉพาะทางกายภาพที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุซึ่งจะขึ้นอยู่กับความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ พิจารณาโดยอาศัยสมการการจำลองการแพร่ตามกฎข้อที่ 2 ของ Fick (Fick's second law of diffusion) ที่สมมติว่า การแพร่ของมวลน้ำหรือความชื้นจากวัสดุเกิดจากเกรเดียนต์ค่าความเข้มข้นของความชื้น (สมชาติ, 2540; Bala, 1997; Crank, 1975) ดังสมการที่ (10)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 (D_{eff})t}{L^2}\right) \quad (10)$$

แต่เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนาน สามารถทำการปรับแก้สมการได้ และสามารถนำมาสร้างเป็นสมการเส้นตรง ได้ดังสมการที่ (11)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 (D_{eff})t}{L^2}\right) \quad (11)$$

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิธึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้น ( $\ln MR$ ) กับเวลาการอบแห้ง ( $t$ ) และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งมะม่วงที่สภาวะที่เหมาะสม ได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

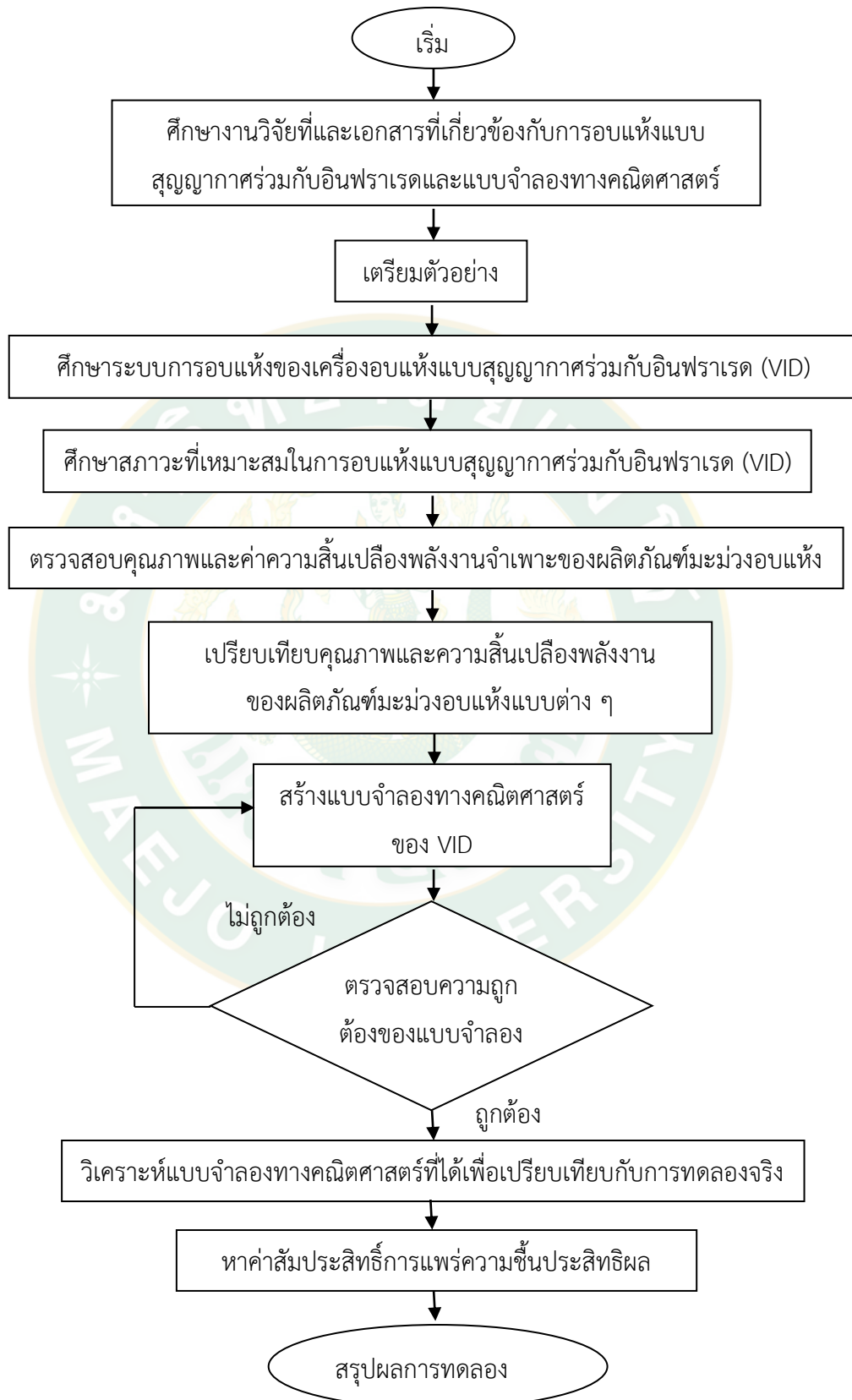
$$D_{eff} = -\frac{\text{slope} \cdot L^2}{\pi^2} \quad (12)$$

เมื่อ  $D_{eff}$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ( $m^2/s$ )

$L$  คือ ความหนาของตัวอย่าง ( $m$ )

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองคือ น้ำหนัก อุณหภูมิ และเวลา ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลได้ โดยการแก้สมการทีละขั้นตอน แล้วนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้มาเป็นตัวประมาณค่า เพื่อทำการนำเข้าสู่การวิเคราะห์ โดยการหาค่าเป้าหมาย และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลกับปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก

### 3.3 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย



### 3.4 สถานที่ดำเนินการวิจัย

ดำเนินการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการ E106 อาคารเรียนรวมสาขาวิศวกรรมศาสตร์ (สำหรับนักศึกษาปริญญาโท และ ปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมอาหาร) คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

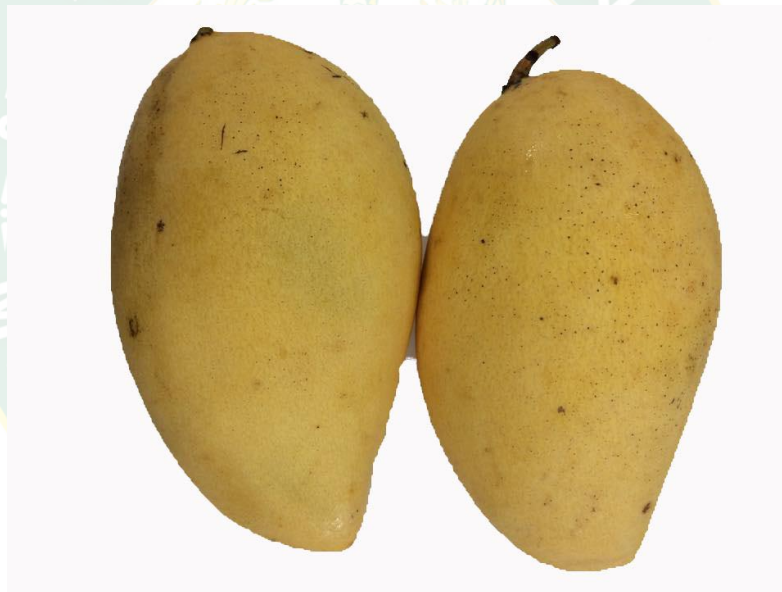


## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิจารณ์

#### 4.1 คุณสมบัติเริ่มต้นของมะม่วง

จากการเลือกผลมะม่วงสุกพันธุ์น้ำดอกไม้ ที่มีขนาดผล สีเปลือก และความหนาแน่นใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 9 และทดสอบหาคุณสมบัติเริ่มต้นของมะม่วง คือ วอเตอร์แอกติวิตี้ (Water activity,  $a_w$ ) ค่าสี (color) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solids, TSS) และปริมาณความชื้น (Moisture content, MC) ได้ผลดังตารางที่ 4 ซึ่งจะใช้คุณสมบัติเริ่มต้นนี้ในการเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งที่วางขายในท้องตลาด และเลือกผลิตภัณฑ์ที่มีความใกล้เคียงกับมะม่วงสดมากที่สุด



ภาพที่ 9 ผลมะม่วงสุกพันธุ์น้ำดอกไม้ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นทดสอบ

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบหาคุณสมบัติเบื้องต้นของมะม่วง

RUN	$a_w$	Color			TSS (°Brix)	MC (% w.b.)
		L*	a*	b*		
1	0.983	57.21	5.52	40.52	17.0	85.25
2	0.976	57.03	5.27	42.01	16.0	83.36
3	0.982	57.96	6.47	47.10	18.0	83.68
Mean	0.980	57.40	5.75	43.21	17.0	84.10

#### 4.1.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้ง

สำรวจผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งที่วางขายในท้องตลาดเพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์อ้างอิง (Reference product) โดยคุณภาพของผลิตภัณฑ์ คือ ปริมาณความชื้น เนื้อสัมผัส ค่าวอเตอร์แอกติวิตี และค่าสี แสดงผลดังตารางที่ 5 พบว่าค่าความชื้นใกล้เคียงกับการศึกษาของสุชาติ และคณะ (2546) และค่าคุณภาพต่าง ๆ ในตารางที่ 5 นำไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์อ้างอิงในการทดสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

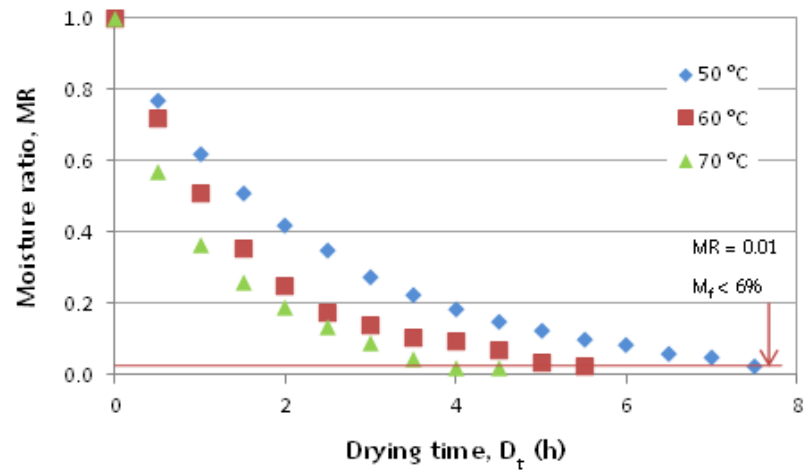
ตารางที่ 5 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งในท้องตลาด

Sample	MC (%w.b.)	H (N)	a <sub>w</sub>	Color			
				L*	a*	b*	ΔE
Ref. Product	7.2	5.3971	0.235	78.92	3.53	38.42	-

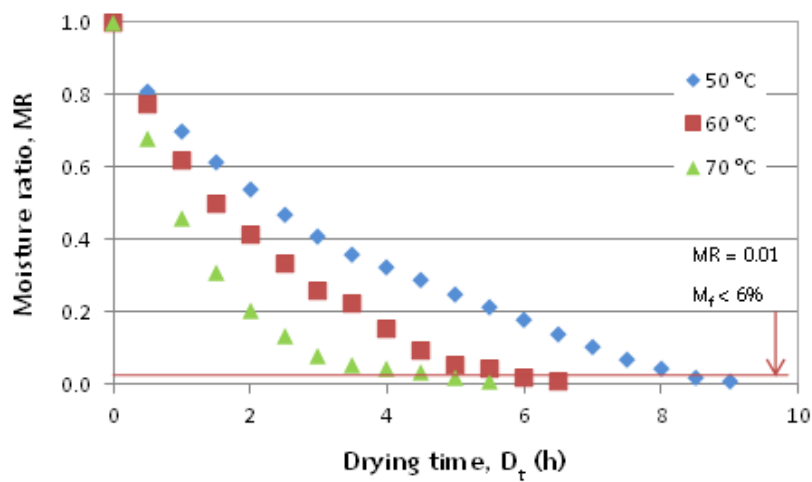
#### 4.2 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

เนื่องจากการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดมีอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ เข้ามาเกี่ยวข้องได้แก่ อุณหภูมิ และความดัน จึงทำการทดลองปรับเปลี่ยนปัจจัยดังกล่าว ผลจากการทดลองเมื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์คงที่เท่ากับ 5 10 และ 15 kPa ดังภาพที่ 10 โดยเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนความชื้นจะลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาการอบแห้ง โดยช่วง 4 ชั่วโมงแรก ความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นสูง ดังนั้นจึงเกิดการถ่ายเทความชื้นจากผลิตภัณฑ์สู่ห้องอบแห้งอย่างรวดเร็ว และถูกดูดออกจากห้องอบแห้งด้วยปั๊มสุญญากาศ หลังจากนั้นความชื้นจะค่อย ๆ ลดลง จนคงที่ (ศักดิ์ชัย และอำไพศักดิ์, 2553; อนุสร และคณะ, 2555) จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิ 70 °C จะทำให้อัตราส่วนความชื้นลดลงเร็วที่สุด จึงทำให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด เมื่อเทียบกับอุณหภูมิ 60 °C และ 50 °C และที่ระดับความดันสุญญากาศเท่ากัน สามารถอธิบายได้ว่าที่ความดันเดียวกัน อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งของมะม่วง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะทำให้อัตราส่วนความชื้นลดลงเร็วขึ้น

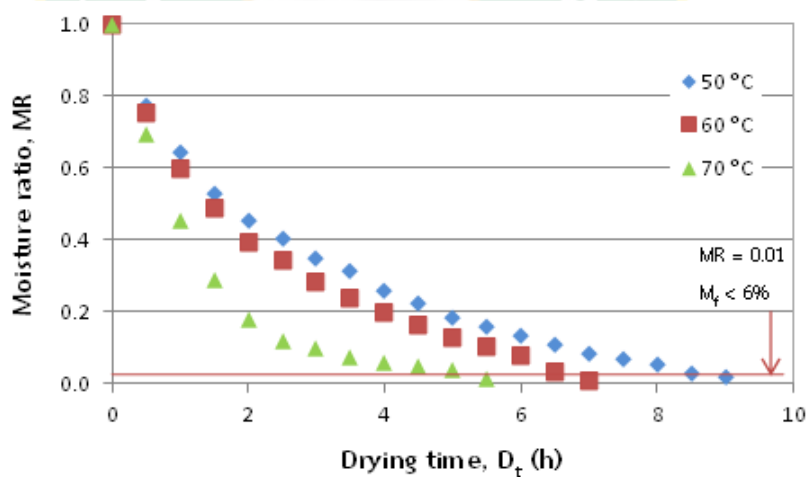




(a)

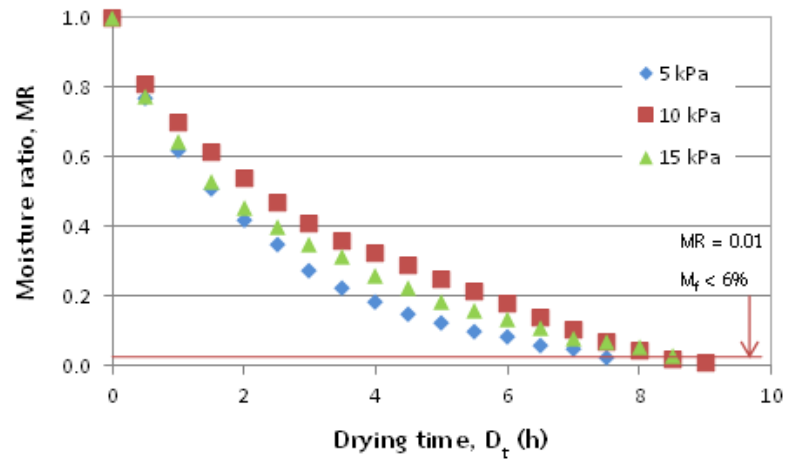


(b)

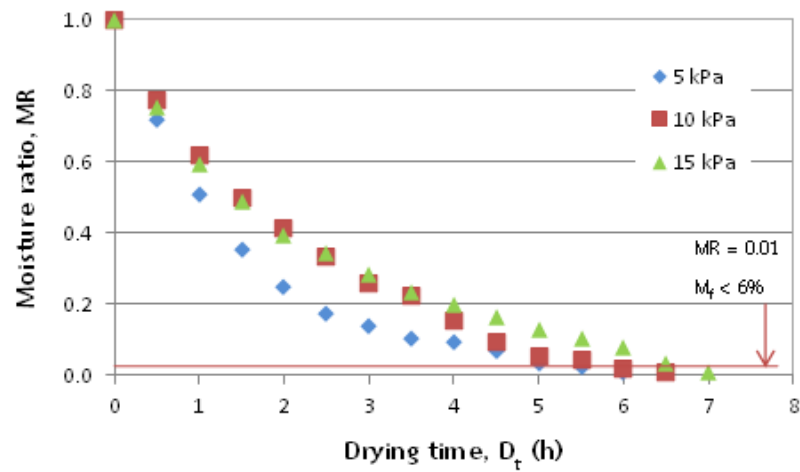


(c)

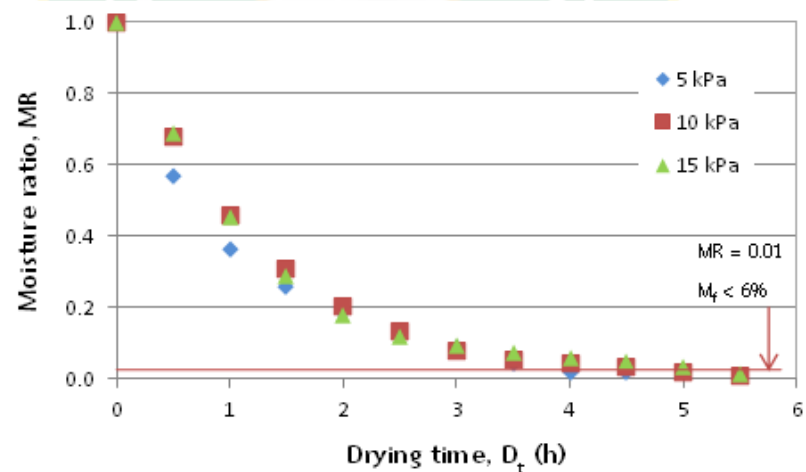
ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ (a) ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa  
(b) ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa และ (c) ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa



(a)



(b)



(c)

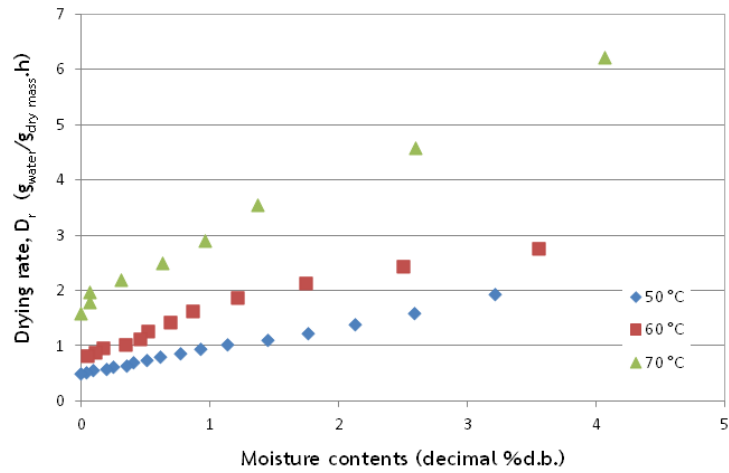
ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ (a) อุณหภูมิ 50 °C  
(b) อุณหภูมิ 60 °C และ (c) อุณหภูมิ 70 °C

ภาพที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 °C โดยเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขความดันสัมบูรณ์ จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนความชื้นจะลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาการอบแห้ง สังเกตได้จากภาพที่ 11(b) ที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa อัตราส่วนความชื้นลดลงอย่างเห็นได้ชัดจนมากที่สุด เนื่องจากความดันสูญญากาศที่ส่งผลต่อจุดเดือดของน้ำในการอบแห้ง โดยน้ำที่ความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 kPa มีจุดเดือดเท่ากับ 32.88, 45.81 และ 53.97 °C ตามลำดับ (อำเภอศักดิ์ และศักดิ์ชัย, 2553) จากการศึกษาวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ภาพที่ 11(c) อัตราส่วนความชื้นลดลงรวดเร็วที่สุด โดยแต่ละความดันแต่มีอัตราส่วนความชื้นใกล้เคียงกัน แต่ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งแตกต่างกัน กล่าวคือ ที่อุณหภูมิเดียวกัน ความดันมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งเมื่อลดความดัน

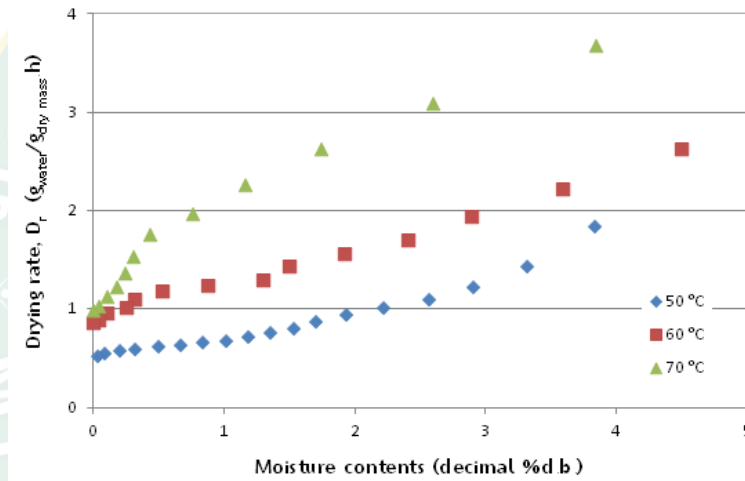
จากตารางที่ 6 ทำการอบแห้งมะม่วงที่สภาวะความดัน (5 10 และ 15 kPa) และอุณหภูมิ (50 60 และ 70 °C) โดยมี  $D_t$  อยู่ในช่วง 4.67-9.67 ชั่วโมง และ  $D_r$  อยู่ในช่วง 0.67-3.03  $\frac{g_{water}}{g_{dry\ mass}} h$ . เมื่อทำการทดสอบความแตกต่างค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) พบว่าความดันและอุณหภูมามีผลต่อระยะเวลาในการอบแห้ง ( $p < 0.05$ ) แต่เมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้ง พบว่า เมื่อความดันลดลงอัตราการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าความดันและอุณหภูมิส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยสภาวะที่อัตราการอบแห้งสูงที่สุด คือ ความดัน 5 kPa และ อุณหภูมิ 70 °C

จากการศึกษาข้างต้นสรุปได้ว่า อุณหภูมิและความดันที่ใช้มีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งของมะม่วง โดยที่สภาวะความดันเดียวกันอัตราส่วนความชื้นจะลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้ง ในทำนองเดียวกัน ที่สภาวะอุณหภูมิเดียวกันอัตราส่วนความชื้นจะลดลง เมื่อลดความดันสัมบูรณ์

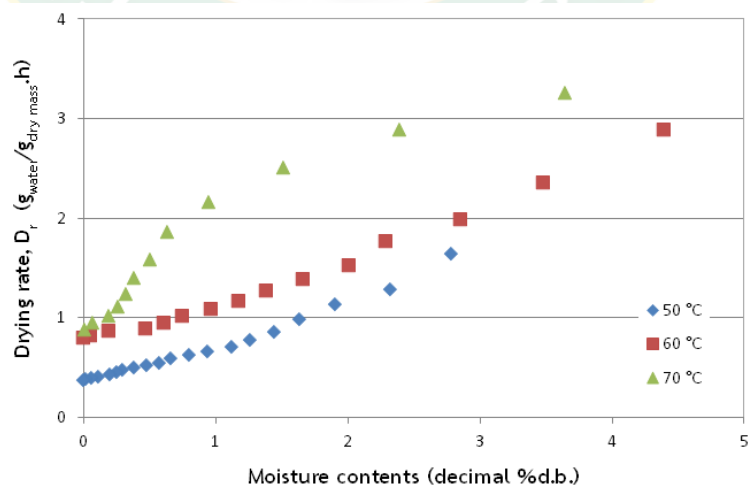
ภาพที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับ %d.b. ที่ความดันสัมบูรณ์คงที่เท่ากับ 5 10 และ 15 kPa โดยเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง และภาพที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้ง 50 60 และ 70 °C โดยเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขความดันสัมบูรณ์ จากการศึกษาพบว่า อัตราการอบแห้งเป็นแบบลดลง (Falling rate) โดยช่วงแรกอัตราการอบแห้งจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นสูง และลดลงเรื่อย ๆ จนอัตราการอบแห้งเป็น 0 คือ น้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ระดับความดันเดียวกัน และลดระดับความดันสัมบูรณ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน จะทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น จากตารางที่ 6 พบว่าอัตราการอบแห้งที่ 50 °C มีความแตกต่างกับ อัตราการอบแห้งที่ 60 และ 70 °C ซึ่งมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยสูงสุดที่ 3.03  $\frac{g_{water}}{g_{dry\ mass}} h$ .



(a)

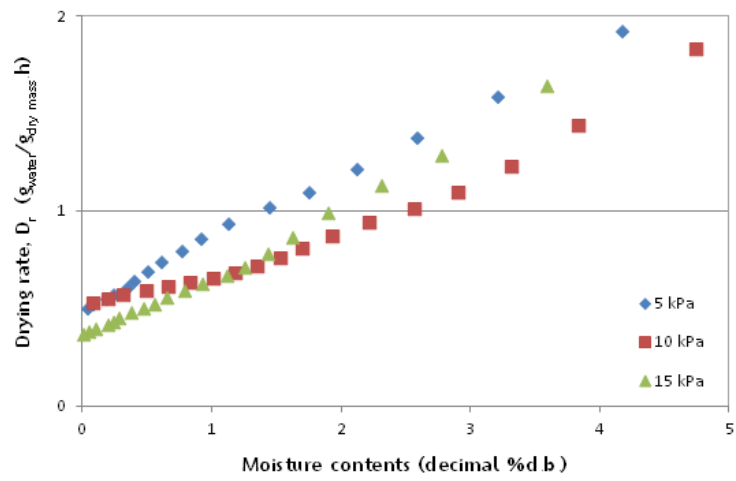


(b)

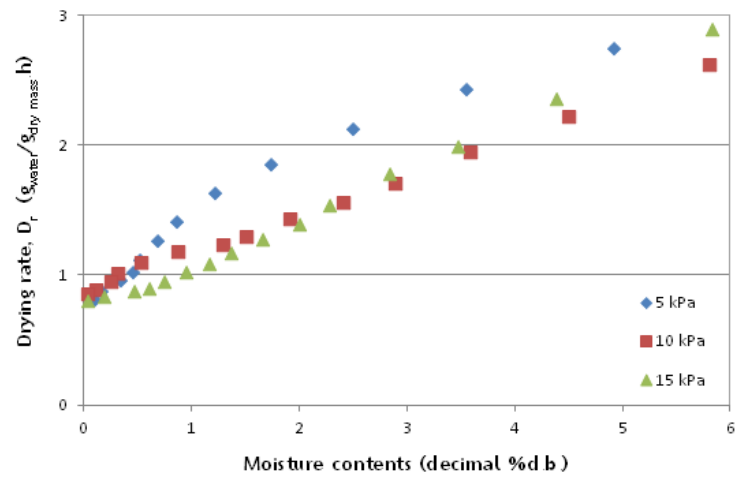


(c)

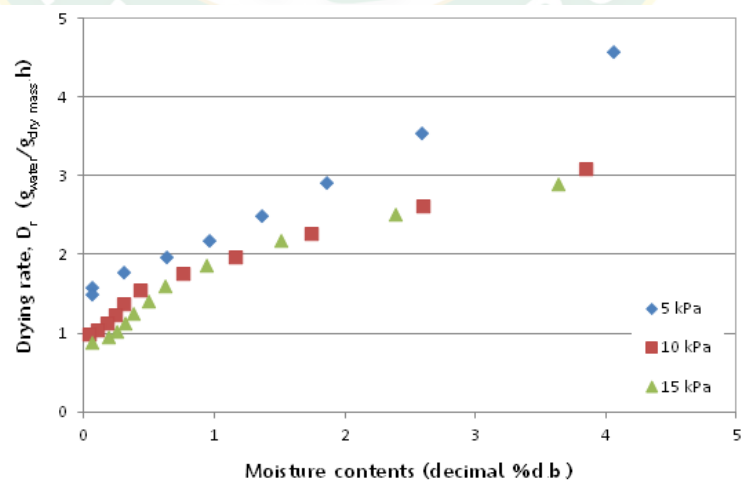
ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับปริมาณความชื้นที่ (a) ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa  
(b) ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa และ (c) ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa



(a)



(b)



(c)

ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับปริมาณความชื้นที่ (a) อุณหภูมิ 50 °C  
(b) อุณหภูมิ 60 °C และ (c) อุณหภูมิ 70 °C

ตารางที่ 6 ตารางบันทึกผลการทดลองของการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

P (kPa)	T (°C)	Drying Kinetic	
		D <sub>t</sub> (h)	D <sub>r</sub> (g <sub>water</sub> /g <sub>dry mass</sub> ·h)
5	50	8.50±0.11 <sup>b</sup>	0.96±0.01 <sup>e</sup>
	60	6.17±0.12 <sup>d</sup>	1.61±0.01 <sup>cd</sup>
	70	4.67±0.23 <sup>e</sup>	3.03±0.17 <sup>a</sup>
10	50	9.42±0.23 <sup>a</sup>	0.88±0.04 <sup>ef</sup>
	60	6.92±0.12 <sup>c</sup>	1.48±0.08 <sup>d</sup>
	70	6.00±0.24 <sup>d</sup>	1.97±0.14 <sup>b</sup>
15	50	9.67±0.23 <sup>a</sup>	0.67±0.10 <sup>g</sup>
	60	7.17±0.23 <sup>c</sup>	1.46±0.04 <sup>d</sup>
	70	6.00±0.24 <sup>d</sup>	1.75±0.10 <sup>c</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรพิมพ์เล็กหมายถึงการเปรียบเทียบความแตกต่างของลักษณะคุณภาพต่าง ๆ ระหว่างตัวอย่างในแนวตั้งที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี Duncan Multiple Range Test (DMRT)

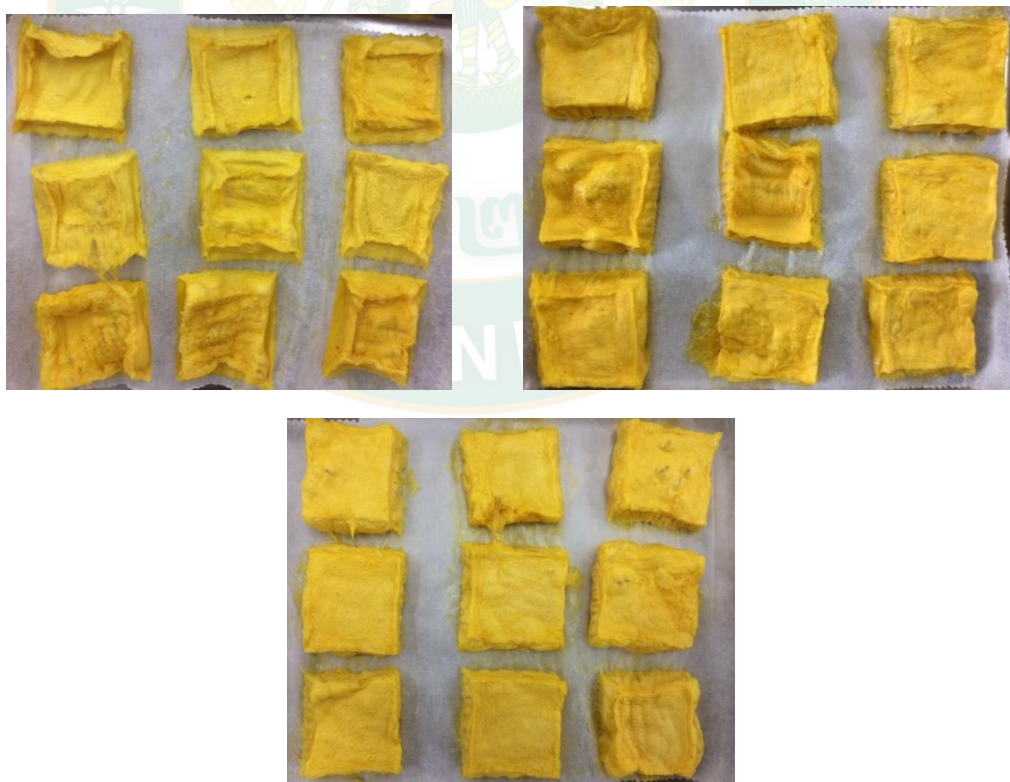
#### 4.3 คุณภาพผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง

จากการสังเกตลักษณะภายนอกของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง แต่ละการทดลองมีลักษณะภายนอกไม่แตกต่างกันมากนัก ดังภาพที่ 14 - 16 และเกิดการหดตัวในบางการทดลอง เนื่องจากการระเหยของน้ำ ที่ความดันสุญญากาศสูง จะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ระเหยน้ำออกได้ช้า และที่ความดันสุญญากาศต่ำน้ำในผลิตภัณฑ์ระเหยออกได้ไวจึงเกิดการพองตัวขึ้น เมื่อวัดคุณภาพของมะม่วงหลังการอบแห้งให้ผลดังตารางที่ 7 จะเห็นได้ว่า ค่าความแข็ง (Hardness, H) ของมะม่วงอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C มีความแตกต่างกับมะม่วงอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C และ 70 °C ค่าความแข็งมากที่สุด คือ 4.98 N ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของมะม่วงอบแห้ง มีค่าอยู่ในช่วง 0.278-0.59 ตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผลไม้แห้ง มผช.136/2558 กำหนด ว่าผลไม้อบแห้งจะต้องมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ไม่เกิน 0.6 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2558) เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ระดับเดียวกันทำให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้มีความแตกต่างกันทั้ง 3 อุณหภูมิ ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ที่มีค่าน้อยที่สุด คือ 0.278 สีของผลิตภัณฑ์พบว่ามีความแตกต่างกันไม่มากนัก และสีของผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง (Reference Product) และเมื่อคำนวณหาค่า ΔE มีค่าอยู่ในช่วง 15.26-23.09





ภาพที่ 14 ผลผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C



ภาพที่ 15 ผลผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C



ภาพที่ 16 ผลผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C

ตารางที่ 7 ตารางบันทึกผลการทดลองการตรวจสอบคุณภาพ

P (kPa)	T (°C)	Quality					
		H (N)	a <sub>w</sub>	Color Measurement			
				L*	a*	b*	ΔE
	50	1.63±0.70 <sup>e</sup>	0.523±0.05 <sup>a</sup>	63.14±7.62 <sup>ab</sup>	6.91±3.14 <sup>a</sup>	52.24±3.92 <sup>a</sup>	21.29±5.66
5	60	3.70±0.63 <sup>b</sup>	0.325±0.22 <sup>b</sup>	63.66±5.79 <sup>ab</sup>	11.14±2.63 <sup>a</sup>	52.96±6.33 <sup>a</sup>	22.68±5.39 <sup>a</sup>
	70	4.98±1.34 <sup>a</sup>	0.278±0.03 <sup>b</sup>	68.71±6.23 <sup>ab</sup>	7.17±4.68 <sup>a</sup>	49.13±10.86 <sup>a</sup>	15.26±6.85 <sup>a</sup>
10	50	1.31±0.09 <sup>e</sup>	0.563±0.03 <sup>a</sup>	67.04±3.52 <sup>ab</sup>	10.45±2.05 <sup>a</sup>	54.88±4.66 <sup>a</sup>	21.15±1.41 <sup>a</sup>
	60	2.51±0.13 <sup>d</sup>	0.488±0.05 <sup>a</sup>	64.03±9.21 <sup>ab</sup>	7.28±2.66 <sup>a</sup>	53.59±5.23 <sup>a</sup>	22.79±1.51
	70	3.02±0.06 <sup>f</sup>	0.315±0.06 <sup>b</sup>	65.24±6.67 <sup>ab</sup>	9.45±2.89 <sup>a</sup>	55.81±4.22 <sup>a</sup>	23.09±0.36 <sup>a</sup>
15	50	0.70±0.35 <sup>b</sup>	0.590±0.08 <sup>a</sup>	69.61±7.58 <sup>ab</sup>	11.75±4.46 <sup>a</sup>	57.11±6.56 <sup>a</sup>	21.07±4.57 <sup>a</sup>
	60	2.37±0.51 <sup>d</sup>	0.490±0.03 <sup>a</sup>	61.98±6.78 <sup>b</sup>	10.12±3.67 <sup>a</sup>	51.71±7.51 <sup>a</sup>	22.20±0.70 <sup>a</sup>
	70	2.78±0.01 <sup>cd</sup>	0.372±0.01 <sup>b</sup>	71.71±0.14 <sup>a</sup>	6.32±1.70 <sup>a</sup>	53.16±3.56 <sup>a</sup>	16.78±1.10 <sup>a</sup>
Ref. Product		5.39	0.230	78.92	3.53	38.42	-

หมายเหตุ: 1. ตัวอักษรพิมพ์เล็กหมายถึงการเปรียบเทียบความแตกต่างของลักษณะคุณภาพต่าง ๆ ระหว่างตัวอย่างในแนวตั้ง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี Duncan Multiple Range Test (DMRT)

2. เมื่อ L<sub>0</sub> = 78.92, a<sub>0</sub> = 3.53 และ b<sub>0</sub> = 38.42

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติด้วยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) พบว่า ที่สภาวะ 5 kPa 70 °C มีค่าความแข็ง ค่าวอเตอร์แอกติวิตี และค่า  $\Delta E$  แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันกับผลิตภัณฑ์อ้างอิงมากที่สุด เมื่อทำการวิเคราะห์ผลของความดันและอุณหภูมิพบว่า ที่ความดันแตกต่างกันส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ แต่ที่อุณหภูมิต่างกันไม่ส่งผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ เมื่อทำการวิเคราะห์ผลของตัวแปรพร้อมกัน พบว่าส่งผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ ผลการศึกษาทั้งหมดที่กล่าวมาสามารถสรุปผลของตัวอย่างมะม่วงอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด (Vacuum infrared drying, VID) ที่สภาวะความดันสัมบูรณ์ 5 kPa อุณหภูมิ 70 °C ได้คุณภาพดีที่สุด คือ มีค่า Hardness เท่ากับ 4.98 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี เท่ากับ 0.278 และค่า  $\Delta E$  เมื่อเทียบคุณภาพกับผลิตภัณฑ์อ้างอิง เท่ากับ 15.26

#### 4.4 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

**ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ** (Specific energy consumption, SEC) การเปรียบเทียบค่าพลังงานต่าง ๆ ที่ใช้ในการอบแห้ง คำนวณจากสมการที่ 9 ดังตารางที่ 8 เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติด้วยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) พบว่า ที่สภาวะ 5 kPa 70 °C แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด เนื่องจากมีระยะเวลาในการทดสอบสั้นที่สุด และการทำงานของปั๊มสุญญากาศเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ที่ความดันต่ำสุดทำให้จุดเดือดของน้ำลดลง ส่งผลให้น้ำระเหยออกได้ไวขึ้น เมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ ทำให้ลดระยะเวลาการอบแห้ง และส่งผลให้ปั๊มสุญญากาศทำงานลดลง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานก็จะลดลงไปด้วย

**ตารางที่ 8** ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งมะม่วงด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

P (kPa)	T (°C)	M <sub>w</sub> (kg)	E <sub>total</sub> (kWh)	SEC (kWh/kg)
5	50	0.080	4.89	61.16 <sup>b</sup>
	60	0.085	4.07	48.13 <sup>c</sup>
	70	0.079	3.02	38.44 <sup>d</sup>
10	50	0.084	6.80	80.57 <sup>a</sup>
	60	0.078	4.69	60.15 <sup>b</sup>
	70	0.083	4.08	48.91 <sup>c</sup>
15	50	0.082	6.83	83.30 <sup>a</sup>
	60	0.081	4.90	60.46 <sup>b</sup>
	70	0.084	4.13	49.15 <sup>c</sup>

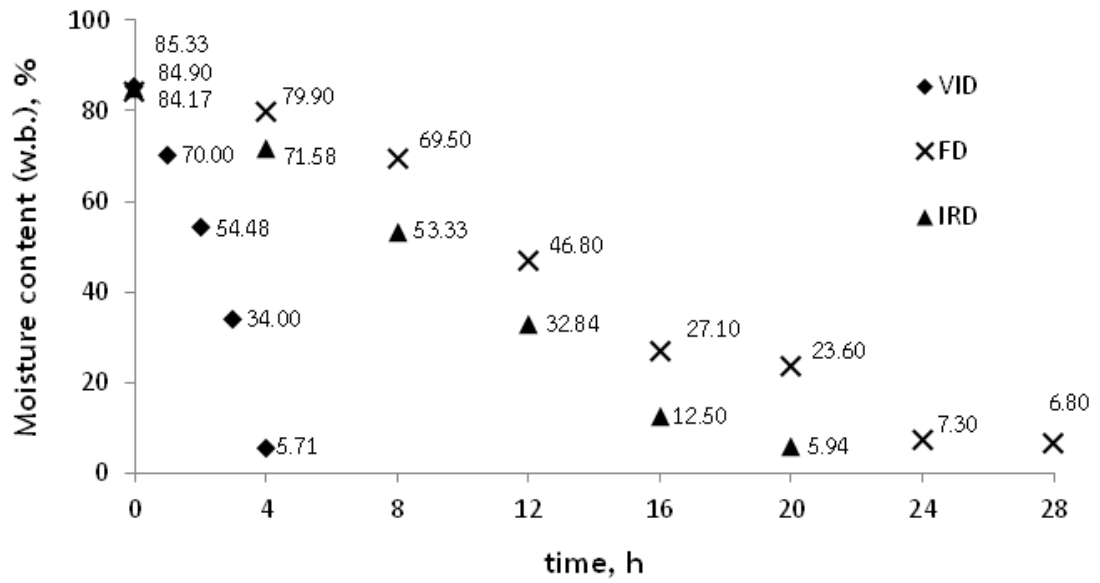
**หมายเหตุ:** ตัวอักษรพิมพ์เล็กหมายถึงการเปรียบเทียบความแตกต่างของลักษณะคุณภาพต่าง ๆ ระหว่างตัวอย่างในแนวตั้งที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี Duncan Multiple Range Test (DMRT)

#### 4.5 การเปรียบเทียบรูปแบบการอบแห้งชนิดต่างๆ

##### 4.5.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

การอบแห้งโดยทั่วไปนั้นมีปัจจัยต่าง ๆ เข้ามาเกี่ยวข้อง ในการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดนั้นมีด้วยกัน 2 ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ความดัน และอุณหภูมิ ในหัวข้อที่ 4.2 ได้กล่าวถึงจลนพลศาสตร์การอบแห้งของมะม่วงแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด พบว่า อุณหภูมิ และความดัน เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง โดยทำการเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และอัตราการอบแห้งของการอบแห้งมะม่วงแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด (VID) แบบแช่เยือกแข็ง (FD) และแบบอินฟราเรด (IRD) จากภาพที่ 17 จะเห็นได้ชัดเจนว่าการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 9 ในการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด คือ 4.7 ชั่วโมง ซึ่งแตกต่างจากการอบแห้งมะม่วงแบบแช่เยือกแข็ง และแบบอินฟราเรด 23.3 ชั่วโมง คิดเป็น 83.21% และ 15.3 ชั่วโมง คิดเป็น 76.5% ตามลำดับ จากภาพที่ 18-20 อัตราการอบแห้งของมะม่วงลดลง โดยช่วงแรกอัตราการอบแห้งจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และเริ่มคงที่ โดยการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้งสูงสุด

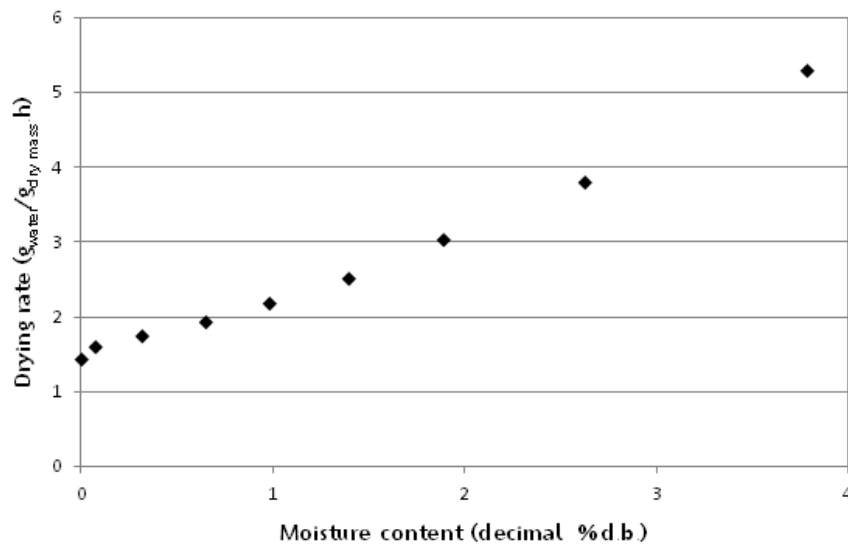




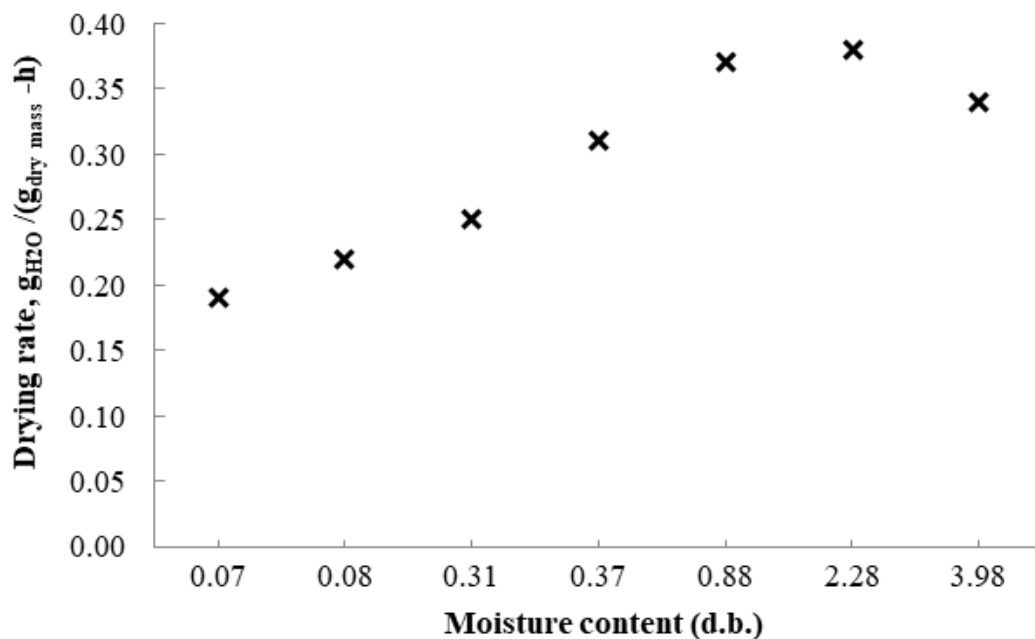
ภาพที่ 17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

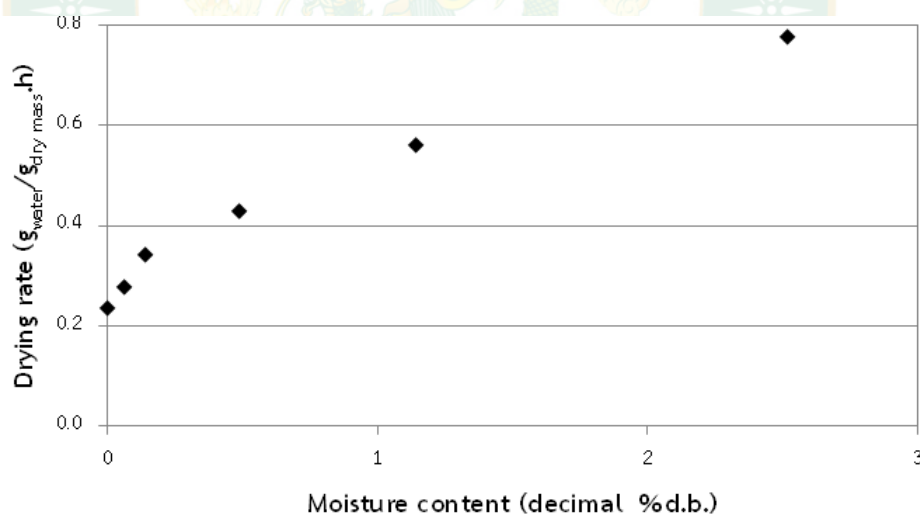
Product	Drying Kinetic	
	$D_t$ (hr)	$D_r$ ( $\text{g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry mass}}\cdot\text{h}$ )
VID	4.7	3.030
FD	28	0.294
IRD	20	0.437



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้ง (VID)



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้ง (FD)  
ที่มา: Kaewdam et al., 2012



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้ง (IRD)

#### 4.5.2 คุณภาพผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง

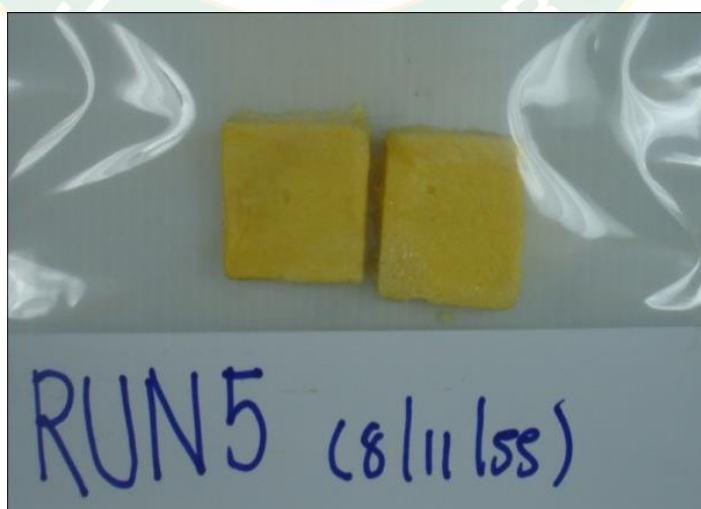
จากการอบแห้งมะม่วงแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด (Vacuum infrared drying, VID) ที่สภาวะความดันสัมบูรณ์ 5 kPa อุณหภูมิ 70 °C มาเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งมะม่วงแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dry, FD) จากบทความวิจัยของ Kaewdam et al. (2013) และการศึกษาการอบแห้งมะม่วงแบบอินฟราเรด (Infrared radiation drying, IRD) ตัวอย่างมะม่วงอบแห้งดังภาพที่ 21 – 23



เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับมะม่วงอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด ดังแสดงในตาราง 10 จะเห็นได้ว่า การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง มีค่าความแข็ง 6.18 ซึ่งมีค่าแตกต่างกับการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด 19.42% ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้เท่ากับ 0.276 ซึ่งมีค่าความแตกต่างกับการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด 0.72% และค่าสีเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์แบบแช่เยือกแข็ง มีความแตกต่างกัน 11.17 และเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองการอบแห้งมะม่วงด้วยอินฟราเรด พบว่าค่าความแข็งมีค่าเท่ากับ 3.62 ค่าความแตกต่างกับการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง 41.42% ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้เท่ากับ 0.543 ค่าความแตกต่างกับการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง 49.17% และค่า  $\Delta E$  25.73



ภาพที่ 21 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด



ภาพที่ 22 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

ที่มา: สกาวเดือน, 2557



ภาพที่ 23 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งแบบอินฟราเรด

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบคุณภาพระหว่างการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด (VID) การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FD) และการอบแห้งแบบลมร้อน (IRD)

Product	Quality					
	H (N)	a <sub>w</sub>	Color Measurement			
			L*	a*	b*	ΔE
VID	4.98	0.278	68.71	7.17	49.13	11.17
FD	6.18	0.276	79.86	4.29	42.62	-
IRD	3.62	0.543	60.09	16.90	53.22	25.73

จากการศึกษาที่ผ่านมาสรุปได้ว่า การอบแห้งมะม่วงแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดมีคุณภาพใกล้เคียงกับการอบแห้งมะม่วงแบบแช่เยือกแข็ง และมีคุณภาพดีกว่าการอบแห้งมะม่วงด้วยอินฟราเรด เนื่องจากมีค่าความแตกต่างไม่มากนัก จึงกล่าวได้ว่า ผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดที่สภาวะที่เหมาะสมสามารถผลิตขายในเชิงการค้าได้จริงเทียบเท่ากับผลิตภัณฑ์ที่มีวางขายอยู่แล้วในปัจจุบัน

#### 4.5.3 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

เมื่อเปรียบเทียบมะม่วงอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด กับการอบแห้งมะม่วงแบบแช่เยือกแข็ง (Kaewdam, 2012) ซึ่งมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 253.07 kWh/kg<sub>water</sub> สามารถทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงถึง 84.81% และระยะเวลาลดลงถึง 23.3 ชั่วโมง และเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบอินฟราเรด สามารถลดระยะเวลาได้ถึง 15.3 ชั่วโมง และลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้ถึง 77.42% ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

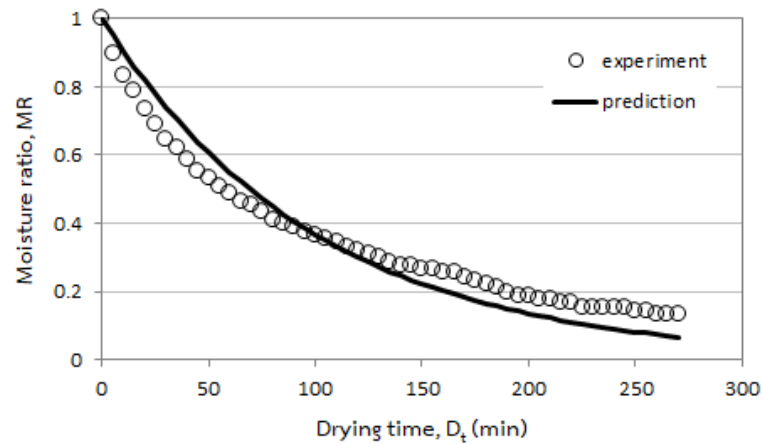
Product	D <sub>t</sub> (hr)	M <sub>w</sub> (kg)	E <sub>total</sub> (kWh)	SEC (kWh/kg)
VID	4.7	0.079	3.02	38.44
FD	28	0.083	21.03	253.07
IRD	20	0.074	12.6	170.27

#### 4.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งมะม่วงแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

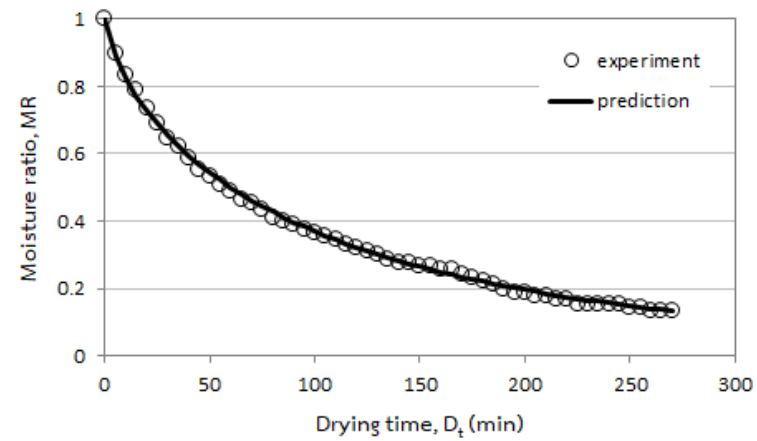
ผลจากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบต่างๆ จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลองเทียบกับแบบจำลองต่างๆ ดังตารางที่ 12 และนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟแบบจำลองได้ดัง ภาพที่ 24-33 พบว่า แบบจำลอง Modified Page มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด คือ 0.9996 ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่ามีความแม่นยำและสามารถใช้ทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งได้ ค่า RMSE มีค่าเท่ากับ 0.0005 และค่า  $\chi^2$  มีค่าเท่ากับ 0.00026 จากภาพที่ 28 จะเห็นได้ว่าแบบจำลอง Modified Page มีช่วงกระจายข้อมูลน้อยมาก แสดงให้เห็นได้ว่าแบบจำลอง Modified Page มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดและสามารถใช้ทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งได้ดีที่สุด

ตารางที่ 12 การวิเคราะห์ความแม่นยำทางสถิติของแบบจำลองต่าง ๆ

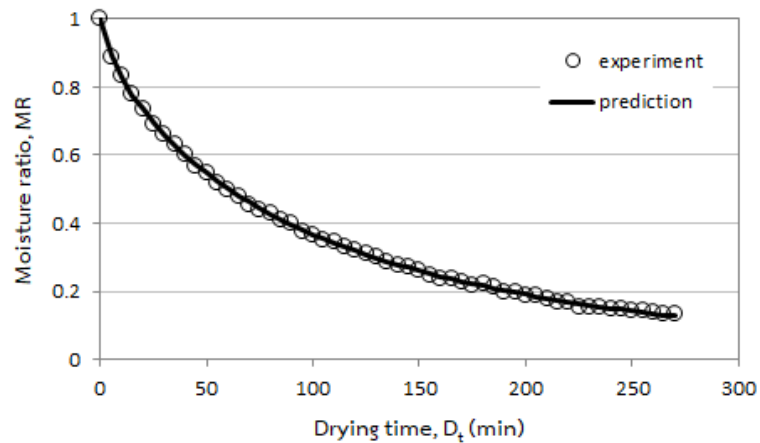
Model	k	n	a	b	c	g	h	R <sup>2</sup>	RMSE	$\chi^2$
<b>1.Newton</b> MR=exp(-kt)	0.010	-	-	-	-	-	-	0.9498	0.0075	1.0x10 <sup>-6</sup>
<b>2.Page</b> MR=exp(-kt <sup>n</sup> )	0.038	0.709	-	-	-	-	-	0.9981	0.0011	2.34x10 <sup>-8</sup>
<b>3.Modified Page</b> MR=exp((-kt) <sup>n</sup> )	0.010	0.727	-	-	-	-	-	<u>0.9996</u>	<u>0.0005</u>	<u>4.16x10<sup>-9</sup></u>
<b>4.Henderson and Pabis</b> MR=aexp(-kt)	0.008	-	0.862	-	-	-	-	0.9822	0.0037	3.64x10 <sup>-7</sup>
<b>5.Logarithmic</b> MR=aexp(-kt)+c	0.012	-	0.802	0.123	-	-	-	0.9923	0.0023	1.33x10 <sup>-7</sup>
<b>6.Wang and Singh</b> MR=1+at+bt <sup>2</sup>	-	-	-0.008	1.96x10 <sup>-5</sup>	-	-	-	0.9052	0.0095	1.63x10 <sup>-6</sup>
<b>7.Two Term</b> MR=aexp(-k <sub>1</sub> t)+bexp(-k <sub>2</sub> t)	K <sub>1</sub> =0.006 K <sub>2</sub> =0.043	-	0.675	0.316	-	-	-	0.9974	0.0013	3.19x10 <sup>-8</sup>
<b>8.Verma et al.</b> MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-gt)	0.045	-	0.320	-	-	0.006	-	0.9967	0.0015	4.05x10 <sup>-8</sup>
<b>9.Modified Henderson and Pabis</b> MR=aexp(-kt)+bexp(-gt)+cexp(-ht)	0.043	-	0.315	0.236	0.439	0.006	0.006	0.9974	0.0013	3.18x10 <sup>-8</sup>
<b>10.Midilli et al.</b> MR=aexp(-kt <sup>n</sup> )+bt	0.042	0.693	1.011	-1.72x10 <sup>-5</sup>	-	-	-	0.9984	0.0010	2.05x10 <sup>-8</sup>



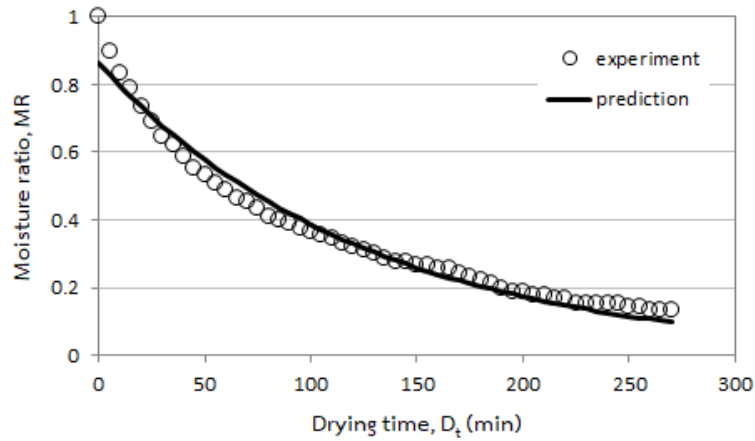
ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลอง  
เทียบกับแบบจำลอง Newton



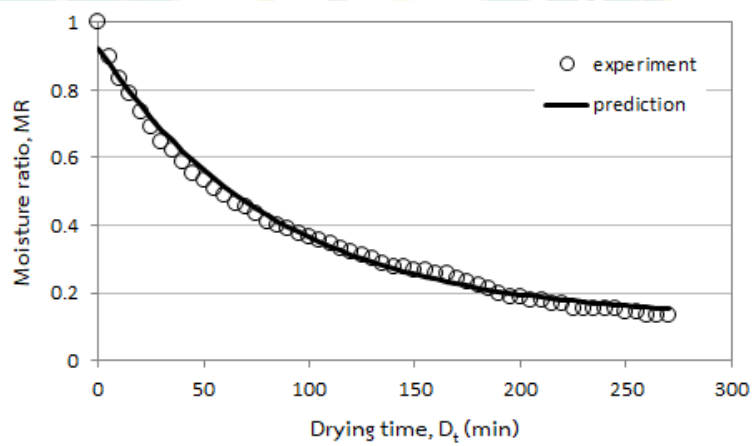
ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลอง  
เทียบกับแบบจำลอง Page



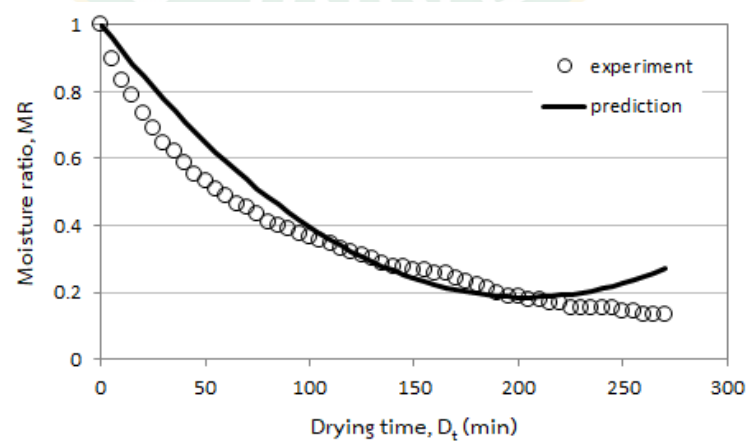
ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลอง  
เทียบกับแบบจำลอง Modified Page



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลอง  
เทียบกับแบบจำลอง Henderson and Pabis

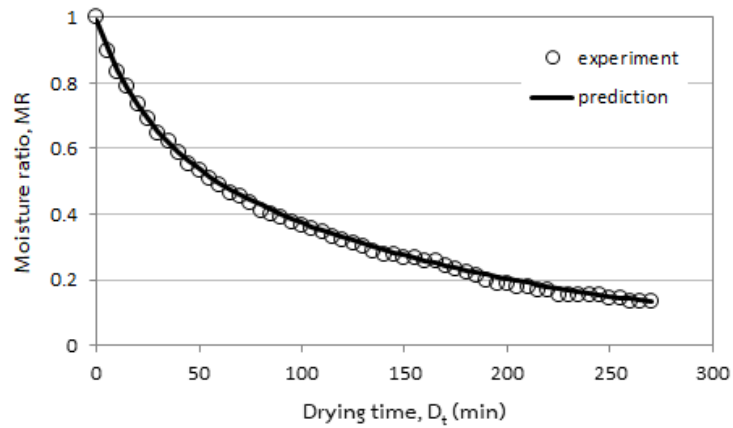


ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลอง  
เทียบกับแบบจำลอง Logarithmic

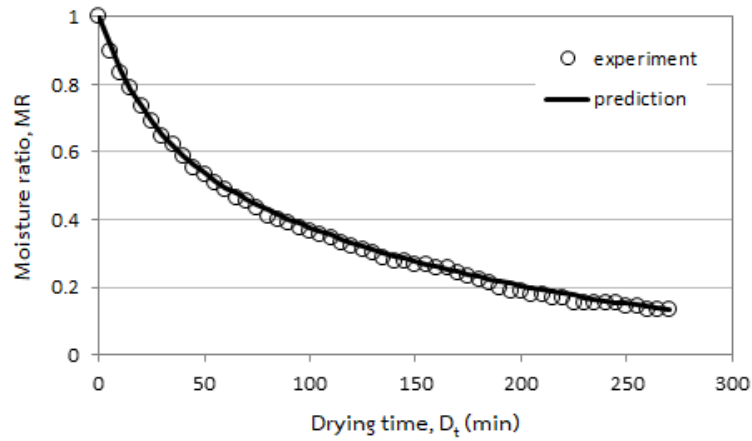


ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลอง  
เทียบกับแบบจำลอง Wang-Singh

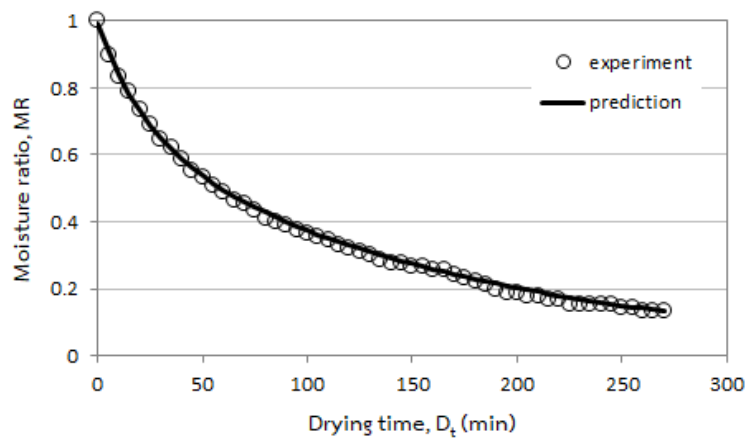




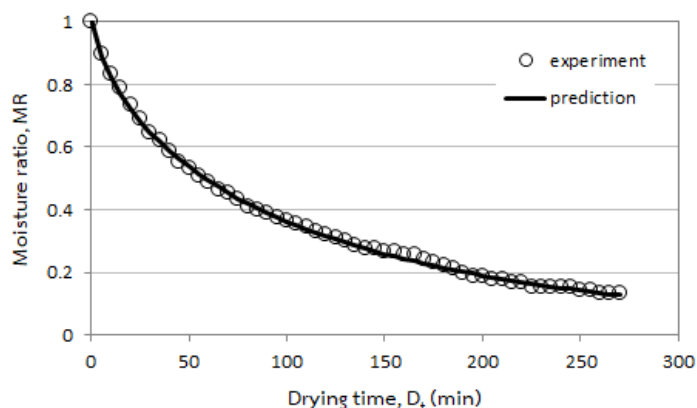
ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลอง เทียบกับแบบจำลอง Two term



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลอง เทียบกับแบบจำลอง Verma et al.



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลอง เทียบกับแบบจำลอง Modified Henderson and Pabis



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลอง เทียบกับแบบจำลอง Midili et al.

#### 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองการอบแห้งมะม่วงแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดที่สภาวะความดันสัมบูรณ์ 5 10 และ 15 kPa อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C ได้ทำการเก็บข้อมูลน้ำหนัก อุณหภูมิ และเวลา ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลได้ โดยการแก้สมการที่ละขั้นตอน เมื่อทำการคำนวณแล้ว นำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้มาเป็นตัวประมาณค่า เพื่อทำการวิเคราะห์ โดยการหาค่าเป้าหมาย ได้ผลดังตารางที่ 13 พบว่าการอบแห้งมะม่วงที่ความดันต่ำ อุณหภูมิสูง จะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมากกว่าการอบแห้งมะม่วงที่ความดันสูง อุณหภูมิต่ำ ซึ่งในการทดสอบนี้มีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงสุดคือ  $1.07 \times 10^{-7}$  ตารางที่ 14 เป็นตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งมะม่วงแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดที่สภาวะความดันสัมบูรณ์ 5 kPa อุณหภูมิ 70 °C ซึ่งเป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการทดสอบนี้ จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งมะม่วงแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เนื่องจากปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง และการหดตัว (shrinkage) ของผลิตภัณฑ์

เมื่อพิจารณาความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้น ( $\ln MR$ ) กับเวลาการอบแห้ง ( $t$ ) และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งมะม่วงด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดที่สภาวะที่เหมาะสม เมื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลกับปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง จะได้กราฟดังภาพที่ 34 โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าอยู่ในช่วง

$1.50 \times 10^{-7}$  ถึง  $9.50 \times 10^{-8}$   $\text{m}^2/\text{s}$  และมีความสัมพันธ์กับความชื้นคือ เมื่อความชื้นมีค่าลดลงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าลดลงตามไปด้วย

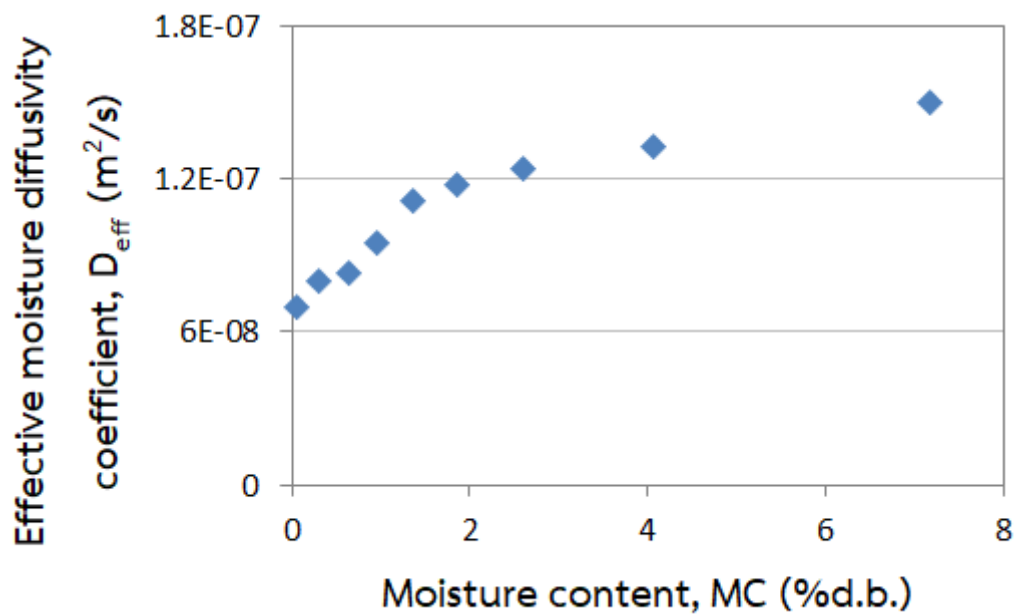
ตารางที่ 13 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

P (kPa)	T (°C)	$D_{\text{eff}}$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
0	50	3.55E-08
5	60	6.03E-08
	70	1.07E-07
	50	2.63E-08
10	60	4.81E-08
	70	7.51E-08
	50	2.63E-08
15	60	3.68E-08
	70	7.28E-08

ตารางที่ 14 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

time (s)	L (m)	MR	$D_{\text{eff}}$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
0	0.0100	1.00	0
30	0.0094	0.57	1.50E-07
60	0.0091	0.36	1.32E-07
90	0.0088	0.26	1.24E-07
120	0.0086	0.19	1.17E-07
150	0.0079	0.13	1.11E-07
180	0.0074	0.09	9.50E-08
210	0.0073	0.04	8.27E-08
240	0.0068	0.02	7.99E-08
270	0.0062	0.02	6.99E-08

หมายเหตุ: ข้อมูลจากการทดลองการอบแห้งมะม่วงแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa อุณหภูมิ 70 °C



ภาพที่ 34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล กับปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง



## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการอบแห้งมะม่วงแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดสามารถสรุปได้ดังนี้

1. อุณหภูมิและความดันมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งของมะม่วง ที่ระดับความดันเดียวกัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้อัตราส่วนความชื้นลดลงและอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น และที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน เมื่อลดความดันจะทำให้อัตราส่วนความชื้นลดลงและอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น

2. สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด คือ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ที่ความดัน 5 kPa โดยที่สภาวะดังกล่าวใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 4.67 ชั่วโมง มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 38.44 kWh/kg<sub>water</sub> อัตราการอบแห้งเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 3.03 g<sub>water</sub>/g<sub>dry mass</sub>·h

3. การอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดใช้ระยะเวลา และพลังงานในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง และแบบอินฟราเรด ทั้งยังมีคุณภาพใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์แบบแช่เยือกแข็ง

4. จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งชิ้นบางแบบจำลอง Modified Page สามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งมะม่วงแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดได้ดีที่สุด โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.9996 และค่า RMSE มีค่าเท่ากับ 0.0005 และค่า  $\chi^2$  มีค่าเท่ากับ  $4.16 \times 10^{-9}$

5. ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าอยู่ในช่วง  $1.50 \times 10^{-7}$  ถึง  $9.50 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s และมีความสัมพันธ์กับความชื้นคือ เมื่อความชื้นมีค่าลดลงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าลดลงตามไปด้วย เนื่องจากเกิดการหดตัวของชิ้นตัวอย่าง

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ก่อนการอบแห้ง ไม่ควรปอกเปลือกและหั่นมะม่วงทิ้งไว้นาน เพราะจะทำให้ผิวของมะม่วงเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล อาจมีการทำ Pretreatment ก่อนทำการทดลอง

2. ควรมีการศึกษาคุณภาพหลังการอบแห้งเพิ่มเติม ได้แก่ อัตราการคืนตัว การหดตัว (shrinkage) ปริมาณสารแคโรทีนอยด์ และวิตามินซี หรือสารอาหารอื่นร่วมด้วย

## บรรณานุกรม

- กลุ่มสื่อส่งเสริมการเกษตร. 2544. **การปลูกมะม่วง**. สำนักพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยี กรมส่งเสริมการเกษตร.
- เกศินี ระมิงวงศ์. 2530. **ผลไม้เมืองร้อน**. เชียงใหม่: คณะเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ชนันท์ ราชภูนิยม และ สุเนตร สืบคำ. 2555. การหาไอโซเทอมความชื้นของวัสดุที่แลกเปลี่ยนความชื้นได้ดี. **วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย**, 18(1), 43–51.
- ณัฐยา คนชื่อ. 2545. **การพัฒนากระบวนการผลิตมะม่วงแก้วอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์และเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ**. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ณัฐวุฒิ ไท่จันทิก, สุพรรณ ยั่งยืน และจักรมาส เลาหวนิช. 2554. การกระจายของรังสีอินฟราเรดบนระนาบราบภายในห้องอบแห้ง. **การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12 ประจำปี 2554**, 117-111.
- ทิพย์วรรณ งามศักดิ์, ปัญญา แสนไชย, และไพโรจน์, จันธานี. 2543. **การศึกษาความชอบของผู้บริโภคชาวญี่ปุ่นและจีนที่มีต่อผลมะม่วงและเนื้อมะม่วงสุกพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองและพันธุ์โชคอนันต์**. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- นิตยา, รัตนาปนนท์ และพิมพ์เพ็ญ, พรเฉลิมพงศ์. 2552. **อัตราการทำแห้ง**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.foodnetworksolution.com> (12 สิงหาคม 2560)
- . ม.ป.ป. **Phase diagram/แผนภาพเฟส**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.foodnetworksolution.com> (12 สิงหาคม 2560)
- บริษัท.สุพรีมไลน์ จำกัด. ม.ป.ป. **ฮีตเตอร์อินฟราเรด**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.supremelines.co.th> (12 สิงหาคม 2560)
- บุญเลิศ สอาดสิทธิศักดิ์. 2532. **มะม่วง**. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยพืชสวน กรมวิชาการเกษตร
- รวมพร เลี่ยมแก้ว. 2549. **การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศในการอบแห้งฟักทองแผ่น**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วัชรินทร์ ดงบัง. 2014. **รังสี อินฟราเรดและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร**. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา**, 18(2), 299-304.
- วิจิตร วังไ. 2529. **มะม่วง**. กรุงเทพฯ: ศรีสมบัติการพิมพ์ จำกัด.
- ศรินทร์ ทองอินทร์. 2558. **ปัญหาและอุปสรรคในการส่งออกมะม่วงน้ำดอกไม้ไปยังสาธารณรัฐประชาชนจีน: กรณีศึกษาผู้ประกอบการในจังหวัดฉะเชิงเทรา**. มหาวิทยาลัยบูรพา.



- ศักดิ์ชัย จงจำ และอำไพศักดิ์ ทีบุญมา. 2553. การอบแห้งหญาปักกิ่งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, 12(3), 75-85.
- ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว. ม.ป.ป. การบรรจุหีบห่อ (มะม่วง) งานวิจัยครบวงจร ศูนย์. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.phtnet.org/phtic-research/view-article.asp?alD=7>
- สกวเดือน แก้วดำ. 2557. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งมะม่วงแบบแช่เยือกแข็งเพื่อขยายขนาดกำลังการผลิตสู่ระดับอุตสาหกรรม SME. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สาวบางแค. 2559. **จับกระแสตลาดมะม่วง และภาพรวมการส่งออกมะม่วงไทย**. มติชนบทเทคโนโลยีชาวบ้าน.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2558. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผลไม้แห้ง**. มพช. 136/2558.
- สำนักงานเศรษฐกิจเกษตร. 2558. **สถิติการส่งออกสินค้าประเภทมะม่วงในปี 2557-2558**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.oae.go.th>
- อนุสรานาดี, ยุทธนา ภูริระวณิชย์กุล และสุภวรรณ ภูริระวณิชย์กุล. 2555. จลนพลศาสตร์การอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและลมร้อน. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 17(2), 130-138.
- อำไพศักดิ์ ทีบุญมา และศักดิ์ชัย จงจำ. 2553. การอบแห้งขิงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 15(2), 76-86.
- อิลีหย๊ะ สนิโซ, สะอูดี ฟามีรา และรัชดาภรณ์ ฮานาฟี. 2558. สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นความชื้นเปลือกพลังงาน และอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของการอบแห้งผลหมากด้วยพลังงาน ความร้อนร่วม. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 17(1), 142-149.
- Adak, N., Heybeli, N. and Ertekin, C. 2017. Infrared drying of strawberry. *Food Chemistry*, 219(1), 109-116.
- Assawarachan, R. 2013. จลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศของสาหร่ายเตา. *Journal Thai Society of Agricultural Engineering*, 19(1).
- Boudhrioua, N., Bahloul, N., Slimen, Imen B. and Kechaou, N. 2009. Comparison on the total phenol contents and the color of fresh and infrared dried olive leaves. *Industrial crops and products*, 29(2), 412-419.

- Chua, KJ. and Chou, SK. 2003. Low-cost drying methods for developing countries. **Trends in Food Science & Technology**, 14(12), 519-528.
- Dorota, N. and Piotr, P. L. 2004. Infrared drying of apple slices. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 5(3), 353-360.
- FLIR-THAILAND. 2013. **รังสี อินฟราเรด (อินฟราเรด) คืออะไร**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [http://thermoscanthailand.blogspot.com/2013/12/blog-post\\_9156.html](http://thermoscanthailand.blogspot.com/2013/12/blog-post_9156.html)
- Glouannec, P., Lecharpentier, D. and Noel, H. 2002. Experimental survey on the combination of radiating infrared and microwave sources for the drying of porous material. **Applied Thermal Engineering**, 22(15), 1689-1703.
- Harnkarnsujarit, N. and Sanguansri, C. 2011. Influence of collapsed structure on stability of  $\beta$ -carotene in freeze-dried mangoes. **Food research international**, 44(10), 3188-3194.
- Jaturonglumlert, S., Varith, J. and Kiatsiroat, T. 2015. Influence of drying method on drying kinetics and qualities of longan fruit leather. **Maejo International Journal of Science and Technology**, 9(1), 54-63.
- Junlakan, W. 2017. Vacuum Drying Kinetics of Mango (*Mangifera indica L.*) Slices. **Journal of Burapha Science**, 22(3), 358-373.
- Kaewdam, S., Nitatwichit, C., Varith, J. and Jaturonglumlert, S. 2013. Mathematical model of freeze drying on mango. **Journal of Agricultural Research and Extension**, 30(3), 56-67.
- Kar, A. and Gupta, DK. 2003. Air drying of osmosed button mushrooms. **Journal of food science and technology**, 40(1), 23-27.
- Koua, K., Blaise, F., Wanignon, F., Gbaha, P. and Toure, S. 2009. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of banana, mango and cassava. **Journal of Energy**, 34(10), 1594-1602.
- Mercer, DG. 2012. A comparison of the kinetics of mango drying in open-air, solar, and forced-air dryers. **African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development**, 12(7).
- Mongpraneet, S., Abe, T. and Tsurusaki, T. 2004. Kinematic model for a far infrared vacuum dryer. **Drying technology**, 22(7), 1675-1693.

- Nazmi, I., Gokcen, I. and Onur, T. 2017. Influence of different drying techniques on drying parameters of mango. **Food science and technology** (2017).
- Sasaori, N. 1988. Principle of utilization of far infrared radiation and measurement of equipment performance. **Japan Food Science**, 27(23-29).
- Swasdisevi, T., Devahastin, S., Sa-Adchom, P., and Soponronnarit, S. 2009. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice. **Journal of food Engineering** 92, 100-106.
- Vogt, M. 2007. Infrared drying lowers energy costs and drying times. **Plastics, Additives and Compounding**, 9(5), 58-61.
- www.puechkaset.com. ม.ป.ป. มะม่วงน้ำดอกไม้ สรรพคุณ และการปลูกมะม่วง น้ำดอกไม้ . [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://puechkaset.com/>
- Yunhong, L., Wenxue, Z., Lei, L., Xin, L., and Huichun, Y. 2014. A mathematical model for vacuum far-infrared drying of potato slices. **Drying technology**, 32(2), 180-189.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ภาพถ่ายชุดทดสอบการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด  
และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ภาพถ่ายชุดทดสอบการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด  
และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง



ภาพผนวกที่ 1 ชุดทดสอบการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

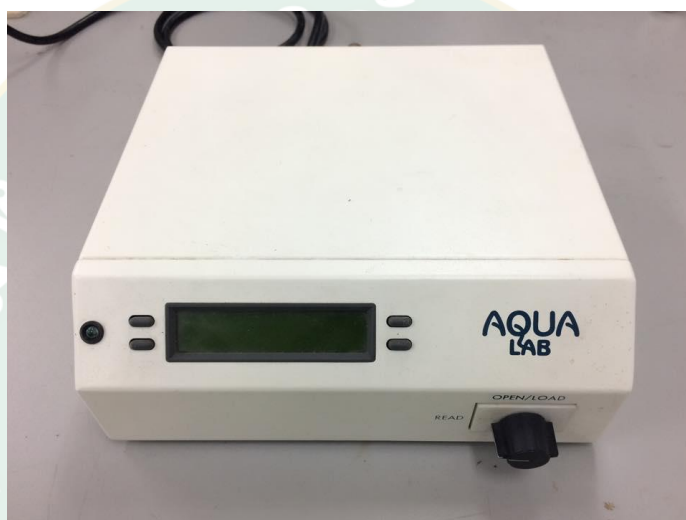


ภาพผนวกที่ 2 ปั๊มสุญญากาศ

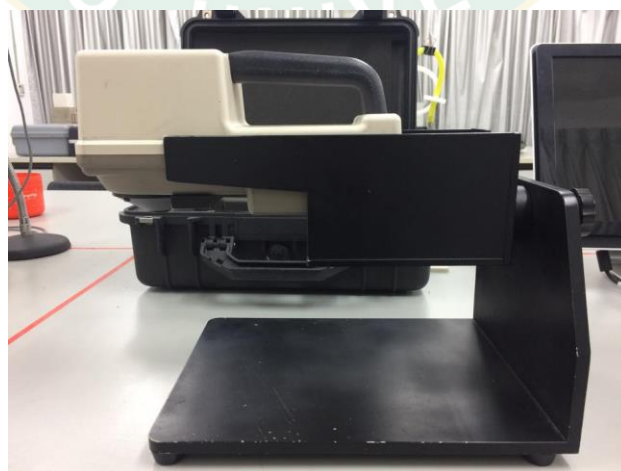




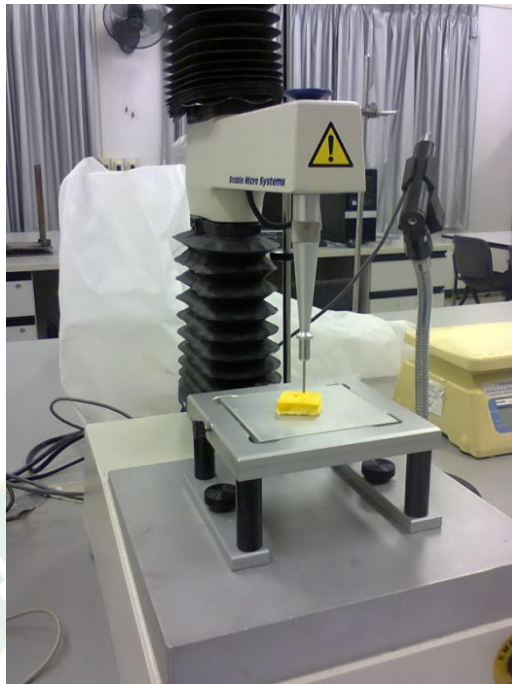
ภาพผนวกที่ 3 เครื่อง Hand refractometer



ภาพผนวกที่ 4 เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี



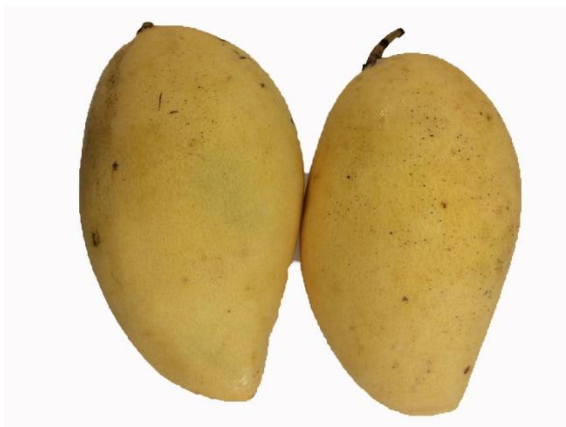
ภาพผนวกที่ 5 เครื่องวัดค่าสี



ภาพผนวกที่ 6 เครื่อง Texture analyzer



ภาพผนวกที่ 7 เครื่อง Infrared moisture determination balance



ภาพผนวกที่ 8 มะม่วงสุกพันธุ์น้ำดอกไม้ที่ใช้อบแห้ง



ภาพผนวกที่ 9 ชิ้นทดสอบก่อนการอบแห้ง



ภาพผนวกที่ 10 ชิ้นทดสอบหลังทำการอบแห้ง



ภาพผนวกที่ 11 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง



ภาคผนวก ข

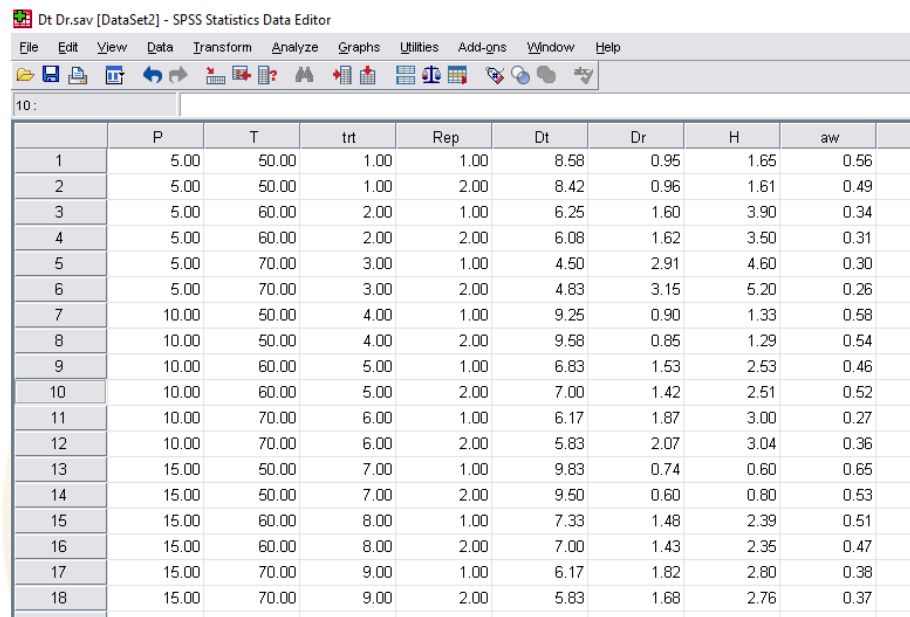
การวิเคราะห์ผลทางสถิติ



## การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

### การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ

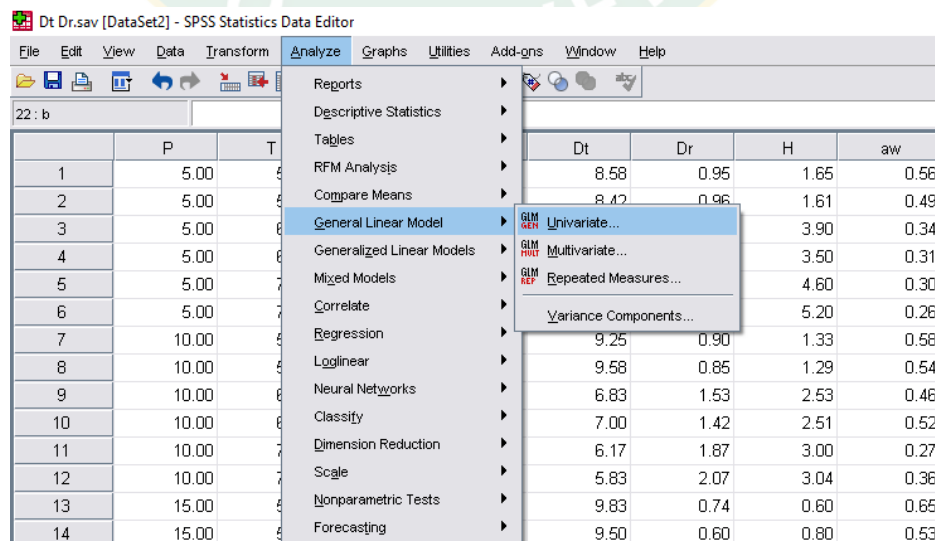
การวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป เริ่มจากการป้อนข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังภาพผนวกที่ 12



	P	T	trt	Rep	Dt	Dr	H	aw
1	5.00	50.00	1.00	1.00	8.58	0.95	1.65	0.56
2	5.00	50.00	1.00	2.00	8.42	0.96	1.61	0.49
3	5.00	60.00	2.00	1.00	6.25	1.60	3.90	0.34
4	5.00	60.00	2.00	2.00	6.08	1.62	3.50	0.31
5	5.00	70.00	3.00	1.00	4.50	2.91	4.60	0.30
6	5.00	70.00	3.00	2.00	4.83	3.15	5.20	0.26
7	10.00	50.00	4.00	1.00	9.25	0.90	1.33	0.58
8	10.00	50.00	4.00	2.00	9.58	0.85	1.29	0.54
9	10.00	60.00	5.00	1.00	6.83	1.53	2.53	0.46
10	10.00	60.00	5.00	2.00	7.00	1.42	2.51	0.52
11	10.00	70.00	6.00	1.00	6.17	1.87	3.00	0.27
12	10.00	70.00	6.00	2.00	5.83	2.07	3.04	0.36
13	15.00	50.00	7.00	1.00	9.83	0.74	0.60	0.65
14	15.00	50.00	7.00	2.00	9.50	0.60	0.80	0.53
15	15.00	60.00	8.00	1.00	7.33	1.48	2.39	0.51
16	15.00	60.00	8.00	2.00	7.00	1.43	2.35	0.47
17	15.00	70.00	9.00	1.00	6.17	1.82	2.80	0.38
18	15.00	70.00	9.00	2.00	5.83	1.68	2.76	0.37

ภาพผนวกที่ 12 การป้อนข้อมูลวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

จากนั้นเลือกวิธีในการวิเคราะห์ Analyze → General Linear Model → Univariate ดังภาพผนวกที่ 13

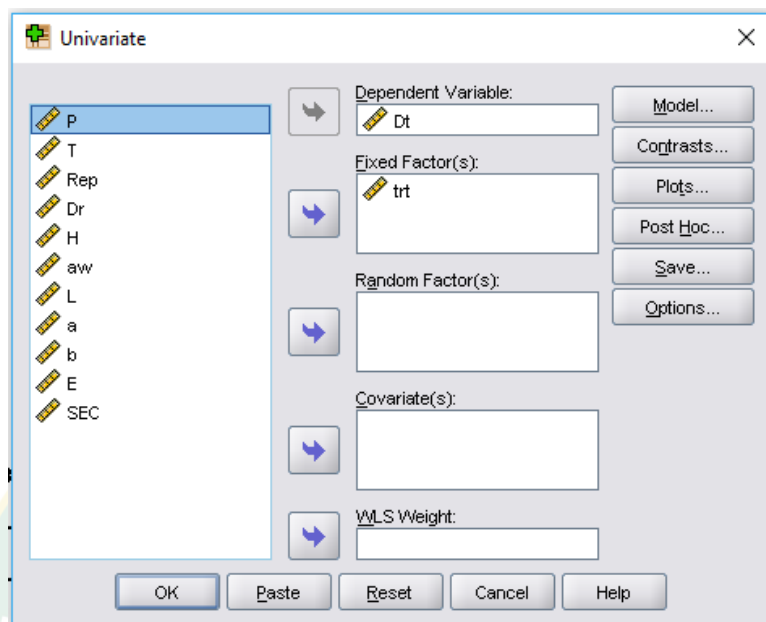


	P	T	Dt	Dr	H	aw
1	5.00		8.58	0.95	1.65	0.56
2	5.00		8.42	0.96	1.61	0.49
3	5.00		6.25	1.60	3.90	0.34
4	5.00		6.08	1.62	3.50	0.31
5	5.00		4.50	2.91	4.60	0.30
6	5.00		4.83	3.15	5.20	0.26
7	10.00		9.25	0.90	1.33	0.58
8	10.00		9.58	0.85	1.29	0.54
9	10.00		6.83	1.53	2.53	0.46
10	10.00		7.00	1.42	2.51	0.52
11	10.00		6.17	1.87	3.00	0.27
12	10.00		5.83	2.07	3.04	0.36
13	15.00		9.83	0.74	0.60	0.65
14	15.00		9.50	0.60	0.80	0.53

ภาพผนวกที่ 13 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนทางสถิติ

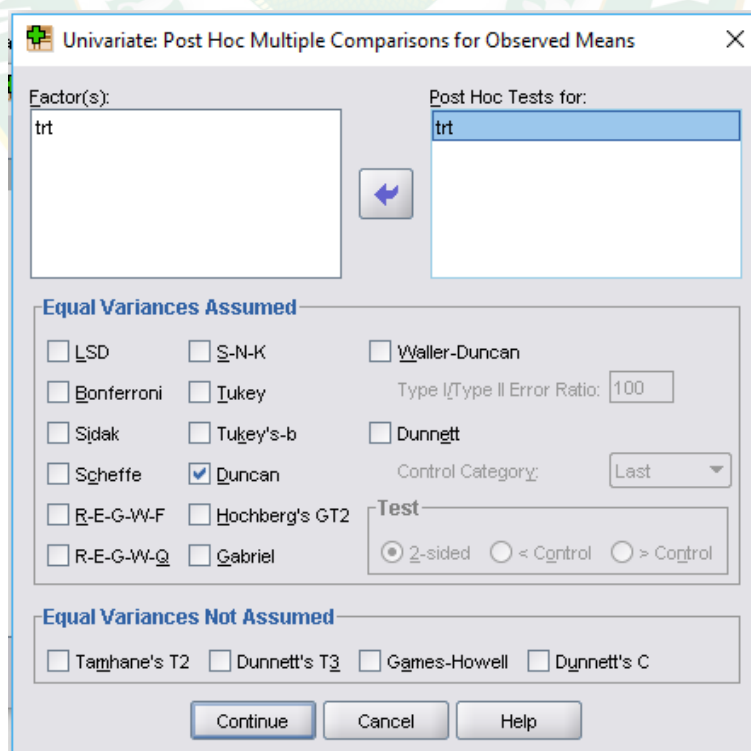


นำตัวแปรตามที่ต้องการศึกษาใส่ลงในช่อง Dependent Variable: และสิ่งที่ต้องการศึกษาใส่ลงในช่อง Fixed Factor (s) ดังภาพผนวกที่ 14



ภาพผนวกที่ 14 หน้าต่างการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ

เลือกวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติโดยกดที่ช่อง Post Hoc จากนั้นเลือกตัวแปรที่ต้องการไปทางฝั่งขวาและเลือกวิธีการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยวิธี Duncan ดังภาพผนวกที่ 15



ภาพผนวกที่ 15 การเลือกวิธีการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนทางสถิติ

**Dt**Duncan<sup>a..b</sup>

trt	N	Subset				
		1	2	3	4	5
3.00	2	4.6650				
6.00	2		6.0000			
9.00	2		6.0000			
2.00	2		6.1650			
5.00	2			6.9150		
8.00	2			7.1650		
1.00	2				8.5000	
4.00	2					9.4150
7.00	2					9.6650
Sig.		1.000	.459	.252	1.000	.252

ภาพผนวกที่ 16 ผลการวิเคราะห์ค่า Drying time, D<sub>t</sub>**Dr**Duncan<sup>a..b</sup>

trt	N	Subset					
		1	2	3	4	5	6
7.00	2	.6700					
4.00	2	.8750	.8750				
1.00	2		.9550				
8.00	2			1.4550			
5.00	2			1.4750			
2.00	2			1.6100	1.6100		
9.00	2				1.7500		
6.00	2					1.9700	
3.00	2						3.0300
Sig.		.054	.410	.144	.165	1.000	1.000

ภาพผนวกที่ 17 ผลการวิเคราะห์ค่า Drying rate, D<sub>r</sub>

**H**

Duncan<sup>a..b</sup>

trt	N	Subset					
		1	2	3	4	5	6
7.00	2	.7000					
4.00	2		1.3100				
1.00	2		1.6300				
8.00	2			2.3700			
5.00	2			2.5200			
9.00	2			2.7800	2.7800		
6.00	2				3.0200		
2.00	2					3.7000	
3.00	2						4.9000
Sig.		1.000	.105	.054	.210	1.000	1.000

ภาพผนวกที่ 18 ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็ง (Hardness, H)

**aw**

Duncan<sup>a..b</sup>

trt	N	Subset	
		1	2
3.00	2	.2780	
6.00	2	.3150	
2.00	2	.3245	
9.00	2	.3750	
5.00	2		.4875
8.00	2		.4900
1.00	2		.5230
4.00	2		.5625
7.00	2		.5895
Sig.		.069	.061

ภาพผนวกที่ 19 ผลการวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ (Water activity,  $a_w$ )

L

Duncan<sup>a..b</sup>

trt	N	Subset	
		1	2
8.00	2	61.9850	
1.00	2	63.1400	63.1400
2.00	2	63.6600	63.6600
5.00	2	64.0300	64.0300
6.00	2	65.2350	65.2350
4.00	2	67.0450	67.0450
3.00	2	68.7100	68.7100
7.00	2	69.6150	69.6150
9.00	2		71.7100
Sig.		.099	.069

ภาพผนวกที่ 20 ผลการวิเคราะห์ค่า L\*

a

Duncan<sup>a..b</sup>

trt	N	Subset
		1
9.00	2	6.3200
1.00	2	6.9050
3.00	2	7.1700
5.00	2	7.2800
6.00	2	9.4500
8.00	2	10.1150
4.00	2	10.4450
2.00	2	11.1450
7.00	2	11.7500
Sig.		.191

ภาพผนวกที่ 21 ผลการวิเคราะห์ค่า a\*

b

Duncan<sup>a..b</sup>

trt	N	Subset
		1
3.00	2	49.1300
8.00	2	51.7100
1.00	2	52.2400
2.00	2	52.9600
9.00	2	53.1600
5.00	2	53.5950
4.00	2	54.8750
6.00	2	55.8150
7.00	2	57.1150
Sig.		.194

ภาพผนวกที่ 22 ผลการวิเคราะห์ค่า b\*

## E

Duncan<sup>a..b</sup>

trt	N	Subset		
		1	2	3
3.00	2	15.4300		
9.00	2	15.8900		
1.00	2		21.3000	
4.00	2		21.7250	
2.00	2		22.1900	22.1900
7.00	2		22.6850	22.6850
5.00	2		23.0950	23.0950
6.00	2		23.4950	23.4950
8.00	2			24.5000
Sig.		.648	.069	.056

ภาพผนวกที่ 23 ผลการวิเคราะห์ค่า  $\Delta E$ 

## SEC

Duncan<sup>a..b</sup>

trt	N	Subset			
		1	2	3	4
3.00	2	38.4450			
2.00	2		48.1250		
6.00	2		48.9100		
9.00	2		49.1500		
5.00	2			60.1500	
8.00	2			60.4600	
1.00	2			61.1600	
4.00	2				80.5700
7.00	2				83.3050
Sig.		1.000	.694	.698	.287

ภาพผนวกที่ 24 ผลการวิเคราะห์ค่า SEC

## การวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น

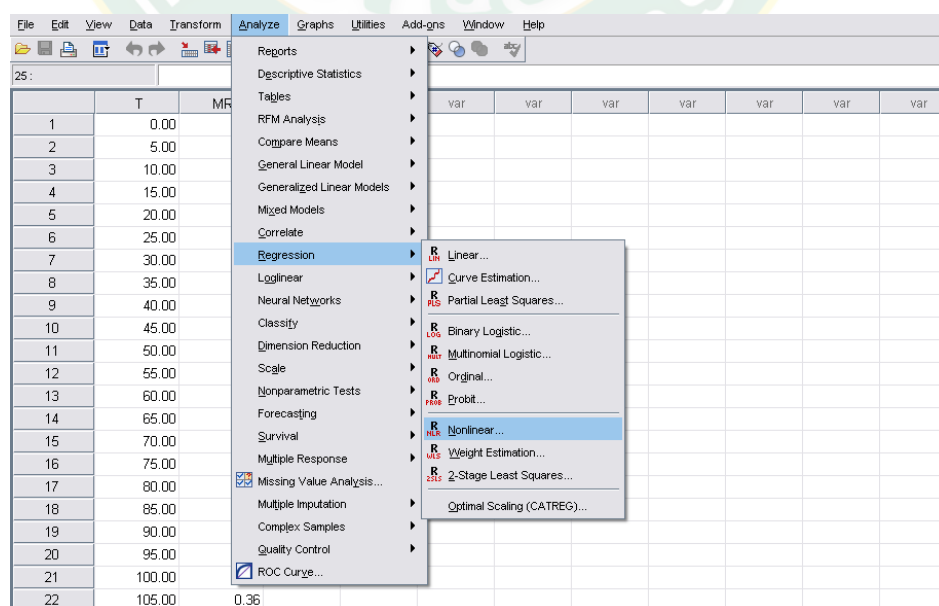
การวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป เริ่มจากการป้อนข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังภาพผนวกที่ 1

	T	MR	var	var	var	var	var
1	0.00	1.00					
2	5.00	0.90					
3	10.00	0.83					
4	15.00	0.79					
5	20.00	0.73					
6	25.00	0.69					
7	30.00	0.64					
8	35.00	0.62					
9	40.00	0.59					
10	45.00	0.56					
11	50.00	0.53					
12	55.00	0.51					

ภาพผนวกที่ 25 การป้อนข้อมูล

จากนั้นเลือกวิธีในการวิเคราะห์ Analyze → Regression → Nonlinear ดังภาพผนวก

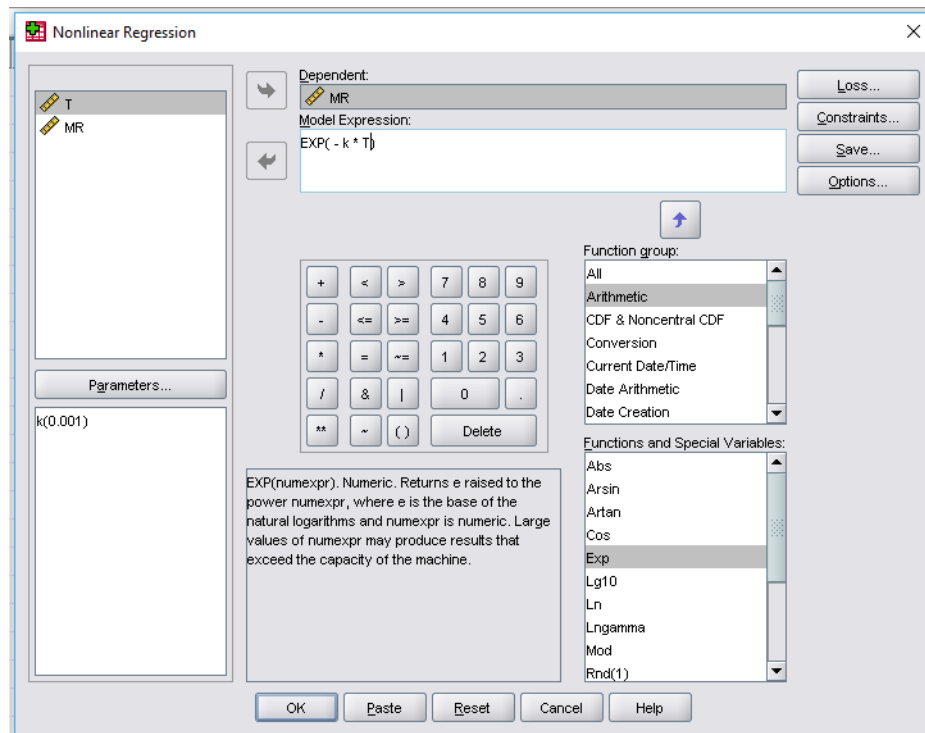
ที่ 13



ภาพผนวกที่ 26 การเลือกวิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น



วิเคราะห์หาค่าคงที่  $k$  โดยการป้อนสมการ และกำหนดค่าเริ่มต้นในการวิเคราะห์ ดังภาพ  
 ผนวกที่ 14 และแสดงผลการวิเคราะห์ดังภาพผนวกที่ 15



ภาพผนวกที่ 27 การป้อนสมการในการวิเคราะห์และค่าเริ่มต้นของค่าคงที่  $k$

#### Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
k	.010	.000	.009	.010

#### ANOVA<sup>a</sup>

Source	Sum of Squares	df	Mean Squares
Regression	9.403	1	9.403
Residual	.165	54	.003
Uncorrected Total	9.568	55	
Corrected Total	2.505	54	

Dependent variable: MR

a. R squared = 1 - (Residual Sum of Squares) / (Corrected Sum of Squares) = .934.

ภาพผนวกที่ 28 ผลการวิเคราะห์ค่า  $k$



ภาคผนวก ค

เอกสารเผยแพร่งานวิจัย



# การถ่ายทอด พลังงานความร้อนและมวล

ในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 17

วันที่ 15-16 กุมภาพันธ์ 2561

ณ ลำปาง รีสอร์ท อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง

การประชุมวิชาการ เรื่อง การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล  
ในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 17)  
ระหว่างวันที่ 15-16 กุมภาพันธ์ 2561  
ณ ลำปางรีสอร์ท อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง

## จลนพลศาสตร์การอบแห้งมะม่วงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด DRYING KINETIC OF MANGO USING VACUUM-INFRARED TECHNIQUE

ชญาณีศ รัตนมงคล

ชนวัฒน์ นันทน์วิจิตร

พิสุทธิ์ กลิ่นขจร

หยาดฝน ทนงการกิจ

สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ\*

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่

\* Corresponding Author: yaidragon@mju.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งมะม่วงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด โดยทำการศึกษาภายใต้เงื่อนไขความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 kPa และอุณหภูมิผลิตภัณฑ์อบแห้ง 50, 60 และ 70 °C จากการศึกษาพบว่า การอบแห้งมะม่วงที่สภาวะสุญญากาศทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น เมื่อทำการลดความดันและเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้ง จะมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ  $0.04 \frac{g_{water}}{g_{dry\ mass} \cdot min}$  หลังการอบแห้งผลิตภัณฑ์มีความแข็งและค่าเอนทัลปีเท่ากับ  $4.98 \text{ N } 0.278$  ตามลำดับ ส่วนค่าสี  $L^* a^*$  และ  $b^*$  เท่ากับ 68.71, 7.17 และ 49.13 ตามลำดับ ส่วนค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 38.44 kWh/kg นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งชั้นบางยังพบว่าแบบจำลอง Modified Page สามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งได้ดี โดยสามารถนำพารามิเตอร์ที่ได้ดังกล่าวไปศึกษาต่อถึงการขยายขนาดการผลิตเชิงการค้า ทั้งด้านการผลิตและการลงทุน

**คำสำคัญ :** จลนพลศาสตร์การอบแห้ง, การอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด, มะม่วง

**Abstract**

This research aimed to study mango cultivar “Nam dok mai” drying using vacuum-infrared technique. The experiments were carried out under the conditions of drying absolute pressures in drying chamber of 5, 10, 15 kPa and product temperature of 50, 60 and 70 °C. From experimental results, it was revealed that the drying rate for mango drying under vacuum could be increased with reduction of pressure and increase of drying temperature. The average drying rate was  $0.04 \frac{g_{water}}{g_{dry\ mass} \cdot min}$ . After drying, the quality of the mangoes was determined. The value of hardness and the water activity were 21.60 N 0.278 respectively. The colors  $L^* a^*$  and  $b^*$  value were 68.71, 7.17 and 49.13 respectively. The specific energy consumption was 38.44 kWh/kg. Furthermore, it was found that among thin layer mathematical models, the Modified Page model could fit the experimental data quite well. These parameters can be used as guidelines to scale-up the unit into commercial scale for both production and investment.

**Key Word:** Drying kinetic, Vacuum-Infrared Drying, Mango



## 1. บทนำ

มะม่วง (*Mangifera indica* Linn) มีถิ่นกำเนิดในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เป็นผลไม้เขตร้อนไม้ผลัดใบที่ปลูกกันอย่างแพร่หลายทุกที่ของประเทศไทย มะม่วงสามารถแบ่งตามลักษณะการบริโภคได้ 3 ประเภท คือ มะม่วงแบบรับประทานสด มะม่วงแบบรับประทานดิบ และมะม่วงที่ผ่านกระบวนการแปรรูป [1] ซึ่งสามารถนำมะม่วงมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายชนิด ไม่ว่าจะเป็น น้ำมะม่วง มะม่วงกวน มะม่วงเชื่อม มะม่วงแช่แข็ง และมะม่วงอบแห้ง เป็นต้น ในปัจจุบันมะม่วงเป็นสินค้าส่งออกที่มีมูลค่าสูง โดยประเทศไทยมีส่วนแบ่งทางการตลาดเป็นอันดับที่ 9 ของโลก ประเทศไทยมีการส่งออกมะม่วงเพิ่มขึ้นทุกปี ปีละประมาณ 65,432 ตัน คิดเป็นมูลค่า 3,150 พันล้านบาท [2] และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี ตลาดส่งออกผลมะม่วงสดที่สำคัญของไทยได้แก่ จีน เกาหลี ใต้หวัน ส่วนประเทศพัฒนาแล้ว เช่น ประเทศประชาคมยุโรป ญี่ปุ่น อเมริกา และออสเตรเลีย ยังเป็นตลาดใหม่ที่ห้ามมีแนวโน้มการส่งออกได้ดีเช่นกัน เนื่องจากราคามะม่วงในท้องตลาดของประเทศเหล่านี้ค่อนข้างสูง ชาวจีนและชาวญี่ปุ่นมีความชื่นชอบมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้มากที่สุด [3] เนื่องจากมะม่วงพันธุ์นี้ เมื่อสุกจะมีรสชาติหวาน เนื้อละเอียด กลิ่นหอม เส้นใยน้อย เมล็ดลีบแบน จะเห็นได้ว่าประเทศไทยสามารถผลิต และพัฒนาผลิตภัณฑ์แปรรูปจากมะม่วงเพื่อการส่งออกให้สามารถแข่งขันกับตลาดโลกได้ดียิ่งขึ้น ทั้งด้านกระบวนการและคุณภาพการผลิต

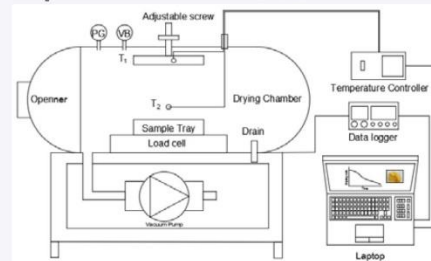
การอบแห้งหรือกระบวนการลดความชื้น ส่วนใหญ่ใช้หลักการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุ เพื่อให้ความชื้นออกโดยการระเหย เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการอบแห้งเก็บรักษาได้ยาวนาน [4] ในปัจจุบันเทคโนโลยีการอบแห้งได้มีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง และการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี แต่ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนาน รวมทั้งมีต้นทุนในการผลิตสูง และการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดนั้น ทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์มีจุดเดือดลดต่ำลง อินฟราเรดช่วยให้ความร้อนทะลุผ่านพื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งทำให้น้ำภายในผลิตภัณฑ์ระเหยออกมาได้ดียิ่งขึ้น โดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้งต่ำ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพใกล้เคียงกับวัตถุดิบเดิมอีกด้วย ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกลของมะม่วง เพื่อเป็นแนวทางในการขยายขนาดการผลิตอุตสาหกรรม

## 2. อุปกรณ์และการวิธีการทดลอง

### 2.1 อุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 1 แสดงรายละเอียดชุดทดลอง ซึ่งประกอบด้วยห้องอบแห้ง (Drying chamber) ขนาดห้องปฏิบัติการ เส้นผ่านศูนย์กลาง 35 เซนติเมตร ยาว 90 เซนติเมตร วางตัวในแนวนอน ฝาเปิดด้านข้าง

(Opener) ภายในห้องอบแห้งประกอบด้วยแผ่นอินฟราเรดชนิดไกล (Far-infrared heater,  $T_1$ ) 1,000 W ติดอยู่ด้านบนของห้องอบแห้ง พร้อมก้านปรับระดับ (Adjustable screw) ใช้หัววัดอุณหภูมิชนิด K (Thermocouple type K,  $T_2$ ) ซึ่งต่อกับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) ใช้ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ในการทำสภาวะสุญญากาศในห้องอบแห้ง โดยต่อเข้ากับอุปกรณ์วัดความดัน (Pressure gauge, PG) วาล์วป้องกันสุญญากาศ (Vacuum breaker, VB) และท่อสำหรับระบายน้ำออก (Drain) ด้านล่างมีถาดสำหรับวางตัวอย่าง (Sample tray) โดยใช้โหลดเซลล์ (Load cell) ในการชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ขณะทำการอบแห้ง พร้อมชุดบันทึกข้อมูล (Data logger) และเก็บข้อมูลไว้ในคอมพิวเตอร์แบบพกพา (Laptop)



รูปที่ 1 แผนภูมิชุดทดสอบการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

### 2.2 วิธีการทดลอง

คัดเลือกมะม่วงสุกพันธุ์น้ำดอกไม้ (Mango, Nam dok mai) ที่มีขนาด สีเปลือก และปริมาณของแข็งที่ละลายได้อยู่ในช่วง 16-20 °Brix [5] มาล้างทำความสะอาดและปอกเปลือกออก หั่นมะม่วงให้มีขนาดความกว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 30 มิลลิเมตร และหนา 10 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2 หลังจากนั้นนำชิ้นมะม่วงใส่ถาดเพื่ออบแห้งปริมาณ 100 กรัม ที่ความชื้นเริ่มต้น 450-650 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห่งทำการอบจนกระทั่งน้ำหนักของมะม่วงคงที่และมีความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 6 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห่ง โดยมีเงื่อนไขในการทดลองคือ ความดันสัมบูรณ์ 5 10 และ 15 kPa และอุณหภูมิอบแห้งที่ 50 60 และ 70 °C ในระหว่างทำการทดลองได้บันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก และอุณหภูมิอบแห้งทุก ๆ 5 นาที



รูปที่ 2 ชิ้นมะม่วงตัวอย่าง (a) ก่อนทำการทดลอง (b) หลังทำการทดลอง

### 3. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 3.1 การวิเคราะห์ผลผลิตศาสตร์การอบแห้ง

จากการศึกษาจนผลผลิตศาสตร์การอบแห้งของมะม่วงจากการทดลองที่ความชื้นของมะม่วงเริ่มต้น 450-650 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง โดยความชื้นของผลิตภัณฑ์คำนวณได้จากสมการ (1)

$$MC = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้น (%dry basic)

$W_w$  คือ มวลของวัสดุ (g)

$W_d$  คือ มวลของวัสดุแห้ง (g)

การวิเคราะห์การอบแห้งนอกจากค่าความชื้น (Moisture content, MC) ยังมีค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุ เทียบกับความชื้นเริ่มต้น เมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินไปเป็นเวลาใด ๆ คือ อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) [6] โดยอัตราส่วนความชื้นสามารถหาได้จากสมการ (2)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_o - M_{eq}} \times 100\% \quad (2)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (-)

$M_t$  คือ ความชื้นฐานแห้งที่เวลาใด ๆ (decimal % d.b.)

$M_o$  คือ ความชื้นฐานแห้งที่เวลาเริ่มต้น (decimal % d.b.)

$M_{eq}$  คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ (decimal % d.b.) [7]

ทั้งนี้ อัตราการอบแห้ง (Drying rate, D) คือ มวลของเหลวที่ระเหิดต่อพื้นที่ที่เกิดการระเหยต่อเวลา จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเครื่องอบแห้ง คุณสมบัติของวัสดุ และขนาดของวัสดุที่ต้องการอบแห้ง ซึ่งมีผลอย่างมากต่อการ โดยสามารถคำนวณหาอัตราการอบแห้ง (D) จากสมการ (3)

$$D = \frac{M_i - M_f}{t} \quad (3)$$

เมื่อ D) คือ อัตราการอบแห้ง ( $g_{moisture}/g_{dry\_matter} \cdot min.$ )

$M_i$  คือ ความชื้นเริ่มต้น (% d.b.)

$M_f$  คือ ค่าความชื้นที่เวลาใด ๆ (% d.b.)

t คือ เวลาในการอบแห้ง (min)

#### 3.2 การวิเคราะห์คุณภาพหลังการอบแห้ง

วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of variance, ANOVA) ด้วยโปรแกรม SPSS for Window Version 17 ของคำสั่งสังเกต ทุกค่า และหากผลการวิเคราะห์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจะมีการเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธี Duncan's multiple range test, DMRT และหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่สำคัญที่ใช้ในการบ่งบอกคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ค่า

ความแข็ง (Hardness, H) และค่าสี (Color Measurement) ด้วยเทคนิค Regression ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของการทดลองทั้งหมด หลังการอบแห้ง จะถูกนำมาตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีดังนี้ คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสความแข็ง (Hardness) ทำได้โดยใช้เครื่อง Texture Analyser รุ่น TA.XT.plus (Stable microsystems Texture Technologies Inc., UK) ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Water activity, aw) เครื่องมือที่ใช้คือวอเตอร์แอกติวิตีมิเตอร์ รุ่น Aqua Lab ค่าสี (color) โดย เครื่อง Spectrophotometer เมื่อ  $L^*$  บรรยายถึงความสว่าง ถ้า  $L^*$  มีค่าเป็นศูนย์ แสดงถึงสีดำและถ้า  $L^*$  มีค่าเป็นหนึ่งร้อยแสดงถึงสีขาว  $a^*$  บรรยายถึงสีแดง (+a\*) ไปจนถึงสีเขียว (-a\*) และ  $b^*$  บรรยายถึงเหลือง (+b\*) ไปจนถึงสีน้ำเงิน (-b\*) จากนั้นคำนวณหาค่าความแตกต่างสีโดยรวม (Total Color Difference,  $\Delta E$ ) [7] ดังสมการ (4)

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_o)^2 + (a^* - a_o)^2 + (b^* - b_o)^2} \quad (4)$$

เมื่อ ค่า  $L_o$ ,  $a_o$  และ  $b_o$  เป็นค่าที่วัดจากผลิตภัณฑ์อ้างอิง [8]

#### 3.3 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้ในการ

อบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง [9] โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (5) โดยการอบแห้งแบบสูญญากาศร่วมกับอินฟราเรด พลังงานที่ใช้ในกระบวนการ ประกอบด้วย พลังงานที่ใช้กับแผ่นอินฟราเรด และปั๊มสูญญากาศ

$$SEC = \frac{E_{infrared} + E_{vacuum}}{M_w} \quad (5)$$

เมื่อ SEC คือ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kWh/kg)

$E_{infrared}$  คือ พลังงานที่ใช้กับแผ่นความร้อน (kWh)

$E_{vacuum}$  คือ พลังงานที่ใช้กับปั๊มสูญญากาศ (kWh)

$M_w$  คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเนื้อวัสดุ (kg)

#### 3.4 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองการอบแห้งเป็นการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลในระหว่างการอบแห้งของวัสดุ ซึ่งจะช่วยในการออกแบบระบบการอบแห้งต่าง ๆ จากการตรวจเอกสารรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งอาหารหรือวัสดุชีวภาพ พบว่าแบบจำลองการอบแห้งที่นิยมใช้ในการศึกษาอาหารหรือวัสดุชีวภาพจำพวกผักและผลไม้ คือ แบบจำลองในรูปของสมการเอมพิริคัล (Empirical Equation) ซึ่งในการศึกษานี้จะคัดเลือกมาทำการศึกษากำหนด 10 แบบจำลอง ดังนี้ แบบจำลองของ Newton, Page, Modified Page, Henderson and Pabis, Logarithmic, Wang and singh, Two Term, Verma et al. Modified Henderson and Pabis และ Midilli et al. [10-15] โดยแบบจำลองต่าง ๆ สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดี แต่มีข้อจำกัดที่การนำไปใช้งานต้องอยู่ภายใต้สภาวะทดสอบที่ใช้สร้างสมการเท่านั้น





การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งซึ่งบางที่เหมาะสมของการอบแห้งมะม่วง สามารถทำได้โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใด ๆ จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับสมการอบแห้งซึ่งบางที่ใช้สำหรับทำนายค่าความชื้น ซึ่งอยู่ในรูปสมการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี (Semi-Theoretical Drying Equation) ซึ่งการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสมการอบแห้งซึ่งบางใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression) มีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R<sup>2</sup>) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) และค่าไคสแควร์ (Chi-square, X<sup>2</sup>)

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 คุณภาพหลังการอบแห้ง

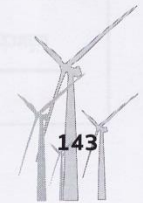
จากการสังเกตลักษณะภายนอกของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง แต่ละการทดลองมีลักษณะภายนอกไม่แตกต่างกันมากนัก และเกิดการหดตัวในบางการทดลอง หลังเมื่อวัดคุณภาพของมะม่วงการอบ

แห้งให้ผลดังตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า ค่าความแข็ง (Hardness, H) ของมะม่วงอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C มีความแตกต่างกับมะม่วงอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C และ 70 °C ค่าความแข็งมากที่สุด คือ 4.98 N ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์อ้างอิงมากที่สุด วอเตอร์แอกติวิตีของมะม่วงอบแห้ง มีค่าอยู่ในช่วง 0.278-0.59 ตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผลไม้แห้ง มพช.136/2558 กำหนด ว่าผลไม้อบแห้งจะต้องมีค่าวอเตอร์แอกติวิตีไม่เกิน 0.6 [16] เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทำให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตีมีความแตกต่างกันทั้ง 3 อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์อ้างอิงที่มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุดคือ 0.278 สีของผลิตภัณฑ์ไม่มีความแตกต่างกัน และสีของผลิตภัณฑ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง [8] และเมื่อคำนวณหาค่า ΔE มีค่าอยู่ในช่วง 11.17-20.88 จากการศึกษาการอบแห้งมะม่วงแบบสูญญากาศร่วมกับอินฟราเรดเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับคุณภาพการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง [8] พบว่า การทดลองที่ความดัน 5 kPa อุณหภูมิ 70 °C มีคุณภาพใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์อบแห้งแบบแช่เยือกแข็งมากที่สุด

ตารางที่ 1 ตารางบันทึกผลการทดลอง

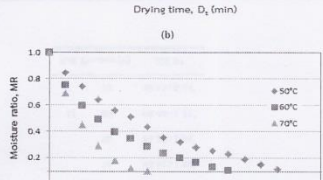
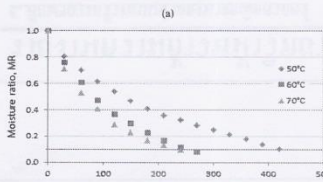
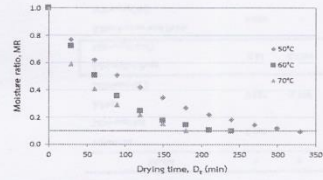
P (kPa)	T (°C)	Drying Kinetic		Quality					SEC (kWh/kg <sub>DM</sub> )	
		D <sub>i</sub> (min)	D <sub>f</sub> g <sub>DM</sub> /g <sub>DM</sub> min	H (N)	a <sub>w</sub>	Color Measurement				
						L*	a*	b*		ΔE
5	50	510±7.07 <sup>a</sup>	0.01±0.003 <sup>a</sup>	1.63±0.70 <sup>a</sup>	0.523±0.05 <sup>a</sup>	63.14±7.62 <sup>a</sup>	6.91±3.14 <sup>a</sup>	52.24±3.92 <sup>a</sup>	19.47±4.63 <sup>a</sup>	61.16±2.28 <sup>a</sup>
	60	370±7.07 <sup>b</sup>	0.03±0.001 <sup>b</sup>	3.70±0.63 <sup>a</sup>	0.325±0.22 <sup>b</sup>	63.66±5.79 <sup>b</sup>	11.14±2.63 <sup>b</sup>	52.96±6.33 <sup>b</sup>	20.40±5.39 <sup>b</sup>	48.13±1.48 <sup>b</sup>
	70	280±14.14 <sup>c</sup>	0.04±0.008 <sup>b</sup>	4.98±1.34 <sup>a</sup>	0.278±0.01 <sup>c</sup>	68.71±6.23 <sup>b</sup>	7.17±4.68 <sup>b</sup>	49.13±10.86 <sup>b</sup>	11.17±5.99 <sup>b</sup>	38.44±3.30 <sup>b</sup>
10	50	565±14.14 <sup>d</sup>	0.01±0.006 <sup>a</sup>	1.31±0.09 <sup>b</sup>	0.563±0.03 <sup>b</sup>	67.04±3.52 <sup>b</sup>	10.45±2.05 <sup>b</sup>	54.88±4.66 <sup>b</sup>	18.77±1.12 <sup>b</sup>	80.57±1.98 <sup>a</sup>
	60	415±7.07 <sup>b</sup>	0.02±0.005 <sup>b</sup>	2.51±0.13 <sup>b</sup>	0.488±0.05 <sup>b</sup>	64.03±9.21 <sup>b</sup>	7.28±2.66 <sup>b</sup>	53.59±5.23 <sup>b</sup>	19.49±3.27 <sup>b</sup>	60.15±3.03 <sup>b</sup>
	70	360±7.07 <sup>c</sup>	0.04±0.007 <sup>b</sup>	3.02±0.06 <sup>b</sup>	0.315±0.06 <sup>c</sup>	65.24±6.67 <sup>b</sup>	9.45±2.89 <sup>b</sup>	55.81±4.22 <sup>b</sup>	20.36±0.36 <sup>b</sup>	48.91±1.88 <sup>c</sup>
15	50	570±28.28 <sup>e</sup>	0.01±0.002 <sup>a</sup>	0.70±0.35 <sup>b</sup>	0.590±0.08 <sup>b</sup>	69.61±7.58 <sup>b</sup>	11.75±4.46 <sup>b</sup>	57.11±6.56 <sup>b</sup>	19.25±4.57 <sup>b</sup>	83.30±3.96 <sup>a</sup>
	60	430±14.14 <sup>c</sup>	0.02±0.003 <sup>b</sup>	2.37±0.51 <sup>a</sup>	0.490±0.00 <sup>b</sup>	61.98±6.78 <sup>b</sup>	10.12±3.67 <sup>b</sup>	51.71±7.51 <sup>b</sup>	20.88±0.70 <sup>b</sup>	60.46±1.33 <sup>b</sup>
	70	360±14.14 <sup>c</sup>	0.03±0.004 <sup>b</sup>	2.78±0.01 <sup>b</sup>	0.372±0.03 <sup>c</sup>	71.71±3.60 <sup>b</sup>	6.32±1.11 <sup>b</sup>	53.16±4.61 <sup>b</sup>	15.00±1.10 <sup>b</sup>	49.15±0.44 <sup>c</sup>
Ref. Product [7]	1440	0.249	6.18	0.23	79.86	4.29	42.62	-	253.07	

หมายเหตุ: ตัวอักษรพิมพ์เล็กหมายถึงการเปรียบเทียบความแตกต่างของลักษณะคุณภาพต่างๆ ระหว่างตัวอย่างที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan Multiple Range Test (DMRT)

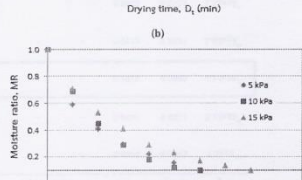
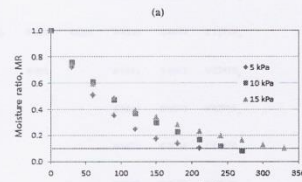
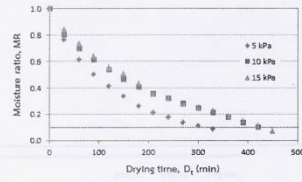


4.2 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์คงที่เท่ากับ 5 kPa และ 15 kPa โดยเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง จากการศึกษพบว่า อัตราส่วนความชื้นจะลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาการอบแห้ง โดยช่วง 200 นาทีแรก ความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นสูง ดังนั้นจึงเกิดการถ่ายเทความชื้นจากผลิตภัณฑ์สู่ห้องอบแห้งอย่างรวดเร็ว และถูกดูดออกจากห้องอบแห้งด้วยปั๊มสุญญากาศ หลังจากนั้นความชื้นจะค่อย ๆ ลดลง จนกระทั่ง [12, 13] จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิ 70 °C จะทำให้อัตราส่วนความชื้นลดลงเร็วที่สุด จึงทำให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด เมื่อเทียบกับอุณหภูมิ 60 °C และ 50 °C และที่ระดับความดันสุญญากาศเท่ากัน สามารถอธิบายได้ว่าที่ความดันเดียวกัน อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งของมะม่วง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะทำให้อัตราส่วนความชื้นลดลงเร็วขึ้น



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา  
(a) ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa (b) ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa และ (c) ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา  
(a) อุณหภูมิ 50 °C (b) อุณหภูมิ 60 °C และ (c) อุณหภูมิ 70 °C

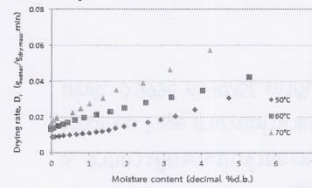
รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 °C โดยเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขความดันสัมบูรณ์ จากการศึกษพบว่า อัตราส่วนความชื้นจะลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาการอบแห้ง สังเกตได้จากรูปที่ 4 ที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa อัตราส่วนความชื้นลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจมมากที่สุด เนื่องจากความดันสุญญากาศที่ส่งผลต่อจุดเดือดของน้ำในการอบแห้ง โดยน้ำที่ความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 kPa มีจุดเดือดเท่ากับ 32.88, 45.81 และ 53.97 °C ตามลำดับ [14] จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า รูปที่ 4(c) อัตราส่วนความชื้นลดลงเร็วที่สุด โดยแต่ละความดันแต่มีอัตราส่วนความชื้นใกล้เคียงกัน แต่ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งแตกต่างกัน กล่าวคือ ที่อุณหภูมิเดียวกัน ความดันมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง เมื่อลดความดัน

จากตารางที่ 1 ที่ความดันเดียวกันเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ พบว่าอุณหภูมิจึงผลต่อระยะเวลา โดยที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 °C ใช้ระยะเวลาแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่นที่ระดับความดัน 5 kPa จะ

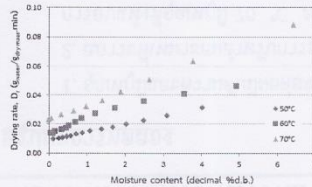


ใช้ระยะเวลา 510, 370, 280 นาที ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิเดียวกันเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระดับความชื้น พบว่าความชื้นไม่ส่งผลต่อระยะเวลาในการอบแห้ง

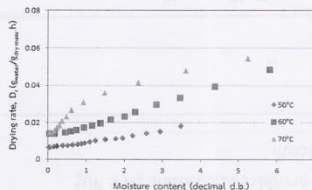
จากการศึกษาข้างต้นสรุปได้ว่า อุณหภูมิและความชื้นที่ใช้มีผลต่อจลนศาสตร์การอบแห้งของมะม่วง โดยที่สภาวะความชื้นเดียวกันอัตราส่วนความชื้นจะลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้ง ในทำนองเดียวกัน ที่สภาวะอุณหภูมิเดียวกันอัตราส่วนความชื้นจะลดลงเมื่อลดความชื้นสัมบูรณ์



(a)



(b)



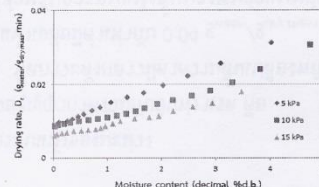
(c)

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับปริมาณความชื้นที่ (a) ความชื้นสัมบูรณ์ 5 kPa

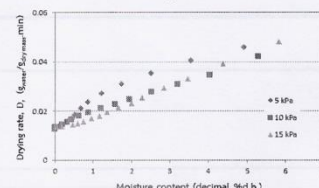
(b) ความชื้นสัมบูรณ์ 10 kPa และ (c) ความชื้นสัมบูรณ์ 15 kPa

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้ง ที่ความชื้นสัมบูรณ์คงที่เท่ากับ 5 10 และ 15 kPa โดยเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง และ รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้ง 50 60 และ 70 °C โดยเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขความชื้นสัมบูรณ์ จาก

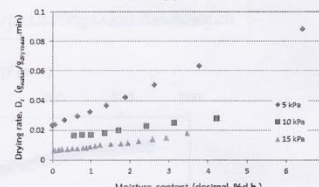
การศึกษาพบว่า อัตราการอบแห้งเป็นแบบลดลง (Falling rate) โดยช่วงแรกอัตราการอบแห้งจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นสูง และลดลงเรื่อย ๆ จนอัตราการอบแห้งเป็นศูนย์ คือ น้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ระดับความชื้นเดียวกัน และลดระดับความชื้นสัมบูรณ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน จะทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น จากตารางที่ 1 พบว่าอัตราการอบแห้งที่ 50 °C มีความแตกต่างกับอัตราการอบแห้งที่ 60 และ 70 °C ซึ่งมีอัตราการแห้งเฉลี่ยสูงสุดที่ 0.04  $\frac{kg\ water}{kg\ dry\ matter\ min}$  เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดจากการทดลองที่สภาวะที่ความชื้นสัมบูรณ์ 5 kPa อุณหภูมิ 70 °C ซึ่งใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดคือ 280 นาที กับการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง [8] ที่ใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 1,440 นาที จะทำให้ลดระยะเวลาในการทำแห้งได้ถึง 80.56%



(a)

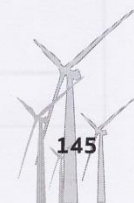


(b)



(c)

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับปริมาณความชื้นที่ (a) อุณหภูมิ 50 °C (b) อุณหภูมิ 60 °C และ (c) อุณหภูมิ 70 °C





**4.3 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC)**

การเปรียบเทียบค่าพลังงานต่าง ๆ ที่ใช้ในการอบแห้งจากตารางที่ 1 พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C สิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C และ 70 °C จากการทดลองที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa อุณหภูมิ 70 °C จะมีค่าการสิ้นเปลืองพลังงานน้อยที่สุด คือ 38.44 kWh/kg เนื่องจากทำการอบแห้งด้วยความดันต่ำทำให้จุดเดือดของน้ำลดลง ส่งผลให้น้ำระเหยออกได้ไวขึ้น เมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ ทำให้ลดระยะเวลาการอบแห้งและส่งผลให้มีสูญญากาศทำงานลดลง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานก็จะลดลงไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบมวงแบบเขี่ยอกแข็ง [8] ซึ่งมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 253.07 kWh/kg<sub>water</sub> สามารถทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงถึง 84.81%

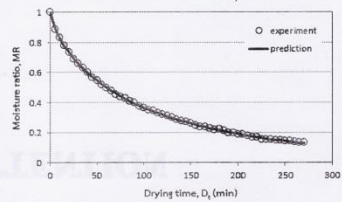
**4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์**

ผลจากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบต่าง ๆ จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลองเทียบกับแบบจำลองต่าง ๆ ดังตารางที่ 2 พบว่า

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความแม่นยำทางสถิติของแบบจำลองต่าง ๆ

Model	k	n	a	b	c	g	h	R <sup>2</sup>	RMSE	χ <sup>2</sup>
1. Newton MR=exp(-kt)	0.010	-	-	-	-	-	-	0.9498	0.0075	1.0x10 <sup>-6</sup>
2. Page MR=exp(-kt <sup>n</sup> )	0.038	0.709	-	-	-	-	-	0.9981	0.0011	2.34x10 <sup>-9</sup>
3. Modified Page MR=exp(-kt <sup>n</sup> )	0.01	0.7266	-	-	-	-	-	0.9996	0.0005	4.16x10 <sup>-9</sup>
4. Henderson and Pabis MR=aexp(-kt)	0.008	-	0.862	-	-	-	-	0.9822	0.0037	3.64x10 <sup>-7</sup>
5. Logarithmic MR=aexp(-kt)+c	0.012	-	0.802	0.123	-	-	-	0.9923	0.0023	1.33x10 <sup>-7</sup>
6. Wang and Singh MR=1+at+bt <sup>2</sup>	-	-	-0.008	1.96x10 <sup>-5</sup>	-	-	-	0.9052	0.0095	1.63x10 <sup>-6</sup>
7. Two Term MR=aexp(-k <sub>1</sub> t)+bexp(-k <sub>2</sub> t)	0.006 0.043	-	0.675 0.316	-	-	-	-	0.9974	0.0013	3.19x10 <sup>-8</sup>
8. Verma et al. MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-gt)	0.045	-	0.320	-	-	0.006	-	0.9967	0.0015	4.05x10 <sup>-8</sup>
9. Modified Henderson and Pabis MR=aexp(-kt)+bexp(-gt)+cexp(-ht)	0.043	-	0.315	0.236	0.439	0.006	0.006	0.9974	0.0013	3.18x10 <sup>-8</sup>
10. Midilli et al. MR=aexp(-kt)+bt	0.042	0.693	1.011	-1.72x10 <sup>-5</sup>	-	-	-	0.9984	0.0010	2.05x10 <sup>-8</sup>

แบบจำลอง Modified Page มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด คือ 0.9996 ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่ามีความแม่นยำและสามารถใช้ทำนายพฤติกรรมการอบแห้งได้ ค่า RMSE มีค่าเท่ากับ 0.0005 และค่า χ<sup>2</sup> มีค่าเท่ากับ 0.00026 เมื่อนำแบบจำลองที่ได้มาสร้างกราฟดังรูปที่ 7 จะเห็นว่าแบบจำลอง Modified Page มีช่วงกระจายข้อมูลน้อยมาก แสดงให้เห็นได้ว่าแบบจำลอง Modified Page มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดและสามารถใช้ทำนายพฤติกรรมการอบแห้งได้ดีที่สุด



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลองเทียบกับแบบจำลอง Modified Page



### 5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิและความดันมีผลต่อ จลนพลศาสตร์การอบแห้งของมะม่วง ที่ระดับความดันเดียวกัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้อัตราส่วนความชื้นลดลงและอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น และที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน เมื่อลดความดันจะทำให้ อัตราส่วนความชื้นลดลงและอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งมะม่วงด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด คือ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ความดัน 5 kPa ที่สภาวะดังกล่าวมีค่า ความชื้นเปลี่ยนแปลงงานจำเพาะเท่ากับ 38.44 kWh/kg<sub>dry</sub> อัตราการอบแห้งเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.04 g<sub>moist</sub>/kg<sub>moist</sub> min และจากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งชิ้นบางพบว่า แบบจำลอง Modified Page สามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งได้ดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.9996 ค่า RMSE เท่ากับ 0.0005 และค่า  $X^2$  เท่ากับ 4.16x10<sup>-9</sup>

จากผลการศึกษาดังกล่าวจะได้ สภาวะที่เหมาะสมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิ์ผล รวมถึงค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงงานจำเพาะ ซึ่งสามารถนำไปศึกษาต่อถึงการศึกษาขนาดการผลิตเชิงการค้า ทั้งในด้านการผลิตและการลงทุน

### 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ หลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ได้ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และสถานที่ในการวิจัย

### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กลุ่มสื่อส่งเสริมการเกษตร. 2544. การปลูกมะม่วง. สำนักพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยี กรมส่งเสริมการเกษตร.
- [2] สวาบางแค. 2559. จีบกระแสดลาดมะม่วง และภาพรวมการส่งออกมะม่วงไทย. มติชนบท เทคโนโลยีชาวบ้าน.
- [3] ทิพย์วรรณ งามศักดิ์, ปัญญา แสนไชย, และไพโรจน์, จันธานี. 2543. การศึกษาความชอบของผู้บริโภคชาวญี่ปุ่นและจีนที่มีต่อผลมะม่วงและเนื้อมะม่วงสุกพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองและพันธุ์โชคอนันต์. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- [4] สมชาติ, โสภณรณฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [5] Nathdanai Harnkarnsujarit and Charoenrein Sanguansri 2011. Influence of collapsed structure on stability of  $\beta$ -carotene in freeze-dried mangoes. Food Research International, 44(10), 3188-3194.

- [6] อีลิทียะ สนิโซ, สะอูดี ฟามิรา และรัชดาภรณ์ อานาพี. 2558. สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงาน และอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของการอบแห้งผลหมากด้วยพลังงานความร้อนร่วม. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 17(1), 142-149.
- [7] Adak Nafiye, Heybeli Nursel and Ertekin Can. 2017. Infrared drying of strawberry. Food Chemistry, 219(1), 109-116.
- [8] Sakawduen Kaewdam, Chanawat Nitatwichit, Jatuphong Varith and Somkiat Jatronglumert. 2013. Mathematical model of freeze drying on mango. Journal of Agricultural Research and Extension, 30(3, Suppl.), 56-67.
- [9] Somkiat Jatronglumert, Jatuphong Varith and Tanongkiat Kiatsiriroat. 2015. Influence of drying method on drying kinetics and qualities of longan fruit leather. Maejo International Journal of Science and Technology, 9(1), 54-63.
- [10] Koua Kamenan Blaise Fassinou, Wanignon Ferdinand, Gbaha, Prosper และ Toure, Siaka. 2009. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of banana, mango and cassava. Energy, 34(10), 1594-1602.
- [11] Crank J., 1975. "The mathematics of diffusion", London: Oxford University Press, London.
- [12] ศักดิ์ชัย จงจำ และอำไพศักดิ์ ที่บุญมา. 2553. การอบแห้งน้่าบักกิ้งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 12(3), 75-85.
- [13] อนุสรานาดี, ยุทธนา ภิระวินัยกุล และสุววรรณ ภิระวินัยกุล. 2012. จลนพลศาสตร์การอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและลมร้อน. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 17(2), 130-138.
- [14] อำไพศักดิ์ ที่บุญมา และศักดิ์ชัย จงจำ. 2553. การอบแห้งขิงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 15(2), 76-86.
- [15] Nazmi Izli, Gökçen Izli and Onur Taskin. 2017. Influence of different drying techniques on drying parameters of mango. Food Science and Technology, 37(4), 604-612.
- [16] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2558. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผลไม้แห้ง. มพช.136/2558.



## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นางสาวชญาณิศ รัตน์มงคล	
เกิดเมื่อ	20 พฤศจิกายน 2535	
ประวัติการศึกษา	2558	ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
	2554	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนยุพราชวิทยาลัย เชียงใหม่
อีเมล		chayanit.ratta@gmail.com

