

การอบแห้งขิงด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ

GINGER DRYING WITH SUPERHEATED STEAM AT

A LOW-PRESSURE STATE

วรพล โพธิ์ศรีทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การอบแห้งขิงด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ

วรพล โพธิ์ศรีทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การอบแห้งขิงด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ
Ginger Drying with Superheated Steam at a Low-Pressure State
ชื่อ – นามสกุล นายวรพล โพธิ์ศรีทอง
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์วินัย จันทร์เพ็ง, วศ.ด.
ปีการศึกษา 2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ขวัญชัย จ้อยเจริญ, ปร.ด.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไพโรจน์ จันทร์แก้ว, วศ.ด.)


..... กรรมการ
(อาจารย์สถาพร ทองวิค, วศ.ด.)


..... กรรมการ
(อาจารย์วินัย จันทร์เพ็ง, วศ.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 19 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2563

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การอบแห้งขิงด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ
ชื่อ – นามสกุล	นายวรพล โพธิ์ศรีทอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์วินัย จันทร์เพ็ง, วศ.ด.
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความดันที่มีต่อคุณภาพขิงหลังการอบแห้ง คุณภาพที่ใช้ในการวัดผลมีดังนี้ อัตราส่วนความชื้น อัตราการอบแห้ง คุณภาพด้านสี การหดตัว และการคิ่นตัว โดยได้ทำการทดลองในอุปกรณ์หม้ออบแห้งปริมาตร 1600 ตารางเซนติเมตร ใช้อุปกรณ์ให้ความร้อน 3 ชุด ชุดแรกมีขนาด 4.5 กิโลวัตต์ ชุดที่สองและสามมีขนาด 1.5 กิโลวัตต์ ใช้แฉกคัมปั้มในการลดแรงดันขนาด 70 ลิตรต่อวินาที

ทำการทดลองอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 3 ช่วงคือ 105 องศาเซลเซียส 115 องศาเซลเซียส และ 125 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.6 บาร์ 0.7 บาร์ และ 0.8 บาร์ ขิงที่ใช้อบแห้งเป็นขิงสดอายุประมาณ 8-10 เดือน โดยใช้ขิงแผ่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 – 4 เซนติเมตร หนา 0.3 – 0.5 เซนติเมตร ในการอบแห้งวางบนถาดรองมีมวลรวม 200 กรัม และอบแห้งจนความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 12 % d.b.

ผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 125 องศาเซลเซียส ความดัน 0.6 บาร์ มีอัตราการอบแห้งสูงสุดที่ 0.15 กิโลกรัมน้ำ/ชั่วโมง ใช้เวลาในการอบแห้ง 75 นาที คุณภาพสีมีค่าเฉลี่ยดังนี้ ค่าความสว่าง (L) 50.64 ค่าสีแดง (a) 3.78 ค่าสีเหลือง (b) 23.02 และค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) 18.52 การหดตัวสูงสุดเฉลี่ย 76.8 % และการคิ่นตัวสูงสุดเฉลี่ย 166.38 % เมื่อเทียบกับขิงอบแห้งในท้องตลาดพบว่ามีความสว่าง (L) น้อยกว่า 6.62 % มีค่าสีแดง (a) น้อยกว่า 1.68 % มีค่าสีเหลือง (b) มากกว่า 0.53 % และมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) มากกว่า 4.9

คำสำคัญ: การอบแห้ง ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ความดันต่ำ

Thesis Title Ginger Drying with Superheated Steam at a Low-Pressure State
Name – Surname Mr. Worapon Poshirtong
Program Mechanical Engineering
Thesis Advisor Mr. Winai Chanpeng, Ph.D.
Academic Year 2019

ABSTRACT

The objective of this research is to study the result of superheated steam temperature and pressure which affect ginger quality after drying. The qualities which were used for evaluation are moisture ratio, drying rate, color characteristics, shrinkage, and rehydration. The experiment was performed in a 1600 square centimeters drying oven. Using 3 heaters, the first one is 4.5 kilowatts, the second and third one are 1.5 kilowatts. Vacuum pump was used in order to reduce the pressure at 70 liters per second.

The sample was dried using superheated steam at 3 temperature ranges, which are 105 °C, 115 °C, and 125 °C at the pressure of 0.6 bar, 0.7 bar, and 0.8 bar. The ginger used for drying is 8-10 months old fresh ginger, by using slices of ginger, 2-4 centimeters in diameter, 0.3-0.5 centimeter in thickness. For drying, slices of ginger were put on a pan with a total mass of 200 grams, and dried until the final moisture is no more than 12% (dry basis).

The experimental results showed that superheated steam temperature at 125 °C, with the pressure at 0.6 bar, had the highest drying rate at 0.15 kg of water/hour, and the drying time was 75 minutes. The average color characteristics are as follows. Brightness (L) 50.64, redness (a) 3.78, yellowness (b) 23.02, the total color difference (ΔE) is 18.52, the average maximum shrinkage is 76.8 %, and the average maximum rehydration is 166.38 %. Compared with the dried ginger in the market, it was found that the brightness (L) is less than 6.62 %, redness (a) is less than 1.68 %, yellowness (b) is greater than 0.53 %, and the total color difference (ΔE) is greater than 4.9 %.

Keywords: drying, superheated steam, low pressure

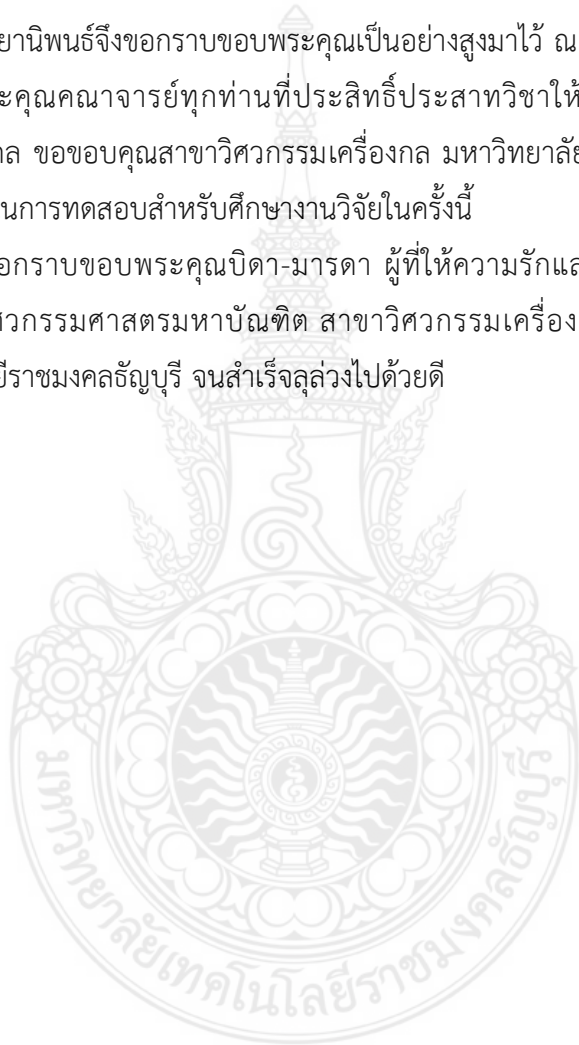
กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความอนุเคราะห์เป็นอย่างดีจาก ดร.วินัย จันทรเพ็ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย จ้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.สถาพร ทองวิค กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ จันทรแก้ว ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำชี้แจงตลอดจนช่วยเหลือและแก้ไข ข้อบกพร่อง เพื่อให้วิทยานิพนธ์นี้ มีความสมบูรณ์ทางผู้จัดทำวิทยานิพนธ์จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมาไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้แก่ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ใน สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่อนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบสำหรับศึกษางานวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ผู้ที่ให้ความรักและเป็นกำลังใจในการเรียน การศึกษาในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

วรพล โพธิ์ศรีทอง



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญ (ต่อ).....	(7)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญตาราง (ต่อ).....	(9)
สารบัญภาพ.....	(10)
บทที่ 1 บทนำ.....	11
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	12
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	14
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	14
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของขิง.....	15
2.2 พันธุ์ขิงที่นิยมปลูกในประเทศไทย.....	16
2.3 การแปรรูปขิง.....	16
2.4 องค์ประกอบของขิง.....	17
2.5 ทฤษฎีพื้นฐานการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง.....	17
2.6 อุณหภูมิอินเวอร์ชัน (Inversion Temperature).....	22
2.7 ความชื้นสมดุลของวัสดุ.....	22
2.8 สมการจลนพลศาสตร์การอบแห้ง.....	23
2.9 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล.....	24
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
2.11 ข้อดีข้อเสียการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง.....	30
2.12 ผลกระทบของการอบแห้งต่อผลิตภัณฑ์.....	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....	34
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	34
3.2 วิธีการทดลอง.....	36
3.3 การออกแบบการทดลอง.....	37
3.4 การทดสอบคุณภาพหลังการอบแห้ง.....	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	42
4.1 ผลการทดลองการลดความชื้น.....	42
4.2 ผลการทดลองอัตราการอบแห้ง.....	44
4.3 ผลการทดสอบคุณภาพด้านสี.....	46
4.4 ผลการทดสอบคุณภาพด้านการหดตัว.....	50
4.5 ผลการทดสอบคุณภาพด้านการคืนตัว.....	51
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	53
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	53
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	54
บรรณานุกรม.....	55
ภาคผนวก.....	57
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	58
ภาคผนวก ข การลดความชื้นซึ่งที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ.....	61
ภาคผนวก ค อัตราการอบแห้งซึ่งที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ.....	71
ภาคผนวก ง การวัดค่าสีที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ.....	74
ภาคผนวก จ การวัดค่าการหดตัวอุณหภูมิและความดันต่างๆ.....	76
ภาคผนวก ฉ การวัดค่าการคืนตัวอุณหภูมิและความดันต่างๆ.....	78
ภาคผนวก ช การวิเคราะห์สถิติข้อมูลด้วยโปรแกรม SPSS.....	81
ภาคผนวก ซ บทความตีพิมพ์.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	101

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมี ของแ่งงิง (ชิงสด 100 กรัม).....	16
ตารางที่ 2.2 อัตราการอบแห้ง การหดตัวและการคืนตัวของผักและผลไม้บางชนิด.....	30
ตารางที่ 3.1 การออกแบบการทดลองที่มี 2 ปัจจัย.....	37
ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยอัตราการอบแห้ง.....	44
ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยความสว่าง(L) ค่าสีแดงและเขียว(a) ค่าสีเหลืองและน้ำเงิน(b) และค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE).....	45
ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยการหดตัวของชิงอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำ.....	50
ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยการคืนตัวของชิงอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำ.....	51
ตารางผนวกที่ ข1 การลดความชื้นชิงที่ความดัน 0.6 bar อุณหภูมิ 105 °C.....	61
ตารางผนวกที่ ข2 การลดความชื้นชิงที่ความดัน 0.6 bar อุณหภูมิ 115 °C.....	62
ตารางผนวกที่ ข3 การลดความชื้นชิงที่ความดัน 0.6 bar อุณหภูมิ 125 °C.....	63
ตารางผนวกที่ ข4 การลดความชื้นชิงที่ความดัน 0.7 bar อุณหภูมิ 105 °C.....	64
ตารางผนวกที่ ข5 การลดความชื้นชิงที่ความดัน 0.7 bar อุณหภูมิ 115 °C.....	65
ตารางผนวกที่ ข6 การลดความชื้นชิงที่ความดัน 0.7 bar อุณหภูมิ 125 °C.....	66
ตารางผนวกที่ ข7 การลดความชื้นชิงที่ความดัน 0.8 bar อุณหภูมิ 105 °C.....	67
ตารางผนวกที่ ข8 การลดความชื้นชิงที่ความดัน 0.8 bar อุณหภูมิ 115 °C.....	68
ตารางผนวกที่ ข9 การลดความชื้นชิงที่ความดัน 0.8 bar อุณหภูมิ 125 °C.....	69
ตารางผนวกที่ ค1 อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105°C ที่ความดันต่างๆ.....	71
ตารางผนวกที่ ค2 อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ 115°C ที่ความดันต่างๆ.....	71
ตารางผนวกที่ ค3 อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ 125°C ที่ความดันต่างๆ.....	72
ตารางผนวกที่ ง1 ค่าความสว่าง(L) ค่าสีแดงและเขียว(a) ค่าสีเหลืองและน้ำเงิน(b) และค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE).....	74
ตารางผนวกที่ จ1 ค่าการหดตัวที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ.....	76
ตารางผนวกที่ ฉ1 ค่าการคืนตัวที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 105 °C.....	78
ตารางผนวกที่ ฉ2 ค่าการคืนตัวที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 115 °C.....	78
ตารางผนวกที่ ฉ3 ค่าการคืนตัวที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 125 °C.....	79

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางผนวกที่ ช1 การวิเคราะห์สถิติการลดความชื้นขิงที่ความดัน 0.6 bar อุณหภูมิ 105 °C...	81
ตารางผนวกที่ ช2 การวิเคราะห์สถิติการลดความชื้นขิงที่ความดัน 0.6 bar อุณหภูมิ 115 °C...	81
ตารางผนวกที่ ช3 การวิเคราะห์สถิติการลดความชื้นขิงที่ความดัน 0.6 bar อุณหภูมิ 125 °C...	82
ตารางผนวกที่ ช4 การวิเคราะห์สถิติการลดความชื้นขิงที่ความดัน 0.7 bar อุณหภูมิ 105 °C...	82
ตารางผนวกที่ ช5 การวิเคราะห์สถิติการลดความชื้นขิงที่ความดัน 0.7 bar อุณหภูมิ 115 °C...	83
ตารางผนวกที่ ช6 การวิเคราะห์สถิติการลดความชื้นขิงที่ความดัน 0.7 bar อุณหภูมิ 125 °C...	83
ตารางผนวกที่ ช7 การวิเคราะห์สถิติการลดความชื้นขิงที่ความดัน 0.8 bar อุณหภูมิ 105 °C...	84
ตารางผนวกที่ ช8 การวิเคราะห์สถิติการลดความชื้นขิงที่ความดัน 0.8 bar อุณหภูมิ 115 °C...	84
ตารางผนวกที่ ช9 การวิเคราะห์สถิติการลดความชื้นขิงที่ความดัน 0.8 bar อุณหภูมิ 125 °C...	85



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ข้อมูลการส่งออกและนำเข้าขิงแห้งและขิงสด ปี 2555 – 2559.....	12
รูปที่ 2.1 ลักษณะขิงแห้งและผ่าซีก.....	14
รูปที่ 2.2 Sketch of physical model showing the drying layer and wet zone.....	19
รูปที่ 2.3 ระบบการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง.....	19
รูปที่ 2.4 แสดงตำแหน่งอุณหภูมิอินเวอร์ชัน.....	21
รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแครอทที่อบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ.....	24
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแครอทที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำ.	25
รูปที่ 2.7 หลักการวัดสีใน Hunter System.....	32
รูปที่ 3.1 แผนภาพระบบการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำ.....	33
รูปที่ 3.2 เครื่องอบแห้งขิงด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ.....	34
รูปที่ 3.3 เครื่องวัดค่าสี.....	38
รูปที่ 3.4 แสดงการหาปริมาตรของขิง.....	39
รูปที่ 3.5 เครื่องชั่งดิจิตอล.....	40
รูปที่ 4.1 การลดความชื้นที่อุณหภูมิต่างๆ ความดัน 0.6 bar.....	41
รูปที่ 4.2 การลดความชื้นที่อุณหภูมิต่างๆ ความดัน 0.7 bar.....	42
รูปที่ 4.3 การลดความชื้นที่อุณหภูมิต่างๆ ความดัน 0.8 bar.....	43
รูปที่ 4.4 อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ.....	44
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบขิงที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและขิงอบแห้งในตลาด	46
รูปที่ 4.6 การวัดค่าความสว่าง (Lightness).....	46
รูปที่ 4.7 การวัดค่าสีแดง (Redness).....	47
รูปที่ 4.8 การวัดค่าสีเหลือง (Yellowness).....	48
รูปที่ 4.9 การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม ΔE (Total color difference).....	48
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบสีของขิงอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับขิงอบแห้งในตลาด.....	49

บทที่ 1

บทนำ

การอบแห้งเป็นการไล่ความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์โดยการระเหย โดยทั่วไปจะอาศัยอากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนกับผลิตภัณฑ์ อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง การอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรเป็นกระบวนการหนึ่งในงานเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการรักษาคุณภาพ ลดการสูญเสีย และยืดเวลาการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ เทคโนโลยีการอบแห้งเป็นสิ่งที่ไม่ลืมนึกถึง แต่การวางแผนการดำเนินการอบแห้ง ภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่กำหนดเป็นสิ่งที่จะต้องศึกษาทั้งนี้เพื่อให้ได้วิธีการดำเนินการที่เหมาะสมที่สุด

ประเทศไทยเป็นแหล่งผลิตสินค้าทางการเกษตรขนาดใหญ่ เช่น ข้าว ข้าวโพด พุรีเยน ลำไย เป็นต้น ซึ่งเมื่อถึงฤดูการเก็บเกี่ยวจึงมักเกิดปัญหาสินค้าล้นตลาดทำให้ราคาสินค้านั้นตกต่ำ การถนอมอาหารและการแปรรูปจึงเป็นวิธีปัญหาสินค้าล้นตลาดอีกวิธีหนึ่ง ปัจจุบันกระบวนการอบแห้งที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรมมากที่สุดคือ การอบแห้งด้วยลมร้อนซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพไม่ค่อยดีนัก โดยปัญหาหลักคือ การเปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์ ทำให้ดูไม่น่ารับประทาน

จึงมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zingiber officinale* Roscoe จัดอยู่ในวงศ์ขิง เป็นพืชล้มลุก มีเหง้าใต้ดิน เปลือกนอกสีน้ำตาลแกมเหลือง เนื้อในสีนวลมีกลิ่นหอมเฉพาะ แทงหน่อหรือลำต้นเทียมขึ้นเป็นกอประกอบด้วยกาบหรือโคนใบหุ้มซ้อนกัน ใบ เป็นชนิดใบเดี่ยว ออกเรียงสลับกันเป็นสองแถว ใบรูปหอกแกมรูปไข่ กว้าง 1.5 - 2 cm. ยาว 12 - 20 cm. หลังใบห่อจีบเป็นรูปร่างปลายใบสอบเรียวแหลม โคนใบสองแฉกและเป็นกาบหุ้มลำต้นเทียม ตรงช่วงระหว่างกาบกับตัวใบจะหักโค้งเป็นข้อศอก ดอก สีขาว ออกรวมกันเป็นช่อรูปเห็ดหรือกระบองโบราณ แทงขึ้นมาจากเหง้า ชูก้านสูงขึ้นมา 15 - 25 cm. ทุกๆ ดอกที่กาบสีเขียวปนแดงรูปโค้งๆ ห่อรองรับ กาบจะปิดแน่นเมื่อดอกยังอ่อน และจะขยายอ้าให้ เห็นดอกในภายหลัง กลีบดอกและกลีบรองกลีบดอก มีอย่างละ 3 กลีบ อุ่มน้ำ และหลุดร่วงไว โคนกลีบดอกมีวนห่อ ส่วนปลายกลีบผายกว้างออกเกสรผู้มี 6 อัน ผล กลม แข็ง โต วัดผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 cm. ขิงขยายพันธุ์โดยใช้เหง้า ปลูกในดินร่วนซุยผสมปุ๋ยหมัก หรือดินเหนียวปนทราย โดยยกดินเป็นร่องห่างกัน 30 cm. ปลูกห่างกัน 20 cm. ลึก 5 - 10 cm. ขิงชอบขึ้นในที่ชื้นมีการระบายน้ำดี ถ้าน้ำขังอาจโดนโรคเชื้อรา และการขยายพันธุ์โดยการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ ซึ่งอาจเป็นการลงทุนสูงแต่คุ้มค่าและจะได้พันธุ์ที่ปลอดเชื้อ เพราะส่วนใหญ่โรคที่พบมักติดมากับท่อนพันธุ์ขิง

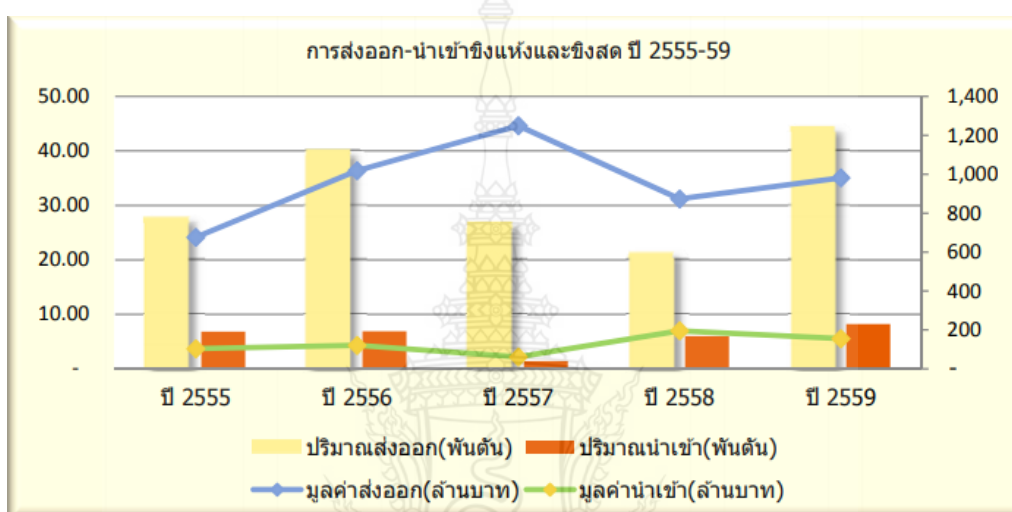
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีการพยายามของนักวิจัยหลายกลุ่มในการพัฒนาวิธีการอบแห้งใหม่ๆขึ้นมา เพื่อลดข้อบกพร่องของวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิมทั้งในแง่ของการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคในแง่ของคุณภาพอาหารที่ได้หลังการอบแห้ง เช่น การอบแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze drying) การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ (Microwave drying) การอบแห้งภายใต้สุญญากาศ (Vacuum drying) หรือการอบแห้งโดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation drying) เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีการผสมผสานวิธีการอบแห้งที่กล่าวข้างต้นเข้าด้วยกันเพื่อให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพสูงขึ้น นอกจากนี้วิธีการอบแห้งที่กล่าวมาแล้วนั้น ยังมีอีกวิธีการอบแห้งอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ คือ การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Superheated steam drying) การอบแห้งลักษณะนี้จะอาศัยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนไปสู่ผลิตภัณฑ์และพาความชื้นออกไปจากผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้ง

วิธีใช้ประโยชน์จากสรรพคุณขิง

- ขิงมีฤทธิ์อุ่น ช่วยขับเหงื่อ ไล่ความเย็น ขับลม แก้ท้องอืด ท้องเฟ้อ ช่วยให้เจริญอาหารและทำให้ร่างกายอบอุ่น
- รักษาอาการคลื่นไส้อาเจียนโดยนำขิง ประมาณ 2-3 เหง้ามาทุบพอแตกต้มกับน้ำ
- รักษาไข้หวัด โดยนำขิงแห้งประมาณ 2 g ต้มกับน้ำตาลทรายแดง ต้มเพื่อรักษาอาการเพื่อขับเหงื่อลดอาการไข้เนื่องจากหวัด
- รักษาอาการไอ ขับเสมหะ โดยนำขิงแห้งประมาณ 2 g ผสมน้ำผึ้งประมาณ 1 ช้อนชาต้มกับน้ำ 2 ถ้วย ต้มวันละ 3 ครั้ง ใช้กวาดคอหรือจิบบ่อยๆ
- รักษาอาการปวดประจำเดือนในช่วงก่อนหรือระหว่างมีประจำเดือน โดยนำขิงแห้งประมาณ 30 g ต้มกับน้ำ ต้มบ่อยๆ
- แก้อาการท้องเสีย ท้องร่วง โดยใช้ขิงแห้งชงกับน้ำอุ่น ต้มวันละ 1 ครั้ง
- รักษาแผลที่เกิดจากไฟไหม้หรือถูกน้ำร้อนลวก โดยตำขิงให้ละเอียดคั่วกับน้ำสารส้มจนเกรียม แล้วบดจนเป็นผงพอกอาการอักเสบเป็นหนอง
- รักษาอาการปวดฟัน โดยนำขิงทุบให้ละเอียดคั่วกับน้ำสารส้มจนเกรียม แล้วบดจนเป็นผงพอกบริเวณที่ปวดฟัน

ในช่วงที่ผ่านมา [1] ไทยมีการส่งออกชิงแห้งและชิงสดขึ้นลง ปี 2555 ส่งออก 27.65 พันตัน ปี 2556 เพิ่มขึ้นเป็น 40.04 พันตัน ปี 2557 ได้ลดลงเหลือ 26.80 พันตัน ปี 2558 ลดลงเหลือ 21.20 พันตัน และปี 2559 เพิ่มขึ้นเป็น 44.29 พันตัน ส่วนการนำเข้า ปี 2555 นำเข้า 6.83 พันตัน และค่อยๆ ลดลงเหลือ 1.42 พันตันในปี 2557 ส่วนปี 2558 นำเข้าเพิ่มเป็น 6.01 พันตัน ส่วนปี 2559 เพิ่มขึ้นเป็น 8.22 พันตัน ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รายการ	ปี 2555	ปี 2556	ปี 2557	ปี 2558	ปี 2559
การส่งออก					
ปริมาณ (พันตัน)	27.65	40.04	26.80	21.20	44.29
มูลค่า (ล้านบาท)	676.12	1,018.49	1,249.67	873.27	981.70
การนำเข้า					
ปริมาณ (พันตัน)	6.83	6.90	1.42	6.01	8.22
มูลค่า (ล้านบาท)	103.48	120.77	61.01	195.57	155.30

รูปที่ 1.1 ข้อมูลการส่งออกและนำเข้าชิงแห้งและชิงสด ปี 2555 – 2559 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร , 2560)

เพื่อเพิ่มมูลค่าของชิงสดและลดการไหม้ของชิงแห้งที่เกิดจากการอบไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิสูงงานวิจัยนี้จึงได้ใช้วิธีการอบไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความความดันต่ำ เพื่อให้อุณหภูมิที่ใช้ในการอบไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่ำลงโดยไม่ทำให้ชิงแห้งหลังการอบเกิดการไหม้และตรวจสอบคุณภาพของชิงแห้งหลังการอบว่าเป็นอย่างไร

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอุณหภูมิ ความดัน และเวลา ในการอบแห้งขิงโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำที่มีผลต่อการลดความชื้นของขิง

1.2.2 เพื่อศึกษาค่าสี ค่าการหดตัว และค่าการคินตัว ของขิงที่ผ่านการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ทดลองอบแห้งขิงโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันในระบบต่ำที่อุณหภูมิ 105 115 และ 125°C ที่ความดัน 0.6 0.7 และ 0.8 bar ให้เหลือความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 12% d.b. ขนาดห้องอบแห้งคือ 40 x 40 x 40 cm ขิงที่ใช้ในการอบแห้งเป็นพันธุ์ขิงหยวกอายุประมาณ 8 - 10 เดือน มีลักษณะเป็นแวนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 - 4 cm หนา 0.3 - 0.5 cm มวลรวมประมาณ 200 g

1.3.2 คุณภาพของขิงที่ทำการศึกษาคือค่าสี การค่าหดตัว และค่าการคินตัว เปรียบเทียบกับสินค้าในท้องตลาด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถเพิ่มมูลค่าของขิงและปรับปรุงคุณภาพของขิงอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งให้ดีขึ้น เพื่อพัฒนาการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรประเภทอื่นๆโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งไปสู่ระดับอุตสาหกรรมต่อไป

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของขิง

ขิง [2] เป็นได้ทั้งพืชเครื่องเทศและสมุนไพร ชื่อท้องถิ่นเรียกว่า ขิงแดง ขลิงแกลง (จันทบุรี) ขิงบ้าน ขิงแครง ขิงป่า ขิงเขา (ภาคกลาง) ขิงเผือก (เชียงใหม่) สะเอ (กะเหรี่ยง - แม่ฮ่องสอน) ชื่อสามัญ เรียกว่า Ginger, Zingiber ชื่อวิทยาศาสตร์เรียกว่า Zingiber officinale Roscoe อยู่ในวงศ์ Zingiberaceae ส่วนที่ใช้ ประโยชน์คือ เหง้า (Rhizome) แก่และอ่อนทั้งสดและแห้ง (รุ่งรัตน์ , 2540)



รูปที่ 2.1 ลักษณะขิงแก่และผ่าซีก

ขิงเป็นพืชไร่และยังจัดเป็นพืชผักประเภทหนึ่งชนิดล้มลุก ประกอบด้วย

2.1.1 ลำต้น มีลำต้นใต้ดินเรียกว่าเหง้าหรือแง่ง (Rhizome) เจริญขึ้นเป็นกอ ลำต้นแท้มีลักษณะเป็นข้อๆ แข็ง มีสีขาวหรือเหลืองอ่อน มีเยื่อและเกล็ดเล็กๆ ห่อหุ้ม จะแตกขนานไปกับ พื้นดิน ลักษณะการแตกแขนงเป็นแบบนิ้วมือ คือ แง่งอันแรกจะเจริญและแตกแง่งย่อยๆ ต่อกันไป เหง้าหรือลำต้นใต้ดินนี้สามารถดำรงชีวิตข้ามฤดูหรือหลายฤดู ซึ่งต่างจากลำต้นเหนือดินที่มีอายุได้ เพียงฤดูเดียวหรือประมาณ 8 - 12 เดือน ลำต้นส่วนเหนือดินเป็นลำต้นเทียม (Clump) ส่วนนี้ ประกอบด้วยกาบใบซ้อนทับกันหลายๆ ชั้น เจริญจากตาที่ปรากฏอยู่บนแง่งของขิง ลำต้นมีความสูง ประมาณ 50 - 100 cm.

2.1.2 ใบ เป็นใบเดี่ยว รูปหอกแกมไข่ ยาวประมาณ 15 - 17 cm. และกว้างประมาณ 1.8 - 3 cm. ใบออกเรียงสลับกันเป็นสองแถว หลังใบห่อจับเป็นรูปร่างน้ำ ปลายใบสอบเรียวแหลม โคนใบสอบแคบ และจะเป็นกาบหุ้มลำต้นเทียม ดอกมีสีขาวออกเป็นช่อ (Inflorescence) รูป หีดยหรือรูปกระบองโบราณ ยาวประมาณ 5 - 7 cm. ก้านช่อดอกยาวประมาณ 15 - 25 cm. ดอกเกิดจากยอดที่ไม่มีใบหรือเกิดแยกกับลำต้น ลักษณะดอกเป็นตุ่มมีเกสรตัวผู้ ดอก จะแซมออกมาตามเกสรตัวผู้ปกติจึงเป็นพืชที่ไม่ค่อยออกดอกหรือติดเมล็ด

2.1.3 ผล มีลักษณะกลม แข็ง โต มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 cm.

2.2 พันธุ์ขิงที่นิยมปลูกในประเทศไทย

กรมวิชาการเกษตร (2525) แยกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.2.1 ขิงใหญ่หรือขิงหยวกหรือขิงขาว ลักษณะแฉ่งใหญ่ ช่อห่าง เนื้อละเอียด มีเสี้ยนน้อยมาก รสไม่เผ็ดจัด เมื่อบอกเปลือกออกเนื้อในไม่มีสี หรือมีสีเหลืองเรื่อๆ ตาที่ปรากฏบนแฉ่งมี ลักษณะกลมมน ปลายใบป้านและมีความสูงมากกว่าขิงเล็ก เหมาะสำหรับรับประทานเป็นขิงอ่อน หรือขิงดอง ขิงชนิดนี้มีจำหน่ายมากมายในท้องตลาด

2.2.2 ขิงเล็กหรือขิงเผ็ด บางแห่งเรียกว่า ขิงดำ ลักษณะเป็นแฉ่งเล็ก สั้น ช่อถี่ เนื้อมีเสี้ยนมาก และรสค่อนข้างเผ็ด เมื่อบอกเปลือกออกแล้วมีสีน้ำเงินหรือน้ำเงินปนเขียว ตาบนแฉ่งมีลักษณะ แหลม ปลายใบแหลม การแตกกอดี นิยมใช้ทำยาสมุนไพรและทำขิงแห้ง เพราะให้เมล็ดดีกว่าขิง หยวก แต่ไม่ นิยมปลูกขายในลักษณะขิงอ่อน

2.3 การแปรรูปขิง

ขิงแห้งเป็นสมุนไพรชนิดหนึ่งใช้เป็นส่วนประกอบเพื่อทำยารักษาโรค และใช้เป็นวัตถุดิบ ในการสกัดเอาน้ำมันหอมระเหย วิธีการทำขิงแห้งกระทำไดโดยนำขิงที่ล้างสะอาด ตัดราก และใบ ออกแล้ว ไปแช่น้ำ 1 คืนเพื่อที่จะให้ลอกเยื่อออกได้ง่าย ข้อควรระวัง คือ ไม่ควรใช้มีดลอกเยื่อเพราะจะทำให้ผิว ของขิงเสีย การลอกจะต้องลอก เฉพาะบริเวณแฉ่งขิงเท่านั้น หากว่าลอกลึกเข้าไปในแฉ่งขิงแล้วน้ำมัน หอมระเหยที่อยู่บริเวณผิวจะเสียไปด้วย ต่อจากนั้นให้นำแฉ่งขิงมาล้างทำความสะอาดอีกครั้ง แล้วนำไป ตากแดดประมาณ 1 สัปดาห์ ขณะที่ตากอยู่ควรหมั่นกลับแฉ่งขิงเพื่อให้แฉ่งขิงแห้งทั่วทุกด้าน ระยะเวลาขิง จะแห้งและแข็ง โดยตลอด หากว่าบางครั้งลอกเยื่อออกได้ไม่หมดอาจจะนำเอาแฉ่งขิงที่แห้งแล้วมาถูกัน ไปมา หรือ จะทำการเขย่าให้แฉ่งขิงเสียดสีกันก็จะเป็นการช่วยขจัดเยื่อที่ติดค้างออกไปได้อีก ปกติขิงแก่

100 kg เมื่อนำมาทำเป็นขิงแห้งแล้ว มวลจะลดลงประมาณ 16 - 22 kg การทำขิงแห้งอาจจะ ใช้วิธีผ่าหัวขิง โดยนำขิงทั้งเปลือกมาผ่าซีกตามแนวนอนประมาณ 2 - 4 ซีก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาว ของแงงขิงด้วย แล้วนำออกผึ่งแดดจะช่วยให้การตากแห้งเร็วขึ้น แต่กลิ่นของขิงจะจางลงกว่าวิธีการ ตากทั้งแงง สำหรับอัตราส่วนของขิงสดต่อขิงแห้ง ประมาณ 5 ต่อ 1 (กรมวิชาการเกษตร , 2525)

2.4 องค์ประกอบของขิง

องค์ประกอบในแง่คุณค่าทางโภชนาการ (Nutritional value) ของแงงขิงสด ประกอบด้วยแร่ธาตุต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมี ของแงงขิง (ขิงสด 100 g) กรมวิชาการเกษตร (2525)

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ
ความชื้น (น้ำ)	82 ml
กาก (fiber)	2.1 g
โปรตีน	2.5 g
ไขมัน (fat)	0.8 g
คาร์โบไฮเดรต	11 g
แคลเซียม	20 mg
Thiamine	0.02 mg
เหล็ก	2.5 mg
Riboflavin	0.04 mg
Ascorbic Acid	4.0 mg
Nicotinamide	0.8 mg

2.5 ทฤษฎีพื้นฐานการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการนำน้ำหรือความชื้นออกจากวัสดุ เพื่อให้ความเหมาะสม สะดวกแก่การแปรรูปและเก็บรักษา ความชื้นที่ลดลงเกิดจากการระเหยของน้ำที่ได้รับความร้อน จากตัวกลางที่ใช้อบแห้ง น้ำจะระเหยเมื่อได้รับความร้อนเท่ากับความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งได้แก่ ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน คือ การนำ การพา การแผ่รังสี และ ทฤษฎีการถ่ายเทมวล ในอดีตการอบแห้งวัสดุส่วนใหญ่จะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง และปัจจุบันได้มีการนำไอน้ำร้อนยวดยิ่งมาใช้อบแห้งมากขึ้น

การอบแห้งโดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่เพิ่มอุณหภูมิวัสดุ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การอบแห้งอาหารส่วนใหญ่มีช่วงอัตราการอบแห้งคงที่น้อย ไม่ค่อยสังเกตเห็น จนอาจสมมติได้ว่าการอบแห้งมีเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น

การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ซึ่งมีไอน้ำเป็นส่วนประกอบเพียงอย่างเดียว ความดันย่อย (Partial pressure of vapor) จึงมีค่าเท่ากับความดันไอรวม (total pressure) การระเหยของน้ำในวัสดุ จะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุได้รับความร้อนจากไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จนถึงจุดเดือดหรือสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ (boiling temperature of water) น้ำในวัสดุจึงสามารถระเหยออกไปได้ ดังนั้นการอบแห้งวัสดุจึง แบ่งออกได้ 3 ช่วงคือ

1. ช่วงเพิ่มอุณหภูมิความชื้นวัสดุ (Heat up Period) ในช่วงแรกของการอบแห้งความร้อนที่ให้กับวัสดุจะอยู่ในรูปของ Sensible heat โดยทำการให้อุณหภูมิของความชื้นวัสดุสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิกระเปาะเปียก สำหรับการอบแห้งด้วยลม ร้อน แต่สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อุณหภูมิของความชื้นวัสดุจะสูงขึ้นจนถึงจุดเดือด ของน้ำในวัสดุ ซึ่งจะเป็นช่วงที่ใช่ปริมาณความร้อนสูง และถ้า Degree of superheat ไม่สูงพอ จะทำให้เกิดการกลั่นตัวของไอน้ำที่ผิววัสดุ ซึ่งทำให้ความชื้นในวัสดุเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณไอน้ำกลั่นตัวจะ ขึ้นอยู่กับ Thermal diffusivity ในวัสดุ ความชื้นในวัสดุ และ degree of superheat

2. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant degree of superheat) การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลเกิดขึ้นเฉพาะ บริเวณรอบๆ ผิวของวัสดุเท่านั้น การนำความร้อนจะผ่านจากไอน้ำไปยังผิวด้านนอกของวัสดุ (External surface) โดยมีผลต่างของอุณหภูมิตั้งแต่ระหว่างไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความชื้นผิววัสดุเป็นแรง ขับเคลื่อน และเนื่องจากโดยรอบวัสดุประกอบไปด้วยไอน้ำ ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจึงไม่ได้เกิด จากกลไกการแพร่ (diffusional mass transfer) แต่เกิดจากการระเหยน้ำที่ผิวด้านนอกของวัสดุไป ในทันที โดยมีกลไกการพามวลของไอน้ำมาจากภายในวัสดุ ซึ่งเกิดจากความแตกต่างระหว่างความดันไอของไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับความดันไอที่ผิวของวัสดุเป็นแรงขับเคลื่อน อุณหภูมิของความชื้น วัสดุจะคงที่ที่จุดเดือดของน้ำที่ความดันในระบบ ตลอดจนกระทั่งความชื้นลดลงจนถึงความชื้นวิกฤต ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาจากไอน้ำร้อนยวดยิ่งไปยังวัสดุมีค่าเท่ากับความแตกต่างของเอนทัลปีของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

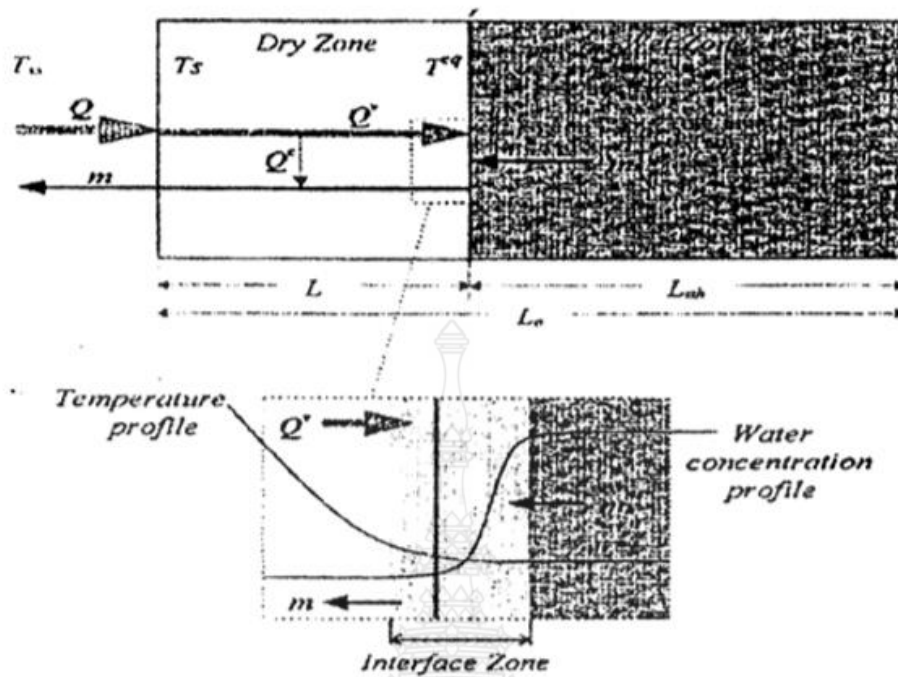
3. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling degree of superheat) ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงความชื้นของน้ำในวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤต การถ่ายเท ความร้อนและการถ่ายเทมวลไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น แต่เกิดการถ่ายเทในเนื้อวัสดุด้วยตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้ง คือ

อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ขณะที่ความเร็วลมมีอิทธิพลน้อยมากในช่วงนี้ เนื่องจากความเร็วลมช่วยลดความหนาของชั้นฟิล์มอากาศ เป็นผลให้ ความต้านทานในชั้นฟิล์มอากาศลดลง แต่มีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับความต้านทานตัวอื่น เช่น ความต้านที่ผิวและในวัสดุ

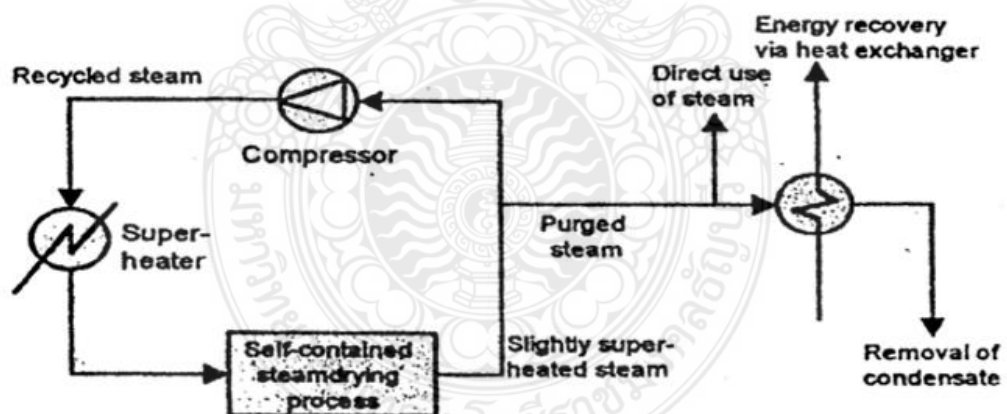
การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความร้อนขึ้นจากผิววัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง อัตราการระเหยของน้ำจะถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการ เคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุ แต่ส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำลดลงในขณะที่อัตราการ ถ่ายเทความร้อนจากของไหลมายังวัสดุยังคงเท่าเดิม ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิของน้ำในวัสดุมีค่าสูง และความดันไอน้ำในวัสดุจะสูงกว่าความดันไอน้ำในตัว อัตรการระเหยน้ำในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุมากกว่าคุณสมบัติของตัวกลางที่ใช้ออบแห้ง แต่การเพิ่มอุณหภูมิของตัวกลางที่ใช้ออบแห้งจะส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น

อัตราการอบแห้งลดลงจะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในวัสดุมีน้อยลง [3] ทำให้ชั้นวัสดุซึ่งถัดจากผิว ด้านนอกแห้ง เรียกว่า ชั้นแห้ง (Dry layer) การนำความร้อนจะผ่านจากไอน้ำไปยังที่ผิวด้านนอกของวัสดุ ชั้นแห้ง และภายในวัสดุซึ่งเปียกหรือชื้นเปียก (wet zone) ตามลำดับ (ดังรูปที่ 2.2) โดยมีผลต่างของอุณหภูมิมระหว่างไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับแต่ละโซนดังกล่าวในวัสดุเป็นตัวผลักดัน ในกรณี ของการถ่ายเทความร้อนจะเกิดเฉพาะบริเวณชั้นแห้ง โดยการระเหยน้ำภายในชั้นแห้งไปในทันที โดยมีผลต่างของความดันไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความดันไอน้ำในวัสดุเป็นตัวผลักดัน ชั้นแห้งจะแผ่ขยายเข้าไปยังโซนเปียก ภายในโซนเปียกเองจะไม่มี การระเหยเกิดขึ้น นอกจากนี้ชั้นแห้งยังเพิ่ม ความต้านทานการนำความร้อน ทำให้การอบแห้งลดลง

การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จะใช้ไอน้ำร้อนเป็นแหล่งความร้อนและเป็นตัวกลาง ในการอบแห้ง การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งนั้นเร็วกว่าการใช้อากาศและให้ผลด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่าด้วย เนื่องจากมีค่าความจุความร้อนจำเพาะและค่าเอนทัลปีสูงกว่า และมีไอน้ำเป็นส่วนประกอบเพียงอย่างเดียว ไม่มีก๊าซอื่นผสมซึ่งจะขัดขวางการระเหยของน้ำจากวัสดุจึงอบแห้งได้ง่ายขึ้น ส่วนในด้านการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งในการอบแห้งจะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงของ ผลิตภัณฑ์ เนื่องจากความดันไอน้ำในวัสดุสูงกว่าความดันไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ทำให้ไอน้ำในวัสดุขยายตัวภายในผนังเซลล์ เมื่อน้ำระเหยออกจากวัสดุจึงเกิดรูพรุนมากมาย การระเหยเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว Dry layer ของวัสดุ (original place) ไม่มีการแพร่ความร้อน ดังนั้นการหดตัวและการ เคลื่อนย้ายของสารละลายต่างๆ ในวัสดุจึงน้อยลงด้วย และในด้านสีของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น เนื่องจาก ไม่มีออกซิเจนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ อันทำให้สีคล้ำ (Elustondo et al, 2002)



รูปที่ 2.2 Sketch of physical model showing the drying layer and wet zone (Elustondo et al, 2002)



รูปที่ 2.3 ระบบการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Elustondo et al, 2002)

รูปที่ 2.3 แสดงไอน้ำที่ผ่านห้องอบแห้งจะนำกลับมาใช้ใหม่ในระบบ ส่วนไอน้ำที่ระเหยจากวัสดุยังมีความร้อนอยู่ คือ ความร้อนแฝงที่เกิดจากการระเหย ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้เป็น ตัวกลางใน

ระบบได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานให้สูงขึ้น จากนั้นไอน้ำจะไหลเวียนผ่าน การเพิ่มความร้อน ปริมาณน้ำที่ระเหยที่มากเกินไปและอุณหภูมิยังสูงอยู่จะนำไปใช้ในงานอื่นๆได้อีก ซึ่งเป็นการนำ พลังงานกลับมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ (efficient energy recovery)

อัตราการอบแห้งวัสดุโดยทั่วไปที่ใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการส่งผ่านความร้อนจะเกิดขึ้น [4] ข้าหรือเร็วนั้นมีปัจจัยที่สำคัญซึ่งมีผลต่ออัตราการอบแห้ง (สมยศ และเทวรัตน์, 2546) ดังนี้

1. ลักษณะทางธรรมชาติของวัสดุเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งของ วัสดุ ถ้าสภาพทางธรรมชาติของวัสดุเอื้ออำนวยต่อการส่งผ่านความร้อนไปยังโมเลกุลของน้ำภายในเนื้อวัสดุ และเอื้ออำนวยต่อการเคลื่อนที่ของไอน้ำออกจากวัสดุ เช่น วัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนโมเลกุลของน้ำ ในเนื้อวัสดุสามารถเคลื่อนที่ออกมาได้ง่ายทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

2. ขนาดและรูปร่างของวัสดุ วัสดุที่มีขนาดและรูปร่างที่ทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตร มากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนให้ทั่วชั้นวัสดุทำให้การระเหยน้ำออกจากเนื้อวัสดุ ดีขึ้น อัตราการอบแห้งจึงเร็วขึ้น

3. ปริมาณและการจัดเรียงวัสดุ วัสดุที่นำมาจัดเรียงซ้อนกันหลายๆ ชั้นในภาชนะทำให้ปริมาณ ของวัสดุต่อภาชนะมากเกินไปทำให้วัสดุที่อยู่บริเวณตรงกลางได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงทำให้บริเวณนั้นมี อัตราการอบแห้งที่ช้า การจัดเรียงที่เหมาะสมควรทำการจัดเรียงเป็นแบบชั้นบาง เพื่อให้วัสดุได้รับความ ร้อนอย่างสม่ำเสมอ

4. อุณหภูมิของอากาศร้อน เมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนสูงขึ้นอัตราการอบแห้งจะเร็วขึ้น เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนกับวัสดุที่มากทำให้การถ่ายเทความร้อนสู่น้ำใน เนื้อวัสดุได้ดี จึงทำให้น้ำในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่และระเหยได้เร็วขึ้น ถึงแม้ว่าอุณหภูมิที่สูงจะทำให้ อัตราการอบแห้งเร็วขึ้นแต่ก็ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ในการอบแห้งด้วย

5. ความชื้นของอากาศร้อน หากความชื้นของอากาศร้อนมีค่ามากจะมีผลให้การเคลื่อนที่ ของน้ำและการระเหยของไอน้ำออกจากเนื้อวัสดุได้ยาก

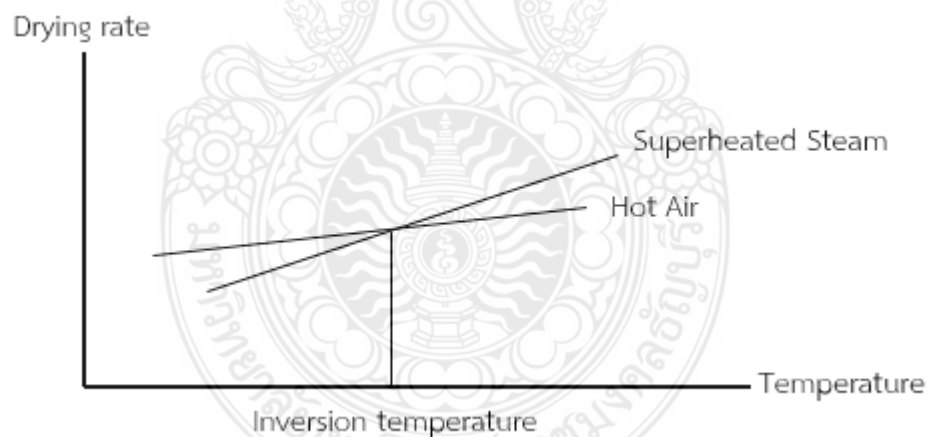
6. ความดันของบรรยากาศ การอบแห้งโดยทั่วไปมักทำที่ความดันหนึ่งบรรยากาศ ถ้าหากมี การลดความดันของบรรยากาศในขณะที่ทำการอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเนื่องจากจะทำให้ จุดเดือดของน้ำลดลง ซึ่งการอบแห้งประเภทนี้เหมาะกับการอบแห้งวัสดุที่เสื่อมคุณภาพได้ง่าย เนื่องจาก ความร้อนเครื่องอบแห้งที่มีการลดความดันในสภาวะการอบแห้ง เช่น เครื่องอบแห้ง สูญญากาศแบบ ลูกกลิ้ง (Vacuum drum drier)

7. ความเร็วลมร้อน ถ้าความเร็วของลมร้อนมีค่ามากจะทำให้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าวัสดุได้ดีขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

8. คุณสมบัติเชิงความร้อนและฟิสิกส์ของวัสดุ คุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งคือ ความร้อนจำเพาะ สภาพการนำความร้อน และการแพร่ความร้อน ส่วนคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นปรากฏ และสัดส่วนช่องว่างอากาศ ในกองวัสดุ

2.6 อุณหภูมิอินเวอร์ชัน (Inversion Temperature)

(Schwartz and Brocker, 1999) การเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ ตำแหน่งอุณหภูมิที่อัตราการอบแห้งวัสดุด้วยตัวกลางทั้ง 2 ชนิดมีค่าเท่ากันเรียกอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งนั้นว่า อุณหภูมิอินเวอร์ชัน (Inversion Temperature) ถ้าอุณหภูมิอบแห้งสูงกว่านี้ พบว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน แต่ถ้าอุณหภูมิลดต่ำกว่านี้ การอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (ดังรูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 แสดงตำแหน่งอุณหภูมิอินเวอร์ชัน (Schwartz and Brocker, 1999)

2.7 ความชื้นสมดุลของวัสดุ

ความชื้นสมดุลของวัสดุมีความสำคัญต่อการศึกษาระบวนการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุ โดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ (เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่) จะทำให้ความชื้นของ

วัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดๆหนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของวัสดุเท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆด้วย ค่าความชื้นสมดุล ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ, อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

2.8 สมการจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

การอบแห้งวัสดุที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุน โดยส่วนใหญ่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การเคลื่อนที่ของน้ำส่วนมากจะอยู่ในรูปของเหลว เป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor diffusion) ที่เป็นไปในลักษณะการแพร่ของน้ำภายในวัสดุ การถ่ายเทมวลภายในอธิบายได้ด้วยสมการการแพร่ความชื้นโดยอาศัยกฎข้อที่ 2 ของ Fick

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 DM \quad (2.1)$$

เมื่อ	M	คือ ความชื้นของวัสดุ , เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
	D	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม , m ² /h
	t	คือ เวลา , h

Crank (1957) สร้างสมการอัตราส่วนความชื้นในระบบแกนโพลาร์สำหรับ 1 มิติ ดังสมการ

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[D \frac{\partial^2 MR}{\partial r^2} + \frac{c}{r} \frac{\partial MR}{\partial r} \right] \quad (2.2)$$

เมื่อ	r	คือ รัศมีทรงกลม , m
	c	คือ ค่าคงที่

จากสมการที่ (2.2) เมื่อ $c = 0$ สำหรับการแพร่ความชื้นในวัสดุแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก $c = 1$ สำหรับการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกระบอกยาวมาก $c = 2$ สำหรับการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกลม โดยที่สภาวะเริ่มต้นและภาวะขอบเขตสามารถเขียนได้ว่า

$$\begin{aligned}
 M(x,0) &= M_{in} \\
 M(0,t) &= M(1,t) = M_{eq}
 \end{aligned}$$

- เมื่อ x คือ ระยะใดๆ , m
 1 คือ ความหนาของวัสดุ , m
 M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ , เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
 M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ , เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

จากสมการที่ (2.2) ซึ่งสอดคล้องกับ ภาวะเริ่มต้นและภาวะขอบเขต กำหนดสำหรับสมการ จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งวัสดุแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก (infinite slab) สามารถหาได้ดัง สมการ (2.3)

$$MR(t) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^2} \exp \left[-(2m+1)^2 \pi^2 \frac{D_{eff} t}{L^2} \right] \quad (2.3)$$

- เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย
 D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล , m/h²
 L คือ ความหนาของวัสดุ , m
 m คือ จำนวนเทอม (0 , 1 , 2 , ...n)

2.9 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

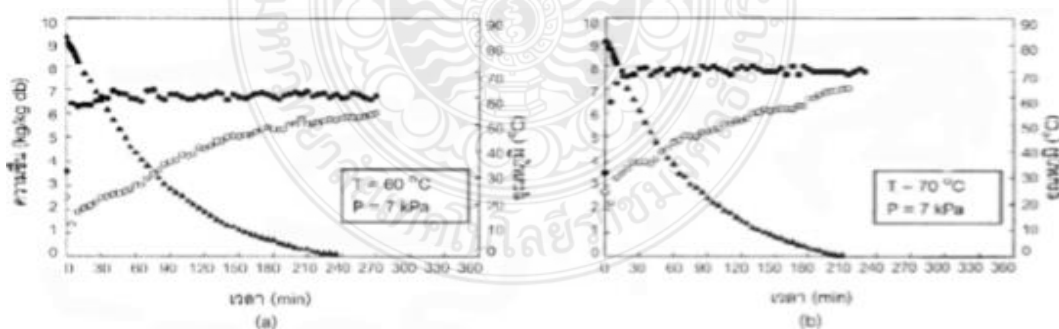
ความสามารถในการแพร่ความชื้นของวัสดุจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการอบแห้งและความชื้นของวัสดุ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิมอบแห้ง สามารถอธิบาย ในรูปของสมการ Arrhenius ดังนี้

$$D_{eff} = D_0 \exp \left(\frac{-E_a}{RT_{abs}} \right) \quad (2.4)$$

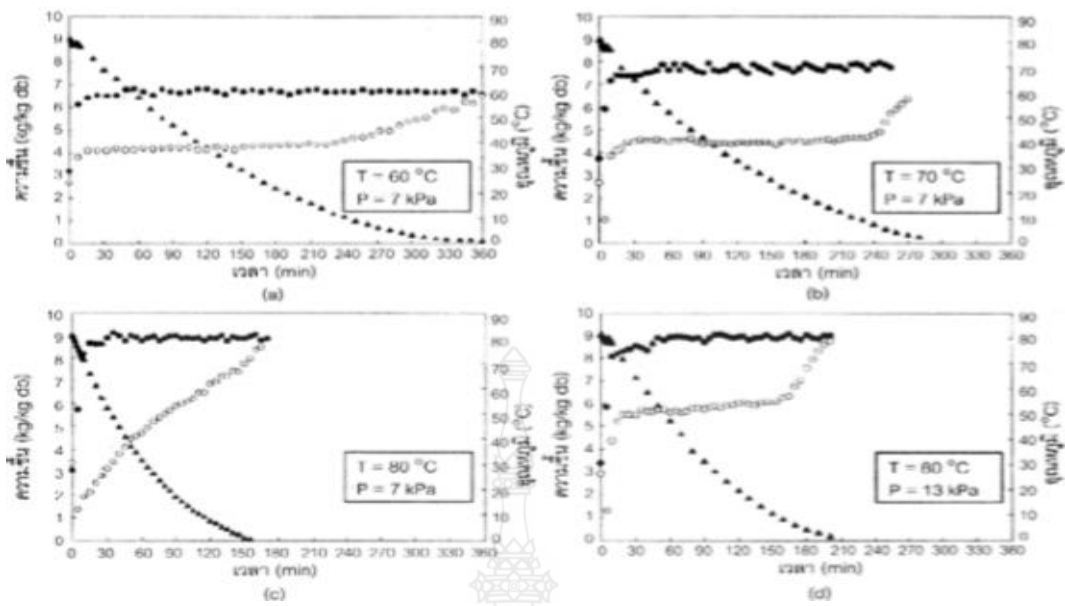
- เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล , m/h²
 D_0 คือ Arrhenius factor , m²/h
 E_a คือ พลังงานกระตุ้น , kJ/kmol
 R คือ ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 8.314 , J/mole-K
 T_{abs} คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ , K

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Devahastin et al (2004) [5] ได้ทำการอบแห้งแครอทด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำ พบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและที่อบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศจะมีลักษณะคล้ายกับกรณีของการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศ ยกเว้นแต่ช่วงอุณหภูมิมีค่าคงที่จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าซึ่งเป็นผลจากอุณหภูมิมืดตัวของไอน้ำจะมีค่าลดลงเมื่อความดันในห้องอบแห้งลดลง รูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ (แครอท) ซึ่งอบด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำและอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ จากรูปที่ 2.6 (c) จะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เมื่ออบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งอาจไม่ปรากฏช่วงอุณหภูมิซึ่งมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิมืดตัวของไอน้ำให้เห็นอย่างเด่นชัดหากอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าสูงๆหรืออบแห้งภายใต้ความดันต่ำมากๆ



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแครอทที่อบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Devahastin et al , 2004)



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแครอทที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำ (Devahastin et al , 2004)

อาทิตย์ (2007) [6] ได้ทำการอบแห้งซิงด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เพื่อลดความชื้นเริ่มต้นจนถึงความชื้นสุดท้าย ไม่เกิน 12% (มาตรฐานเปียก) ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 110 130 และ 150 °C ความเร็วลมที่ 0.3 1.2 และ 3.4 m/s พบว่าที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 150 °C ความเร็วลม 0.3 1.2 และ 3.4 m/s เฉลี่ยอัตราการอบแห้งอยู่ระหว่าง 0.17 , 0.19 และ 0.27 $\text{kg}_\text{น้ำ}/\text{h}$ ที่อุณหภูมิ 130 °C เฉลี่ยอัตราการอบแห้งอยู่ระหว่าง 0.13 , 0.15 และ 0.19 $\text{kg}_\text{น้ำ}/\text{h}$ และเมื่อใช้อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 110°C เฉลี่ยอัตราการอบแห้งอยู่ระหว่าง 0.09 , 0.12 และ 0.14 $\text{kg}_\text{น้ำ}/\text{h}$ ซึ่งซิงที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 130 และ 150 °C ให้อัตราการอบแห้งสูง แต่คุณภาพซิงแห้งจะเกิดการไหม้บางส่วนก่อนที่ซิงแห้งจะลดความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 12% (มาตรฐานเปียก) ดังนั้นอุณหภูมิสูง 130 และ 150°C จึงไม่เหมาะเท่าไร ส่วนที่อุณหภูมิ 110 °C ซิงแห้งจะไม่เกิดการไหม้และมีคุณภาพ แต่ก็ต้องยอมรับอัตราการอบแห้งที่ต่ำด้วย

Elustondo , et al. (2002) [3] ได้ศึกษาการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำกับผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ แผ่นไม้ กุ้ง กล้วย แอปเปิ้ล มันฝรั่ง และ มันสำปะหลัง โดยใช้ไอน้ำที่ความดัน 10 – 20 kPa อุณหภูมิของไอน้ำ 60 – 90 °C และความเร็วในการหมุนเวียนไอน้ำ 2 – 6 m/s

พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถอธิบายกลไกการอบแห้งได้ดี แต่ไม่มีการศึกษาถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์

ดลฤดี (2543) [7] ได้สร้างเครื่องอบแห้งแบบตู้ใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน เพื่อทดลองเปรียบเทียบการอบแห้งและคุณภาพของกุ้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับการอบแห้งด้วยลมร้อน โดยการทำการทดลองที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120 – 180 °C และอุณหภูมิลมร้อน 70 – 140 °C เพื่อลดความชื้นจาก 82 % wet basis ให้เหลือ 20 % wet basis และพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการอบแห้ง คุณภาพกุ้งหลังการอบแห้งที่นำมาใช้ในการประเมินคือ การหดตัว สี และการประเมินด้วยประสาทสัมผัสโดยการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่เหมาะสมต่อการอบแห้งกุ้งอยู่ในช่วงระหว่าง 140 – 160 °C และอุณหภูมิ inversion ของกุ้งน่าจะอยู่ที่ประมาณ 140 °C และช่วงอุณหภูมิดังกล่าวพบว่าคุณภาพกุ้งในด้านต่างๆ อยู่ในระดับที่ยอมรับได้

อิศเรศ (2543) [8] ได้สร้างเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน โดยการพิจารณาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆต่อการอบแห้งและคุณภาพของข้าวเปลือกที่สภาวะ ความชื้นเริ่มต้น 25- 43 % d.b. ความชื้นสุดท้าย 16 -28 % d.b. ความสูงของเบตข้าวเปลือก 10 -15 cm. อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 150 -170 °C ความดันไอน้ำในระบบอบแห้งประมาณ 2.6 m/s พบว่า ความเร็วต่ำสุดของไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งมากกว่าความสูงของเบตข้าวเปลือก ที่ความสูง 10 cm. ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 1.3 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดไดซ์เบด อุณหภูมิอินเวอร์ชัน (inversion) มีค่าต่ำกว่า 150 °C เล็กน้อย

Tang และ Cenkowski (2000) [9] ได้ศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งมันฝรั่งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อน ที่สภาวะอุณหภูมิจากการอบแห้ง 120 , 145 และ 165 °C พบว่าในช่วงเริ่มต้นการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะเกิดการควบแน่นที่บริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิของตัวกลางของไอน้ำร้อนยวดยิ่งในการอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้ง การแพร่ ถ้าอุณหภูมิจากการอบแห้งจาก 125 ถึง 165 °C จะลดเวลาในการอบแห้งลง 60 % สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและ 24 % สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ช่วงอุณหภูมิ Inversion อยู่ระหว่าง 145 ถึง 165 °C

Tatemoto และคณะ (n.d.) [10] ศึกษาสมรรถนะการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งระบบปิด พบว่าผลกระทบจากการเริ่มต้นการอบแห้ง มีการเติมอากาศเข้าสู่ระบบ อากาศเหล่านี้จะเข้าไปแทนที่ไอน้ำที่ผลิตภัณฑ์ ผลการทดลองจะสามารถอธิบายคุณลักษณะ ขนาดของรู มีผลต่อการอบแห้งน้อย ในช่วงที่เกิดการกลายเป็นไอ ไอน้ำจะปรากฏในบริเวณแคบๆ ซึ่งจะเคลื่อนที่เข้าสู่ด้านล่างของตัวอย่าง

ขณะที่โอเหล่านี้เคลื่อนตัวจะมีผลต่อสมรรถนะของการอบแห้ง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วให้สูงขึ้น ความชื้นของตัวกลางในการอบแห้งสูงขึ้นเป็นเหตุให้ระยะเวลาในการอบแห้งจึงสั้นลง

อติคม (2546) [11] ได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการนึ่งข้าวกล้องด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันซึ่งพิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิในการแช่ ระยะเวลาในการแช่ อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และความสูงเบดที่มีผลต่อคุณภาพข้าวในด้านปริมาณต้นข้าว ความขาวของข้าวสาร White belly และ ความหนืดของแป้งข้าว ทำการทดลองโดยใช้ข้าวกล้องที่มีความชื้นเริ่มต้นก่อนแช่ 12.80 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง แช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 70-90 °C เป็นระยะเวลา 0.5-2 hour นำมาอบแห้งที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120-160 °C ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งเท่ากับ 3.9 m/s และความสูงเบด 8-12 cm พบว่าความชื้นหลังการอบแห้งข้าวกล้องด้วย ไอน้ำยวดยิ่งที่เหมาะสมควรสูงกว่า 28 % d.b. โดยที่เปอร์เซ็นต์ข้าวยังสูงอยู่โดย คุณภาพด้านความขาวและ White belly อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ถ้าลดความชื้นต่ำกว่านี้เปอร์เซ็นต์ต้น ข้าวจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความขาวของข้าวสารจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความชื้นต่ำกว่า 18 % d.b. สำหรับ White belly จะลดลงเมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น จากคุณสมบัติ ความหนืดของแป้งแสดงให้เห็นว่า ข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีความแข็งและร่วน มากกว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อน เนื่องจากข้าวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเกิดการเจลาไทไนเซชันมากกว่าข้าวที่อบแห้งด้วยอากาศร้อน และพบว่าข้าวกล้องที่ผ่านการแช่และอบแห้งด้วย ไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีลักษณะเป็นข้าวนี้

ทวีชัย (2543) [12] ได้ศึกษาจลศาสตร์การอบแห้งหน่อไม้เปรียบเทียบ ระหว่างการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับการอบแห้งด้วยลมร้อน เพื่อหาวิธีการอบแห้ง ที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งหน่อไม้ โดยทำการทดลองอบแห้งหน่อไม้ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และลมร้อนที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160 °C อัตราการไหลเชิงมวลประมาณ 0.024 kg/s มวลหน่อไม้ประมาณ 0.5 kg เพื่อลดความชื้นจากประมาณ 19 dry basis ลงเหลือประมาณ 0.17 dry basis และทำการเปรียบเทียบคุณภาพหน่อไม้หลังการอบแห้งระหว่างหน่อไม้แห้ง ที่ได้จากกระบวนการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ลมร้อนอุณหภูมิสูง ลมร้อนอุณหภูมิต่ำ (55 และ 70 °C) และหน่อไม้ตากแห้งที่มีจำหน่ายในตลาด พบว่าอัตราการอบแห้งหน่อไม้ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 °C ต่ำกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน และมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันเมื่ออุณหภูมิ อบแห้งสูงขึ้นอยู่ในช่วง 140-160 °C ซึ่งมีค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้อุณหภูมิต่ำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ทำนายอัตราการอบแห้งซึ่งมีสมมติฐาน การแพร่ ความชื้นและการถ่ายเทมวลที่ผิวเป็นกลไกควบคุมการอบแห้ง สามารถทำนายการอบแห้งได้ ค่อนข้างดีทั้งการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน จากผลการคำนวณอัตราการอบแห้ง จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

พบว่า ความเร็วที่เหมาะสมในการอบแห้งหน่อไม้อยู่ในช่วง 1.5-2 m/s คุณภาพในด้านสีของหน่อไม้หลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนโดยใช้ อุณหภูมิสูงตลอดการอบแห้งอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่ดีนักเมื่อเทียบกับหน่อไม้แห้งที่มีจำหน่าย ขณะที่สีของหน่อไม้จากการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิต่ำอยู่ในเกณฑ์ที่ดีและน่ารับประทาน

ณัฐวิทย์ (2550) [13] ได้วิจัยและพัฒนาสมการจลนศาสตร์การอบแห้งของกล้วยน้ำว้าโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามด้วยลมร้อน และศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและคุณภาพของกล้วยน้ำว้าหลังการอบแห้ง โดยทำการทดลองอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 , 140 และ 160 °C ความเร็วลม 2m/s และลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 , 80 และ 90 °C ความเร็วลม 0.7 m/s โดยทำการอบแห้งจนกล้วยน้ำว้ามีความชื้นสุดท้าย 6% d.b. จากนั้นทำการวิเคราะห์คุณภาพสี เนื้อสัมผัส และการหดตัวของกล้วยน้ำว้าหลังการอบแห้ง พบว่าการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งในช่วงแรกค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมและค่าคงที่การอบแห้งมีค่ามากเมื่ออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้น ส่วนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนในช่วงที่สอง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมและค่าคงที่การอบแห้งมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้น และจากการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากสมการการอบแห้งทางทฤษฎีและกึ่งทฤษฎีมาใช้นำมาทำนายผลการทดลองการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งร่วมกับลมร้อน พบว่าสมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎีสามารถทำนายได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าสมการการอบแห้งทางทฤษฎี และพบว่าเมื่ออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้นและอุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้นจะทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลง และการอบแห้งกล้วยน้ำว้าโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามด้วยลมร้อนสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งให้สั้นลง เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว

ภัทรนิษฐ์ (2553) [14] ได้ศึกษาเทคนิคอบแห้งซิงโดยใช้ ไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ โดยคุณลักษณะซิงซึ่งมีขนาดกว้าง 1.5 cm. ยาว 1.5 cm. และหนา 3 cm. อบแห้งที่ระดับกำลังคลื่นไมโครเวฟ 3 ระดับ ได้แก่ 115, 204, 279 watt ร่วมกับความดันสัมบูรณ์ที่ระดับ 160, 360, 560, และ 760 mmHg ผลการศึกษา พบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลงเมื่อเพิ่มกำลังคลื่นไมโครเวฟและลดระดับความดันสัมบูรณ์ คุณลักษณะในการอบแห้งสามารถอธิบายโดยใช้แบบจำลอง Modified Page สภาวะการอบแห้งมีผล ต่อคุณภาพด้านสี, เนื้อสัมผัส, การหดตัวของตัวอย่าง และ โครงสร้างจุลภาคซึ่งพิจารณาจากภาพถ่าย จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยพบว่าที่ระดับของความดันสัมบูรณ์ต่ำและระดับ ไมโครเวฟสูง ซิงอบแห้งมีการเปลี่ยนแปลงของสีน้อย ลักษณะเนื้อสัมผัส การรับแรงกดทับบนชิ้น ตัวอย่างได้ และการหดตัวของซิงน้อย จากถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

แบบส่องกราด พบว่าโครงสร้างจุลภาคเชิงอบแห้งเกิดการพองตัวที่ระดับกำลังไมโครเวฟสูงขึ้นและที่ระดับความดัน สัมบูรณ์ต่ำ ทั้งนี้การอบแห้งที่ระดับกำลังคลื่นไมโครเวฟ 279 วัตต์ร่วมกับความดันสุญญากาศที่ระดับ 160 mmHg ใช้ระยะในการอบแห้งสั้นที่สุดและให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีที่สุด

2.11 ข้อดีข้อเสียการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (ยูวนารี , 2545)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่า [15] การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจ เนื่องจากข้อดีและข้อเสียต่างๆ ของงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ดังนี้

2.11.1 ข้อดี

- 1) ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือเกิดการเผาไหม้เนื่องจากไม่มีแก๊สออกซิเจนในระบบ ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น เช่น สีของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง
- 2) อัตราการอบแห้งสูงทั้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และช่วงอบแห้งลดลงซึ่งขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ค่าการนำความร้อน และค่าความจุความร้อนของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ในช่วงการอบแห้งลดลงเมื่อใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงกว่า ทำให้อัตราการอบแห้งสูง
- 3) ผลิตภัณฑ์ที่มีพิษ หรือกลิ่นที่ต้องการนำมาใช้งาน สามารถนำมาสกัดเป็นสารระเหยใช้ได้
- 4) การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งสามารถฆ่าเชื้อโรค หรือกำจัดกลิ่นของอาหารได้

2.11.2 ข้อเสีย

- 1) ระบบมีความซับซ้อน จำเป็นต้องมีการป้องกันการรั่วซึม การนำเข้าผลิตภัณฑ์และการนำออกจะต้องไม่มีการรั่วซึมของอากาศ ในตอนเริ่มเดินเครื่องและหยุดเดินเครื่อง อาจเกิดการกลั่น ตัวของไอน้ำขึ้นได้
- 2) เมื่อมีผลิตภัณฑ์เข้ามาในระบบ ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการกลั่นตัวของไอน้ำได้ ทำให้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น 10-15 % ที่ความดันบรรยากาศ (การอบแห้งจะเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 100 °C ด้วยอัตราการอบแห้งคงที่ เมื่อน้ำที่ผิวถูกระเหย)
- 3) ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการกระบวนการออกซิเดชันเพื่อที่จะได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการไม่สามารถใช้การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งได้ แต่สามารถแก้ไขด้วยการแบ่งออกเป็น 2 ช่วง (อบด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งก่อน แล้วอบด้วยลมร้อนภายหลัง) เช่น การอบรังไหม
- 4) ราคาของอุปกรณ์ประกอบสูง เช่น ระบบป้อนผลิตภัณฑ์ ระบบเก็บผลิตภัณฑ์ และระบบการนำไอน้ำกลับมาใช้ใหม่ เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณามากกว่า ราคาของห้องอบแห้งแบบเดียว

การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งโดยทั่วไปจะใช้ระบบใหญ่ๆ และเป็นระบบที่ต่อเนื่อง เพราะมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากกว่า

2.12 ผลกระทบของการอบแห้งต่อผลิตภัณฑ์

2.12.1 เนื้อสัมผัส ลักษณะเนื้อสัมผัสนี้มีความสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากอาหารแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ทั้งโครงสร้างและคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความแตกต่างด้านความอ่อนแก่ของวัตถุดิบ และความแตกต่างจากกรรมวิธีการแปรรูป การเปลี่ยนแปลงลักษณะของเนื้อสัมผัสอาจเกิดขึ้นเมื่อสสารเกิดการเปลี่ยนแปลงในเซลล์ การเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการอบแห้งส่วนต่างๆ ของอาหารทำให้เกิดความเครียดภายในทำให้อาหารเหี่ยวและปริมาตรลดลง อาหารต่างชนิดกันมีระดับการหดที่ต่างกัน การสูญเสียน้ำทำให้เซลล์อาหารหดตัวจากผิวออก ส่วนที่แข็งจะคงสภาพได้ส่วนที่อ่อนจะเหี่ยวลง อาหารที่มีน้ำมากจะหดตัวบิดเบี้ยวได้มาก และการอบแห้งอย่างรวดเร็วจะทำให้อาหารหดตัวน้อยกว่าการอบแห้งอย่างช้าๆ นอกจากนี้ตัวกลางในการอบแห้งที่ต่างกันยังส่งผลต่อระดับการหดตัวของอาหารอีกด้วย Fellows (1993) [16] ได้รายงานสัดส่วนโดยประมาณสำหรับการอบแห้ง การหดตัว และการคืนตัวของผักและผลไม้บางชนิดแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2.2 อัตราการอบแห้ง การหดตัวและการคืนตัวของผักและผลไม้บางชนิด Fellows (1993)

ผัก	อัตราการอบแห้ง (Drying Ratio)	อัตราการหดตัวโดยรวม (Overall Shrinkage Ratio)	อัตราการคืนตัว (Rehydration Ratio)
กะหล่ำปลี	11.5	21.0	10.5
แครอท , ลูกเต๋า	7.5	12.0	7.0
หอมหัวใหญ่ , แผ่นบาง	7.0	8.0	5.5
พริกไทยสด	17.0	22.0	8.0
ผักโขมฝรั่ง	13.0	13.5	5.0
แผ่นมะเขือเทศ	14.0	20.0	5.0

อุณหภูมิ และอัตราการอบแห้งมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร การอบแห้งอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำน้ำจะ

เคลื่อนที่จากด้านในออกมาด้านนอกเมื่อน้ำระเหยออกไปจะทำให้ตัวถูกละลายมีความเข้มข้นที่ผิวมากขึ้น ถ้าอากาศมีอุณหภูมิสูงโดยเฉพาะเมื่อนำมาอบแห้งกับผลไม้ ปลา และเนื้อสัตว์ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และทางกายภาพที่ซับซ้อนและผิวนอกของอาหารจะแข็งขึ้นเรียกว่า การเกิดผิวแห้งแข็ง (Case Hardening) ซึ่งจะลดอัตราการอบแห้งและทำให้อาหารมีผิวหน้าแห้งแต่ภายในชื้น การควบคุมสภาวะการอบแห้ง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของความชื้นด้านในและที่ผิวอาหารจะช่วยลดเหตุการณ์ดังกล่าวไว้ (วีไล รังสาดทอง , 2546) [17]

2.12.2 การคืนตัว (Rehydration) การคืนตัวหรือการดูดคืนน้ำไม่ใช่ปฏิกริยาย้อนกลับของการอบแห้ง การเปลี่ยนแปลงด้านลักษณะเนื้อสัมผัสและการเคลื่อนที่ของตัวละลายและการสูญเสียสารระเหยไม่สามารถเกิดแบบย้อนกลับไปเหมือนเดิมได้ ความร้อนลดระดับการดูดคืนน้ำของแป้งและความยืดหยุ่นของผนังเซลล์ทำให้โปรตีนจับตัวกันและลดความสามารถในการอุ้มน้ำ ด้วยเหตุของการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราสามารถใช้อัตราเร็วของการดูดคืนน้ำเป็นตัวชี้วัดคุณภาพของอาหารได้ สภาวะการอบแห้งที่แห้งที่เหมาะสมจะทำให้อาหารเกิดความเสียหายน้อยกว่าและดูดคืนน้ำได้เร็วกว่าอาหารที่อบแห้งที่ไม่เหมาะสม อัตราการคืนตัวของผลิตภัณฑ์สามารถหาได้จาก ปริมาตร หรือน้ำหนักของผลิตภัณฑ์อบแห้งภายหลังการคืนตัวเทียบกับปริมาตร หรือน้ำหนักของผลิตภัณฑ์อบแห้งก่อนการคืนตัว

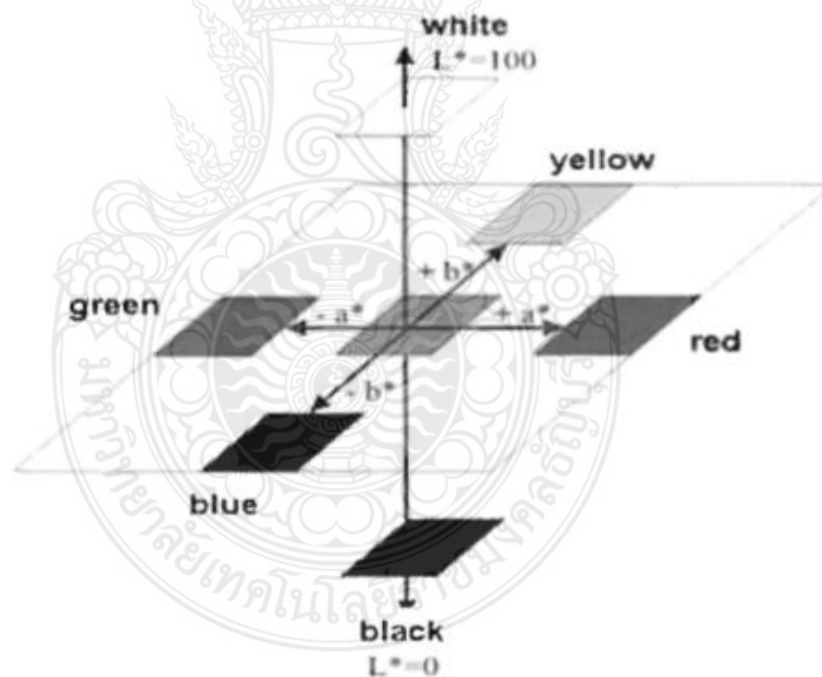
2.12.3 สี ผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดมักจะเกิดการเปลี่ยนสี เป็นสีเข้มหรือคล้ำมากขึ้นหรือกลายเป็นสีน้ำตาลในระหว่างการบวนการผลิต และการเก็บรักษาอันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกริยา ทั้งแบบที่มีเอนไซม์และไม่มีเอนไซม์ การเกิดปฏิกริยาดังกล่าวมีความสำคัญต่อคุณภาพของอาหาร ซึ่งอาจทำให้อาหารมีคุณภาพดีขึ้นหรือเลวลงได้ ดังนั้นปฏิกริยาการเปลี่ยนสีนี้จึงมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมอาหาร ทั้งนี้สามารถป้องกันได้โดยการลวกหรือการใช้กรดแอสคอร์บิกหรือซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แต่สารจำพวกซัลไฟต์ทำให้เกิดการแพ้อย่างรุนแรงในคนที่เป็นโรคหอบหืดบางคนด้วยเหตุนี้จึงได้มีการจำกัดการใช้ซัลไฟต์ ปริมาณซัลเฟอร์ที่ตกค้างอยู่เป็นสาเหตุสำคัญของการเปลี่ยนสีผักผลไม้ในระหว่างการเก็บรักษา ในการวัดสีของอาหารส่วนใหญ่ที่นิยมใช้กัน 3 ระบบ ดังนี้

1) Tristimulus System หรือ CIE System เป็นการวัดสีในระบบ 3 มิติ โดยวัดเป็นค่า Energy Distribution of Light, Reflectance Curve และค่า Chroma ค่าที่วัดได้เป็นค่า X(สีแดง) Y(สีเขียว) Z(สีน้ำเงิน)

2) Munsell System การวัดค่าสีของอาหารโดยระบบ Munsell นั้นประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่1 เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของสีต่างๆ เมื่อนำมารวมกันแล้วจะเท่ากับ 100 เสมอ ส่วนที่2 เป็นการแสดงรายละเอียดของสีแต่ละชนิดคือ Hue, Value และ Chroma

3) Hunter System พัฒนามาจากเครื่องวัดค่าสีระบบ Tristimulus ซึ่งมีข้อดีคือ เป็นเครื่องวัดสีที่มีราคาถูก มีความเหมาะสมและสามารถวัดค่าสีได้รวดเร็ว จึงเป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องวัดสีในระบบ Hunter ประกอบด้วยวงจรรวม 3 ชุด และมีชุดกรองแสง รวมทั้ง Photocell ที่สามารถให้ค่า X , Y , Z ได้ใกล้เคียงกับระบบ CIE โดยค่าสีที่ระบบ Hunter วัดออกมาในรูปของ L , a และ b หรือ L^* , a^* และ b^* ดังรูปที่ 2.7

การอบแห้งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะผิวของอาหาร โดยทั่วไปการอบแห้งที่เวลานานกว่าและอุณหภูมิสูงกว่าจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากกว่า นอกจากนี้การใช้ตัวกลางในการอบแห้งที่แตกต่างกันส่งผลให้คุณภาพของอาหารในด้านสีแตกต่างกันด้วย



รูปที่ 2.7 หลักการวัดสีใน Hunter System [5]

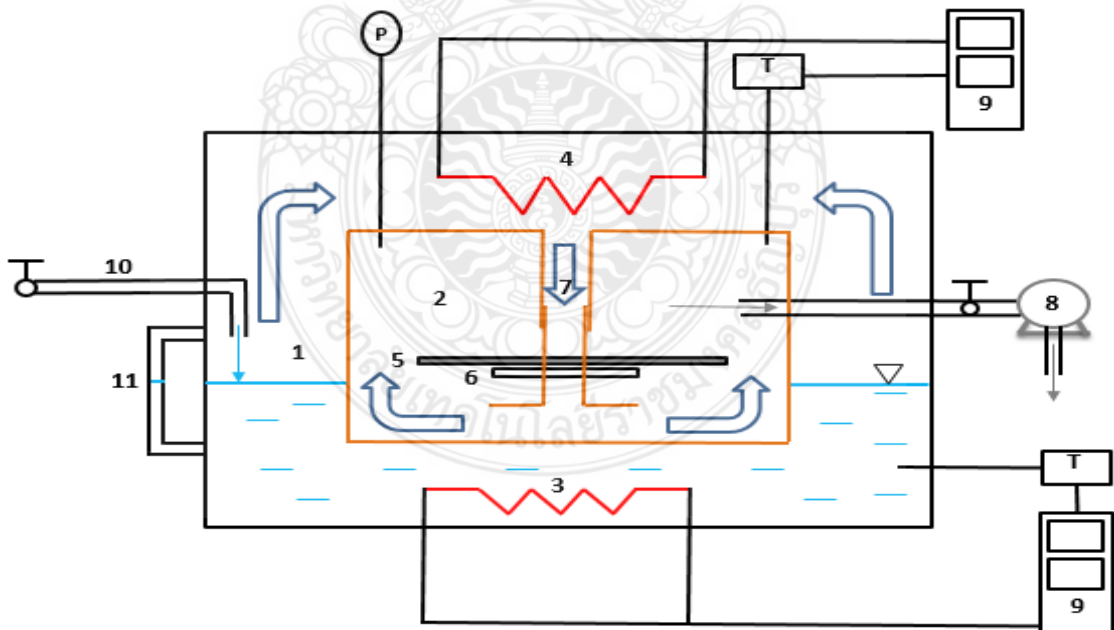
บทที่ 3

วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งซึ่งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำที่อุณหภูมิ 100 115 และ 125 °C ที่ความดัน 0.6 0.7 และ 0.8 bar จนเหลือความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 12% d.b. ทดสอบเปรียบเทียบคุณภาพในด้านสี การหดตัว และการคืนตัว เพื่อวิเคราะห์คุณภาพของซิงหลังการอบแห้ง ซึ่งรายละเอียดของการดำเนินการทดลองในแต่ละส่วนมีดังนี้

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำที่ใช้การอบซิงแห้งในงานวิจัยนี้สามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพระบบการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ

จากรูปที่ 3.1 เครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำประกอบด้วยอุปกรณ์ดังนี้

1. ห้องไอน้ำ (Steam room)
2. ห้องอบแห้ง (Drying chamber)
3. อุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) ขนาด 4.5 kW
4. อุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) ขนาด 1.8 kW
5. ตะแกรงวางตัวอย่าง (Sample rack)
6. ตัวบันทึกน้ำหนัก (Load cell)
7. ท่อนำไอน้ำ (Steam pipe)
8. ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) อัตราการไหล 128 L/s
9. ชุดควบคุม (PID controller)
10. ท่อเติมน้ำ (Water pipe)
11. หลอดวัดระดับน้ำ (Sight glass)
- P. มาตรวัดความดัน (Pressure gauge)
- T. มาตรวัดอุณหภูมิ (Temperature gauge)



รูปที่ 3.2 เครื่องอบแห้งซึ่งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมวัสดุ

นำขิงอายุ 8 – 12 เดือนที่มีลักษณะทั้งแงงหรือเป็นชิ้น (Cut piece) ที่มีความยาวไม่น้อยกว่า 2 cm และกำหนดขนาดความหนาของขิงที่สับแล้วประมาณ 0.3 – 0.5 cm มวลรวมขิงสับประมาณ 200 g

3.2.2 การหาปริมาณความชื้น

นำขิงหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ มาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 72 hour ตามมาตรฐาน Association of Official Analytical Chemists [AOAC], (1980) วางแผ่กระจายเป็นชั้นบางในห้องอบขณะอบแห้งนำตัวอย่างมาชั่งทุกๆ 15 minute เพื่อเก็บข้อมูลหาความชื้น จนกระทั่งได้ความชื้นไม่เกิน 12 % d.b.

$$\text{ความชื้นมาตรฐานเปียก} (M_w) = \frac{(W - d)}{W} \quad (3.1)$$

$$\text{ความชื้นมาตรฐานแห้ง} (M_d) = \frac{(W - d)}{d} \quad (3.2)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (ร้อยละ)

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (ร้อยละ)

W คือ มวลของวัสดุ , kg

d คือ มวลของวัสดุแห้ง , kg

3.2.3 การหาอัตราการอบแห้งรวม

คิดจากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาทั้งหมดในการอบแห้ง หรือ ปริมาณ ความชื้นต่อระยะเวลาทั้งหมดในการอบแห้งดังสมการ

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \quad (3.3)$$

เมื่อ DR	คือ อัตราการอบแห้ง, $\text{kg}_\text{น้ำ}/\text{h}$
t	คือ เวลาในการอบแห้ง, h
W_i	คือ มวลของวัสดุก่อนอบแห้ง, $\text{kg}_\text{น้ำ}$
W_f	คือ มวลของวัสดุหลังอบแห้ง, $\text{kg}_\text{น้ำ}$

3.2.4 การดำเนินการทดลอง

เริ่มต้นนำขิงที่เตรียมไว้ไปชั่งน้ำหนักพร้อมตะแกรงเสร็จแล้วจึงนำไปวางบนตัวบันทึกน้ำหนักที่อยู่ภายในห้องอบแห้ง เติมน้ำผ่านท่อเติมน้ำเข้าไปในห้องไอน้ำให้ได้ปริมาณน้ำตามต้องการโดยดูระดับน้ำได้จากหลอดวัดระดับน้ำ เมื่อได้ระดับน้ำตามต้องการแล้ว เปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อลดความดันภายในระบบให้เป็นไปตามต้องการคือ 0.6 0.7 และ 0.8 bar เมื่อได้ความดันที่ต้องการแล้วจึงเปิดอุปกรณ์ให้ความร้อนตัวที่อยู่ใต้น้ำเพื่อให้น้ำเกิดการเดือดจนกลายเป็นไอน้ำแล้วจึงเปิดอุปกรณ์ให้ความร้อนตัวที่อยู่ด้านบนห้องอบแห้ง ซึ่งจะทำให้ไอน้ำกลายเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 105 115 และ 125 °C ก่อนที่ไอน้ำจะค่อยๆ ไหลเข้าไปในห้องอบแห้งผ่านทางท่อนำไอน้ำ จากนั้นบันทึกเวลาและน้ำหนักของขิงพร้อมจากตัวบันทึกน้ำหนัก จนกระทั่งน้ำหนักของขิงและตะแกรงคงที่จึงนำขิงที่ผ่านการอบแห้งไปวิเคราะห์คุณภาพต่อไป

3.3 การออกแบบการทดลอง

ปัจจัยที่ทำการศึกษามี 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำ โดยทำการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารตัวอย่าง(ขิงแผ่น) ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำที่อุณหภูมิการทดลอง 3 ระดับ คือ 105 115 และ 125 °C และความดัน 3 ระดับ คือ 0.6 0.7 และ 0.8 bar อบจนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 12% d.b. ดังนั้นการทดลองนี้จะทำการทดลองแบบ 3 x 3 แฟกทอเรียล การออกแบบการทดลองที่มี 2 ปัจจัย และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แสดงดังตารางที่ 3.1

ความดัน (bar)	อุณหภูมิ (°C)		
	105	115	125
0.6	X111	X211	X311
	X112	X212	X312
	X113	X213	X313
0.7	X121	X221	X321
	X122	X222	X322
	X123	X223	X323
0.8	X131	X231	X331
	X132	X232	X332
	X133	X233	X333

ตารางที่ 3.1 การออกแบบการทดลองที่มี 2 ปัจจัย

3.4 การทดสอบคุณภาพขิงหลังการอบแห้ง

3.4.1 การทดสอบคุณภาพด้านสี

คุณภาพด้านสีของขิงอบแห้งที่มีการเปลี่ยนแปลงสีหลังจากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ มาเปรียบเทียบกับขิงสด โดยใช้เครื่องวัดค่าสีตรวจสอบ ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (จินดาพร , 2546) [18] จากสมการดังนี้

$$\Delta E = \left[(L_0 - L_f)^2 + (a_0 - a_f)^2 + (b_0 + b_f)^2 \right]^{1/2} \quad (3.4)$$

เมื่อ L_0 , a_0 และ b_0 คือ ค่าความสว่าง สีแดง และสีเหลือง ก่อนการอบแห้ง
 L_f , a_f และ b_f คือ ค่าความสว่าง สีแดง และสีเหลือง หลังการอบแห้ง
 ΔE คือ การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดค่าสียี่ห้อ Konica Minolta (Color Reader CR-10) ช่วงแสดงผล L *: 1 ถึง 100

3.4.2 การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัว

คุณภาพด้านการหดตัวของขิงอบแห้งใช้วิธีการแทนที่ในของเหลว (ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้น้ำมันพืช) ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ โดยทำการทดลองตามรูปที่ 3.4 ปริมาตรของวัตถุจะเท่ากับปริมาตรของเหลวที่เพิ่มขึ้นในภาชนะ ดังนั้นจึงหาปริมาตรของวัตถุได้จาก

$$V = \frac{(m_s - m_m)}{\rho} \quad (3.5)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของวัตถุที่ต้องการหาปริมาตร , ml

m_s คือ มวลที่วัดได้จากเครื่องชั่งเมื่อใส่ขิงที่ต้องการหาปริมาตร , g

m_m คือ มวลที่วัดได้จากเครื่องชั่งเมื่อไม่ใส่ขิงที่ต้องการหาปริมาตร , g

ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำมันพืช , g/ml

แล้วนำข้อมูลมาคำนวณการหดตัวจากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\% \text{ Shrinkage} = \frac{V_0 - V_f}{V_0} \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ V_0 คือ ปริมาตรของขิงก่อนการอบแห้ง , ml

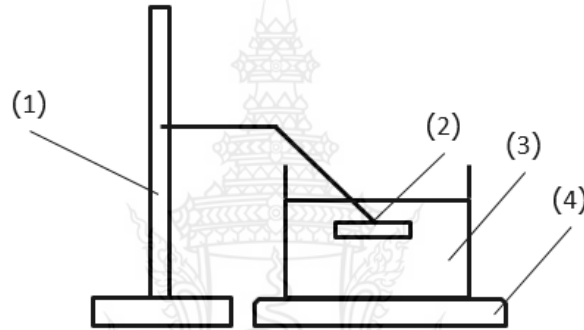
V_f คือ ปริมาตรของซิงหลังการอบแห้ง , ml

หรือ

$$\% Shrinkage = \frac{(m_s - m_n)_0 - (m_s - m_n)_f}{(m_s - m_n)_0} \times 100 \quad (3.7)$$

เมื่อ $(m_s - m_n)_0$ คือ ผลต่างมวลที่วัดได้ก่อนการอบแห้ง , g

$(m_s - m_n)_f$ คือ ผลต่างมวลที่วัดได้หลังการอบแห้ง , g



รูปที่ 3.4 แสดงการหาปริมาตรของซิง

(1) ชุดขาตั้งทดลอง (2) ชิงที่ต้องการหาปริมาตร (3) น้ำมันพีช (4) เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.4.3 การทดสอบคุณภาพด้านการคืนตัว

คุณภาพด้านการคืนตัวของซิงแสดงค่าความสามารถในการดูดคืนน้ำกลับคืนของซิงอบแห้ง สามารถหาได้จากปริมาตรหรือน้ำหนักของซิงอบแห้งภายหลังการคืนตัวเทียบกับปริมาตรหรือน้ำหนักของซิงอบแห้งก่อนการคืนตัว ขั้นตอนการทดสอบ คือนำซิงที่ผ่านการอบแห้งมาชั่งน้ำหนักและทำการบันทึกค่าไว้ จากนั้นนำไปต้มในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 92 ± 3 °C หลังจากนั้นนำซิงขึ้นจากน้ำร้อนแล้วทำการบันทึกค่าน้ำหนักทุกๆ 2 minute โดยใช้เวลาในการทดสอบทั้งหมด 10 minute โดยสามารถคำนวณหาค่าคืนตัวของซิงอบแห้งได้จากสมการดังนี้

$$\% Rehydration = \frac{W - W_d}{W_d} \times 100 \quad (3.8)$$

เมื่อ W คือ น้ำหนักของชิงอบแห้งหลังการคั่ว , g
 W_d คือ น้ำหนักของชิงอบแห้งก่อนการคั่ว , g



รูปที่ 3.5 เครื่องชั่งดิจิตอล (ADAM รุ่น Nimbus)

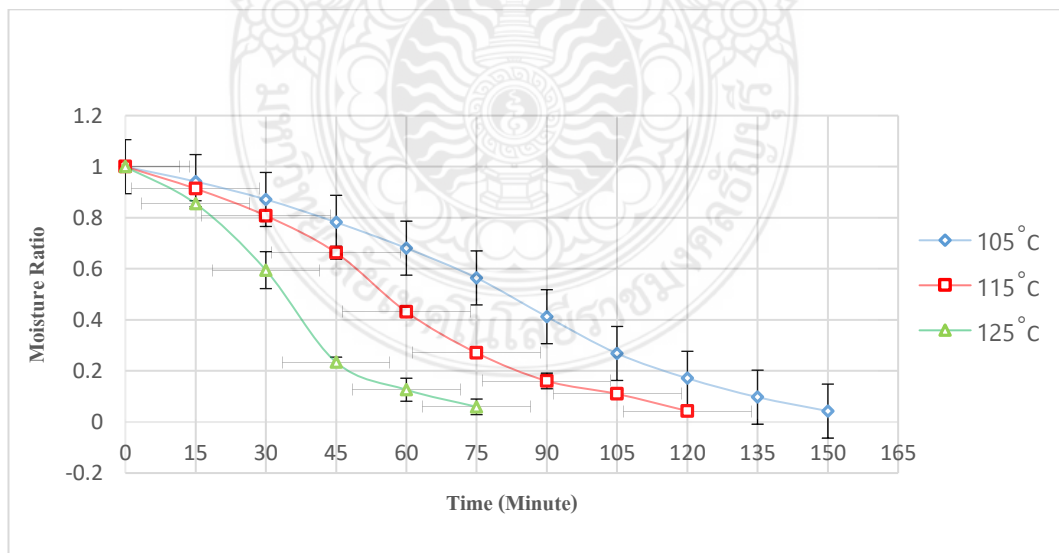


บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

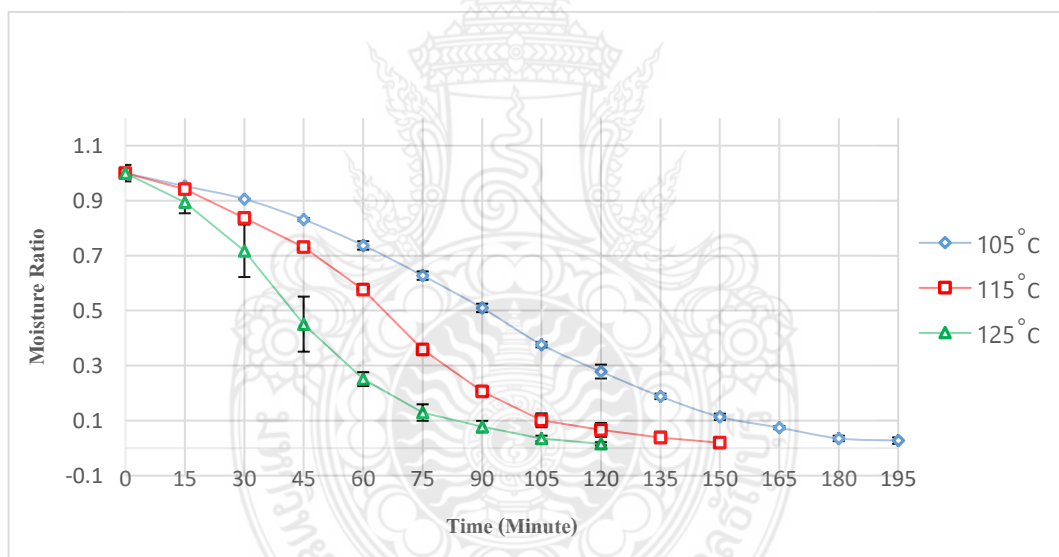
4.1 ผลการทดลองการลดความชื้น

อบแห้งขิงสดที่หั่นเป็นแว่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 – 4 cm หนา 0.3 – 0.5 cm มวลรวมประมาณ 200 g วางบนตะแกรงที่มีพื้นที่ขนาด 1600 cm² ทำการลดความชื้นที่อุณหภูมิต่างๆ ความดัน 0.6 bar ที่อุณหภูมิ 105 °C ใช้เวลาในการอบแห้งเฉลี่ย 150 minute จากความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 7.71 % d.b. จนถึงความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 0.09 % d.b. ที่อุณหภูมิ 115 °C ใช้เวลาในการอบแห้งเฉลี่ย 110 minute จากความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 6.79 % d.b. จนถึงความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 0.09 % d.b. และที่อุณหภูมิ 125 °C ใช้เวลาในการอบแห้งเฉลี่ย 75 นาที จากความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 6.31 (มาตรฐานแห้ง) จนถึงความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 0.03 % d.b. โดยที่ความดัน 0.6 bar อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สามารถลดความชื้นได้เร็วที่สุดอยู่ที่ 125 °C และอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สามารถลดความชื้นได้ช้าที่สุดอยู่ที่ 105 °C เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการลดความชื้นของขิงสดเร็วขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การลดความชื้นที่อุณหภูมิต่างๆ ความดัน 0.6 bar

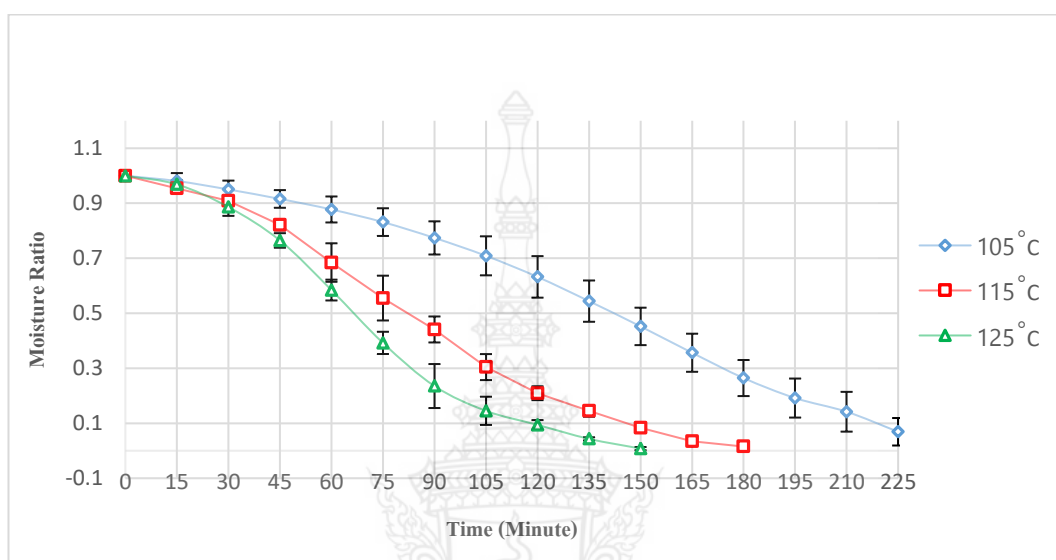
อบแห้งขิงสดที่หั่นเป็นแว่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 – 4 cm หนา 0.3 – 0.5 cm มวลรวม ประมาณ 200 g วางบนตะแกรงที่มีพื้นที่ขนาด 1600 cm² ทำการลดความชื้นที่อุณหภูมิต่างๆ ความดัน 0.7 bar ที่อุณหภูมิ 105 °C ใช้เวลาในการอบแห้งเฉลี่ย 190 นาที จากความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 7.88 % d.b. จนถึงความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 0.10 % d.b. ที่อุณหภูมิ 115 °C ใช้เวลาในการอบแห้งเฉลี่ย 150 minute จากความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 6.90 % d.b. จนถึงความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 0.04 % d.b. และที่ อุณหภูมิ 125 °C ใช้เวลาในการอบแห้งเฉลี่ย 120 minute จากความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 7.50 % d.b. จนถึงความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 0.09 % d.b. โดยที่ความดัน 0.7 bar อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สามารถ ลดความชื้นได้เร็วที่สุดอยู่ที่ 125 °C และอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สามารถลดความชื้นได้ช้าที่สุดอยู่ที่ 105 °C เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการลดความชื้นของขิงสดเร็วขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การลดความชื้นที่อุณหภูมิต่างๆ ความดัน 0.7 bar

อบแห้งขิงสดที่หั่นเป็นแว่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 – 4 cm หนา 0.3 – 0.5 cm มวลรวม ประมาณ 200 g วางบนตะแกรงที่มีพื้นที่ขนาด 1600 cm² ทำการลดความชื้นที่อุณหภูมิต่างๆ ความดัน 0.8 bar ที่อุณหภูมิ 105 °C ใช้เวลาในการอบแห้งเฉลี่ย 220 minute จากความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 8.22 % d.b. จนถึงความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 0.10 % d.b. ที่อุณหภูมิ 115 °C ใช้เวลาในการอบแห้งเฉลี่ย 170 minute จากความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 6.54 % d.b. จนถึงความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 0.06 % d.b. และที่

อุณหภูมิ 125 °C ใช้เวลาในการอบแห้งเฉลี่ย 140 minute จากความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 6.85 % d.b. จนถึงความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 0.04 % d.b. โดยที่ความดัน 0.8 bar อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สามารถลดความชื้นได้เร็วที่สุดอยู่ที่ 125 °C และอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สามารถลดความชื้นได้ช้าที่สุดอยู่ที่ 105 °C เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการลดความชื้นของซิงสดเร็วขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การลดความชื้นที่อุณหภูมิต่างๆ ความดัน 0.8 bar

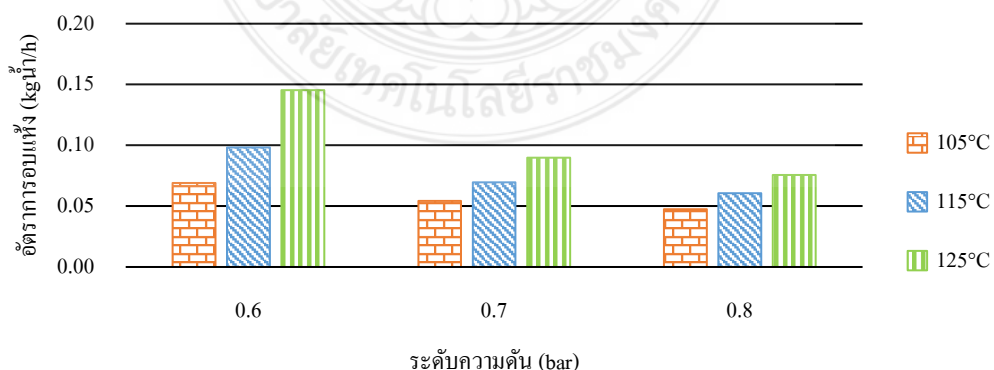
4.2 ผลการทดลองอัตราการอบแห้ง

จากการอบแห้งซิงสดที่หั่นเป็นแว่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 – 4 cmหนา 0.3 – 0.5 cm มวลรวมประมาณ 200 g วางบนตะแกรงที่มีพื้นที่ขนาด 1600 cm² ผ่านการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันในระบบต่ำที่อุณหภูมิ 105 115 และ 125°C ที่ความดัน 0.6 0.7 และ 0.8 bar ให้เหลือความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 12% d.b. ได้ทำการวิเคราะห์ระดับอุณหภูมิและระดับความดัน พบว่าเมื่ออบแห้งซิงที่อุณหภูมิ 125 °C ให้ค่าเฉลี่ยอัตราการอบแห้งมากกว่าที่อุณหภูมิ 105 และ 115 °C และระดับความดัน 0.8 bar ให้ค่าเฉลี่ยอัตราการอบแห้งน้อยกว่าที่ระดับความดัน 0.6 และ 0.8 bar ตามตารางที่ 4.1 โดยที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 125 °C ที่สภาวะความดัน 0.6 bar จะมีอัตราการอบแห้งสูงสุดที่ 0.15 kg_{น้ำ}/h และที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 105 °C ที่สภาวะความดัน 0.8 bar จะมีอัตราการอบแห้งต่ำสุดที่ 0.05 kg_{น้ำ}/h

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (bar)	เวลาเฉลี่ยในการอบ (minute)	อัตราเฉลี่ยการอบแห้ง (kg _{น้ำ} /h)
105	0.6	150	0.07
	0.7	190	0.05
	0.8	220	0.05
115	0.6	110	0.10
	0.7	150	0.07
	0.8	170	0.06
125	0.6	75	0.15
	0.7	120	0.09
	0.8	140	0.08

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยอัตราการอบแห้ง

จากรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความดันที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยอัตราการอบแห้ง พบว่าเมื่ออบแห้งซึ่งที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 125 °C ความดัน 0.6 , 0.7 และ 0.8 bar เฉลี่ยอัตราการอบแห้งอยู่ระหว่าง 0.15 , 0.09 , 0.08 kg_{น้ำ}/h ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 115 °C ความดัน 0.6 , 0.7 และ 0.8 bar เฉลี่ยอัตราการอบแห้งอยู่ระหว่าง 0.10 , 0.07 , 0.06 kg_{น้ำ}/h และเมื่อใช้อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 105 °C ความดัน 0.6 , 0.7 และ 0.8 bar เฉลี่ยอัตราการอบแห้งอยู่ระหว่าง 0.07 , 0.05 , 0.05 kg_{น้ำ}/h ซึ่งอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความดันที่เหมาะสมกับการอบแห้งซึ่งคือที่อุณหภูมิ 125 °C ความดัน 0.6 bar เนื่องจากให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยสูงสุดและใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด



ภาพที่ 4.4 อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ

4.3 ผลการทดสอบคุณภาพด้านสี

จากตารางที่ 4.2 ทำการทดสอบคุณภาพด้านสีของชิงสดมีค่าเฉลี่ยความสว่าง (L) สีแดงและเขียว (a) และสีเหลืองและน้ำเงิน (b) คือ 67.89 , 0.32 และ 28.35 ตามลำดับ แล้วทำการเปรียบเทียบคุณภาพด้านสีกับชิงอบแห้งในท้องตลาดและชิงอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชิงสดและชิงอบแห้งในท้องตลาดพบว่า ชิงสดมีค่าเฉลี่ยความสว่าง (L) มากกว่า 15.66 % มีค่าสีแดงและเขียว (a) น้อยกว่า 1634.37 % และมีค่าสีเหลืองและน้ำเงิน (b) มากกว่า 20.67 % เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชิงสดและชิงอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ ที่อุณหภูมิ 125 °C ความดัน 0.6 bar พบว่า ชิงสดมีค่าเฉลี่ยความสว่าง (L) มากกว่า 25.41 % มีค่าสีแดงและเขียว (a) น้อยกว่า 1109.37 % และมีค่าสีเหลืองและน้ำเงิน (b) มากกว่า 18.80 % และเมื่อนำชิงอบแห้งในท้องตลาดมาเปรียบเทียบกับชิงอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ ที่อุณหภูมิ 125 °C ความดัน 0.6 bar พบว่า ชิงอบแห้งในท้องตลาดมีค่าเฉลี่ยความสว่าง (L) มากกว่า 11.56 % มีค่าสีแดงและเขียว (a) มากกว่า 30.27 % มีค่าสีเหลืองและน้ำเงิน (b) น้อยกว่า 2.36 % และมีการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) น้อยกว่า 35.98 %

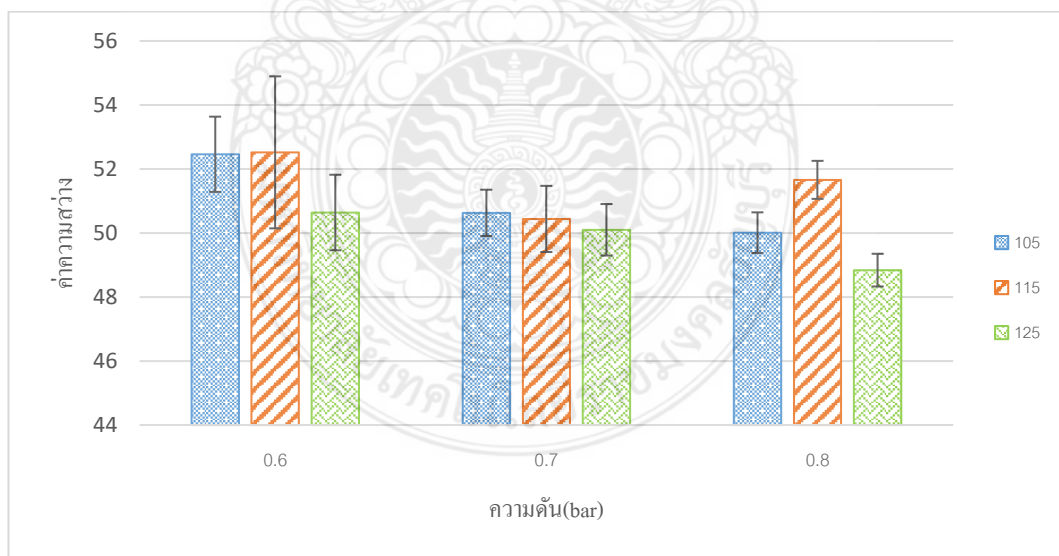
อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (bar)	เฉลี่ยค่าสี			
		L	a	b	ΔE
105	0.6	52.46	4.06	21.79	17.49
	0.7	50.36	4.19	21.94	19.21
	0.8	50.01	4.36	22.30	19.44
115	0.6	52.52	4.06	21.03	17.58
	0.7	50.44	3.83	22.22	18.99
	0.8	51.66	4.07	22.96	17.67
125	0.6	50.64	3.87	23.02	18.52
	0.7	50.10	3.71	23.75	18.82
	0.8	48.84	3.66	24.44	19.90
ชิงอบแห้งในท้องตลาด		57.26	5.55	22.49	13.62
ชิงสด		67.89	0.32	28.35	0

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยความสว่าง(L) ค่าสีแดงและเขียว(a) ค่าสีเหลืองและน้ำเงิน(b) และค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE)



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบซิงที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและซิงอบแห้งตามห้องตลาด

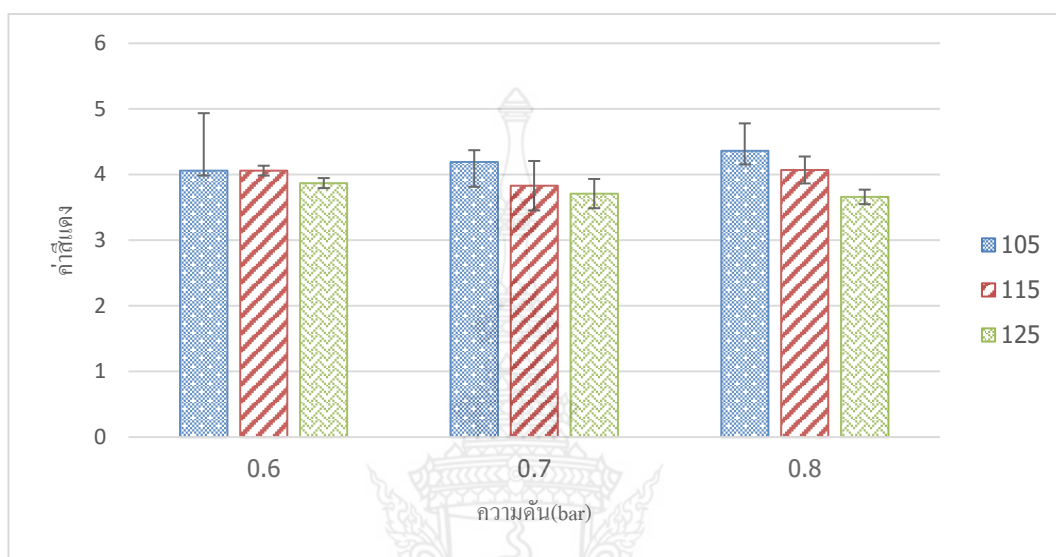
จากการทดลองอบแห้งซิงด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 105 115 และ 125 °C ความดัน 0.6 0.7 และ 0.8 bar จากรูปที่ 4.5 การวัดค่าความสว่าง (Lightness) พบว่าอุณหภูมิ 105 °C ความดัน 0.6 0.7 และ 0.8 bar มีวัดค่าความสว่าง(L) 52.46 , 50.63 และ 50.01 อุณหภูมิ 115 °C ความดัน 0.6 0.7 และ 0.8 bar มีวัดค่าความสว่าง(L) 52.52 , 50.44 และ 51.66 อุณหภูมิ 125 °C ความดัน 0.6 0.7 และ 0.8 bar มีวัดค่าความสว่าง(L) 50.64 , 50.1 และ 48.84 โดยที่ความดัน 0.6 bar อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 115 °C มีค่าความสว่างสูงสุดอยู่ที่ 52.52 และที่ความดัน 0.8 bar อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 125 °C มีค่าความสว่างต่ำสุดอยู่ที่ 48.84



รูปที่ 4.6 การวัดค่าความสว่าง (Lightness)

จากรูปที่ 4.6 การวัดค่าสีแดง (Redness) พบว่าอุณหภูมิ 105 °C ความดัน 0.6 0.7 และ 0.8 bar มีวัดค่าสีแดง(a) 4.06 , 4.19 และ 4.36 อุณหภูมิ 115 °C ความดัน 0.6 0.7 และ 0.8 bar มีวัดค่าสี

แดง(a) 4.06 , 3.83 และ4.07 อุณหภูมิ 125 °C ความดัน 0.6 0.7 และ0.8 bar มีวัดค่าสีแดง(a) 3.87 , 3.71 และ3.66 โดยที่ความดัน 0.8 bar อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 105 °C มีค่าสีแดงสูงสุดอยู่ที่ 4.36 และที่ความดัน 0.8 bar อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 125 °C มีค่าสีแดงต่ำสุดอยู่ที่ 3.66

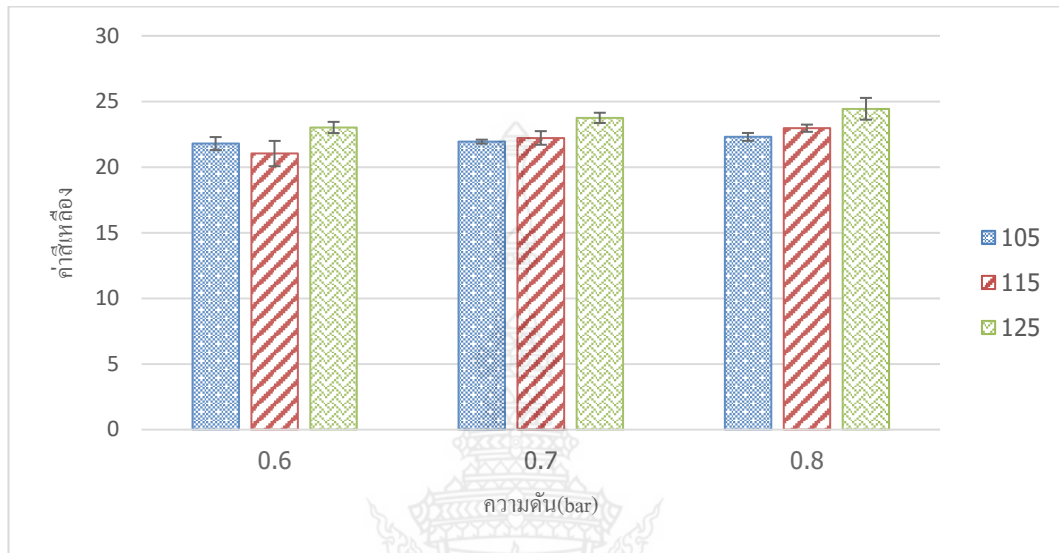


รูปที่ 4.7 การวัดค่าสีแดง (Redness)

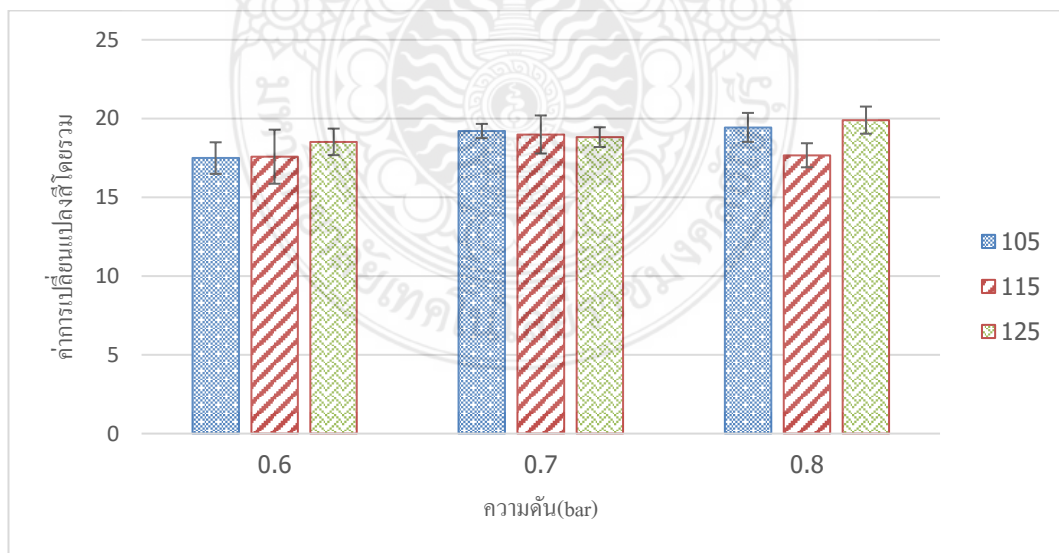
จากรูปที่ 4.7 การวัดค่าสีเหลือง (Yellowness) พบว่าอุณหภูมิ 105 °C ความดัน 0.6 0.7 และ0.8 bar มีวัดค่าสีเหลือง(b) 21.79 , 21.94 และ22.3 อุณหภูมิ 115 °C ความดัน 0.6 0.7 และ0.8 bar มีวัดค่าสีเหลือง(b) 21.03 , 22.22 และ22.96 อุณหภูมิ 125 °C ความดัน 0.6 0.7 และ0.8 bar มีวัดค่าสีเหลือง(b) 23.02 , 23.75 และ24.44 โดยที่ความดัน 0.8 bar อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 125 °C มีค่าสีเหลืองสูงสุดอยู่ที่ 24.44 และที่ความดัน 0.6 bar อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 115 °C มีค่าสีเหลืองต่ำสุดอยู่ที่ 21.03

จากรูปที่ 4.8 การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม ΔE (Total color difference) พบว่าอุณหภูมิ 105 °C ความดัน 0.6 0.7 และ0.8 bar มีวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) 17.49 , 19.21 และ19.44 อุณหภูมิ 115 °C ความดัน 0.6 0.7 และ0.8 bar มีวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) 17.58 , 18.99 และ17.67 อุณหภูมิ 125 °C ความดัน 0.6 0.7 และ0.8 bar มีวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) 18.52 , 18.82 และ19.9 โดยที่ความดัน 0.8 bar อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 125 °C มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมสูงสุดอยู่ที่ 19.9

ยี่ห้อ 125 °C มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมสูงสุดอยู่ที่ 19.9 และที่ความดัน 0.6 bar อุณหภูมิไอน้ำ ร้อนยี่ห้อ 115 °C มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมต่ำสุดอยู่ที่ 17.58

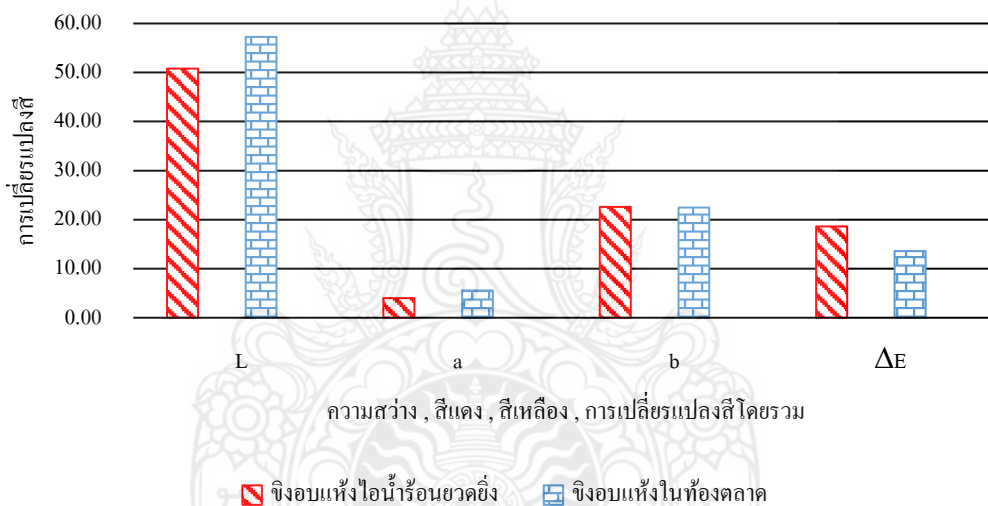


รูปที่ 4.8 การวัดค่าสีเหลือง (Yellowness)



รูปที่ 4.9 การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม ΔE (Total color difference)

จากรูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบสีค่าความสว่าง L (Lightness) ค่าสีแดง a (Redness) ค่าสีเหลือง b (Yellowness) และค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม ΔE (Total color difference) พบว่าซิงอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำมีค่า L a b และ ΔE เฉลี่ย 50.78 , 3.98 , 22.60 และ 18.62 ซิงอบแห้งในท้องตลาดมีค่า L , a , b และ ΔE เฉลี่ย 57.26 , 5.55 , 22.49 และ 13.62 โดยค่าความสว่างของซิงอบแห้งในท้องตลาดจะมีค่ามากกว่าซิงอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ค่าสีแดงของซิงอบแห้งในท้องตลาดจะมีค่ามากกว่าซิงอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ค่าสีเหลืองของซิงอบแห้งในท้องตลาดมีค่าใกล้เคียงกับซิงอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของซิงอบแห้งในท้องตลาดจะมีค่าน้อยกว่าซิงอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบสีของซิงอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับซิงอบแห้งในท้องตลาด

4.4 ผลการทดสอบคุณภาพด้านการหดตัว

ผลการทดสอบการวัดค่าการหดตัวของซิงอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ แสดงดังตาราง 4.3 พบว่าเมื่ออบแห้งซิงที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 105 °C ความดัน 0.6 , 0.7 และ 0.8 bar เฉลี่ยค่าการหดตัวอยู่ระหว่าง 67.30 , 64.70 และ 60.95 % ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 115 °C ความดัน 0.6 , 0.7 และ 0.8 bar เฉลี่ยค่าการหดตัวอยู่ระหว่าง 71.10 , 69.05 และ 67.05 % และที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 125 °C ความดัน 0.6 , 0.7 และ 0.8 bar เฉลี่ยค่าการหดตัวอยู่ระหว่าง

76.80 , 73.60 และ 72.00 % โดยที่ความดัน 0.6 bar อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 125 °C มีค่าการหดตัวสูงสุดอยู่ที่ 76.80 % และที่ความดัน 0.8 bar อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 105 °C มีค่าการหดตัวต่ำสุดอยู่ที่ 60.95 %

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (bar)	Shrinkage (%)	S.D.
105	0.6	67.30	0.089
	0.7	64.70	0.051
	0.8	60.95	0.040
115	0.6	71.10	0.032
	0.7	69.05	0.085
	0.8	67.05	0.038
125	0.6	76.80	0.051
	0.7	73.60	0.066
	0.8	72.00	0.067

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยการหดตัวของซิงอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ

4.5 ผลการทดสอบคุณภาพด้านการคืนตัว

ผลการทดสอบการวัดค่าการคืนตัวของซิงอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ แสดงดังตาราง 4.4 พบว่าเมื่ออบแห้งซิงที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 105 °C ความดัน 0.6 , 0.7 และ 0.8 bar เฉลี่ยค่าการคืนตัวอยู่ระหว่าง 112.99 , 104.80 และ 103.66 % ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 115 °C ความดัน 0.6 , 0.7 และ 0.8 bar เฉลี่ยค่าการคืนตัวอยู่ระหว่าง 135.77 , 121.33 และ 115.14 % และที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 125 °C ความดัน 0.6 , 0.7 และ 0.8 bar เฉลี่ยค่าการคืนตัวอยู่ระหว่าง 166.38 , 145.90 และ 123.31 % โดยที่ความดัน 0.6 bar อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 125 °C มีค่าการคืนตัวสูงสุดอยู่ที่ 166.38 % และที่ความดัน 0.8 bar อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 105 °C มีค่าการคืนตัวต่ำสุดอยู่ที่ 103.66 %

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (bar)	Rehydration (%)	S.D.
105	0.6	112.99	4.079
	0.7	104.80	3.790
	0.8	103.66	5.204
115	0.6	135.77	5.285
	0.7	121.33	5.490
	0.8	115.14	5.181
125	0.6	166.38	0.319
	0.7	145.90	10.563
	0.8	123.31	12.554

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยการคืนตัวของขิงอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองอบแห้งซิงโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ เพื่อศึกษาอุณหภูมิ ความดัน และเวลา ที่มีผลต่อการลดความชื้นของซิง และศึกษาสี การหดตัว และการคืนตัวของซิงที่ผ่านการอบแห้ง โดยใช้ซิงสดที่หั่นเป็นแว่นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 – 4 cm หนา 0.3 – 0.5 cm มวลรวมประมาณ 200 g ไปด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำที่อุณหภูมิ 105 115 และ 125 °C ที่ความดัน 0.6 0.7 และ 0.8 bar ให้เหลือความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 12 % d.b. ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลทดลองการลดของของความชื้น พบว่าเวลาในการลดของของความชื้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความดัน เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้นจะทำให้อัตราการลดของของความชื้นมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งที่ความดันต่าง ๆ กัน พบว่าเมื่อความดันลดลง อัตราการลดของของความชื้นจะมากขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากความดันที่ลดลงจะทำให้น้ำในซิงมีจุดเดือดลดลง น้ำจึงระเหยได้เร็วขึ้นทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความดันที่สูง จากการทดลองมีอัตราการอบแห้งสูงสุด 0.15 kg_{น้ำ}/h สามารถลดความชื้นได้ภายในเวลาเฉลี่ย 75 นาที เมื่ออบด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 125 °C ความดัน 0.6 bar

5.1.2 ผลการวิเคราะห์คุณภาพสี พบว่าสีหลังอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าเฉลี่ยดังนี้ ค่าความสว่าง (L) 50.78 ค่าสีแดง (a) 3.98 ค่าสีเหลือง (b) 22.6 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) 18.62 จะมีความคล้ำมากกว่าซิงอบแห้งตามท้องตลาดเพียงเล็กน้อย

5.1.3 ผลการวิเคราะห์ค่าการหดตัว พบว่าซิงที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 125 °C ที่ความดัน 0.6 bar มีการหดตัวสูงสุด 76.8 % และซิงที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 105 °C ที่ความดัน 0.8 bar มีการคืนตัวที่ต่ำสุด 60.95 % แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพิ่มขึ้นและความดันลดลงจะทำให้ ค่าการหดตัวมากขึ้น

5.1.4 ผลการวิเคราะห์ค่าการคืนตัว พบว่าซิงที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 125 °C ที่ความดัน 0.6 bar มีการคืนตัวที่สูงที่สุด 166.38 % และซิงที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 105

°C ที่ความดัน 0.8 bar มีการคืนตัวที่ต่ำสุด 103.66 % แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งและความดันที่ใช้ในการอบแห้งมีอิทธิพลต่อค่าการคืนตัวของชิงอบแห้ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ฮีตเตอร์ต้มน้ำที่ใช้ในการทดลองมีขนาดกิโลวัตต์ที่น้อยทำให้ผลิตไอน้ำได้ช้าจึงทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งที่ค่อนข้างนาน ดังนั้นควรมีการเพิ่มขนาดกิโลวัตต์ของฮีตเตอร์เพื่อลดเวลาในการอบแห้งให้น้อยลง

5.2.2 เนื่องจากเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องต้นแบบ ทำให้มีกำลังในการผลิตที่น้อยซึ่งจะไม่คุ้มค่ากับพลังงานที่สูญเสียไป ดังนั้นควรมีการพัฒนาต่อยอดเพื่อเพิ่มกำลังในการผลิตต่อไป



บรรณานุกรม

- [1] กรมวิชาการเกษตร. (2525). **จิง**. พิมพ์ครั้งที่ 1. งานทะเบียนและประมวลสถิติ กองแผนงาน, กรุงเทพมหานคร.
- [2] รุ่งรัตน์ เหลืองนทีเทพ. 2540. **จิง**. การปลูกพืชสมุนไพรชนิดต่างๆ. แหล่งที่มา <http://203.154.140.5/agri/herbs/king.html>. 11 ตุลาคม 2548.
- [3] Elustondo, D.M, Mujumdar, A. S. and Uribicain, M.J., 2002, **Optimum operating conditions in drying foodstuffs with superheated steam**, Drying Technology, 20(2), pp. 381-402.
- [4] สมยศ เจริญอักษร และเทวรัตน์ ทิพย์วิมล. 2546. **แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน**. รายงานการประชุมประจำปี 2546. สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. หน้า 4-5 น.
- [5] Devahastin, S., Suvarnakuta. P., Soponronnarit, S. and Mujumdar , A.S., 2004 , “**A Comparative Study of Low-Pressure Superheated Steam and Vacuum Drying of a Heat-Sensitive Material**” , Drying Technology , Vol. 22 , pp. 1845-1867.
- [6] อาทิตย์ จันทร์หิรัญ. 2550. **การอบแห้งจิงด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน).
- [7] ดลฤดี ใจสุทธิ. 2543. **การอบแห้งกึ่งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี).
- [8] อิศเรศ ชุขกัลยา. 2543. **การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี).
- [9] Tang Z, and S. Cenkowski., 2000, “**Dehydration Dynamic of Potatoes in Superheated Steam and Hot Air**” Canadian Agricultural Engineering. 42(1) : 6.1-6.13

- [10] Tatemoto and other., n.d., **Drying Performance in Closed Superheated Steam Drying**.
Department of Chemical Engineering. Nagoya University : Japan.
- [11] อธิคมจิ รจินดาเลิศ. 2546. การนึ่งข้าวกล้องด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. (วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี).
- [12] ทวีชัย วงศ์ศักดิ์ไพโรจน์. 2543. การอบแห้งหน่อไม้ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. (วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี).
- [13] ณัฐวิทย์ พงศ์พันธุ์. 2553. การอบแห้งกล้วยโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามด้วยลมร้อน. (
วิทยานิพนธ์ปริญญาามมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่).
- [14] กัทธนิษฐ์ วงษ์สุภักดิ์. 2553. คุณลักษณะการอบแห้งจึงภายใต้ไมโครเวฟสุญญากาศ. (
วิทยานิพนธ์ปริญญาามมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี).
- [15] ยุวนารี นามสงวน. 2545. การอบแห้งกุ้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามด้วยปั๊มความร้อน. (
วิทยานิพนธ์ปริญญาามมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี).
- [16] Fellows, P.J., 1993, **Food Processing Technology : Principles Practice**, Ellis Horwood,
London, pp. 329-340.
- [17] วิไล ริงสาตทอง. 2546. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร, พิมพ์ครั้งที่ 3, สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าพระนครเหนือ.
- [18] จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์. (2548). จลนพลศาสตร์การคั่วตัวของทุเรียนอบแห้ง, น. 122-123. การ
ประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6. คณะวิศวกรรมและ
เทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณวิเคราะห์ผลการทดลอง

ตัวอย่างการคำนวณวิเคราะห์ผลการทดลอง

วิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองที่มีวิธีการและขั้นตอนการคำนวณผล กำหนดให้ตามตัวอย่าง ผลจากการทดลองเฉลี่ยการอบแห้งซึ่งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 125 °C ที่ความดัน 0.6 bar ซึ่งสามารถเขียนสรุปได้ดังนี้

1. มวลของชั่งก่อนอบแห้ง (W_i)	=	201.65 g
2. มวลของชั่งหลังอบแห้ง (W_f)	=	19.89 g
3. เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (t)	=	75 นาที
4. ค่าความสว่างก่อนอบแห้ง (L_0)	=	67.89
5. ค่าสีแดงก่อนการอบแห้ง (a_0)	=	0.32
6. ค่าสีเหลืองก่อนการอบแห้ง (b_0)	=	28.35
7. ค่าความสว่างหลังการอบแห้ง (L_f)	=	50.64
8. ค่าสีแดงหลังการอบแห้ง (a_f)	=	3.87
9. ค่าสีเหลืองหลังการอบแห้ง (b_f)	=	23.02
10. ผลต่างมวลที่วัดได้ก่อนการอบแห้ง ($m_n - m_s)_0$	=	6.67 g
11. ผลต่างมวลที่วัดได้หลังการอบแห้ง ($m_n - m_s)_f$	=	1.15 g
12. น้ำหนักของชั่งอบแห้งหลังการคั่นตัว (W)	=	4.23 g
13. น้ำหนักของชั่งอบแห้งก่อนการคั่นตัว (W_d)	=	1.59 g

อัตราการอบแห้ง ดังสมการ (3.3)

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t}$$

แทนค่า

$$DR = \frac{201.65 \text{ g} - 19.89 \text{ g}}{75 \text{ min}}$$

$$DR = 0.15 \text{ kg} / \text{h}$$

การวัดค่าสี่ ตั้งสมการ (3.4)

$$\Delta E = \left[(L_0 - L_f)^2 + (a_0 - a_f)^2 + (b_0 + b_f)^2 \right]^{1/2}$$

แทนค่า

$$\Delta E = \left[(67.89 - 50.64)^2 + (0.32 - 3.87)^2 + (28.35 - 23.02)^2 \right]^{1/2}$$

$$\Delta E = 18.40$$

การทดสอบค่าการหดตัว ตั้งสมการ (3.7)

$$\% \text{ Shrinkage} = \frac{(m_s - m_n)_0 - (m_s - m_n)_f}{(m_s - m_n)_0} \times 100$$

$$\% \text{ Shrinkage} = \frac{6.67 \text{ g} - 1.55 \text{ g}}{6.67 \text{ g}} \times 100$$

$$\% \text{ Shrinkage} = 76.80$$

การทดสอบค่าการคืนตัว ตั้งสมการ (3.8)

$$\% \text{ Rehydration} = \frac{W - W_d}{W_d} \times 100$$

$$\% \text{ Rehydration} = \frac{4.23 \text{ g} - 1.59 \text{ g}}{1.59 \text{ g}} \times 100$$

$$\% \text{ Rehydration} = 166.04$$



ภาคผนวก ข
การลดความชื้นขิงที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ

ตารางผนวกที่ ข1 การลดความชื้นขิงที่ความดัน 0.6 bar อุณหภูมิ 105 °C

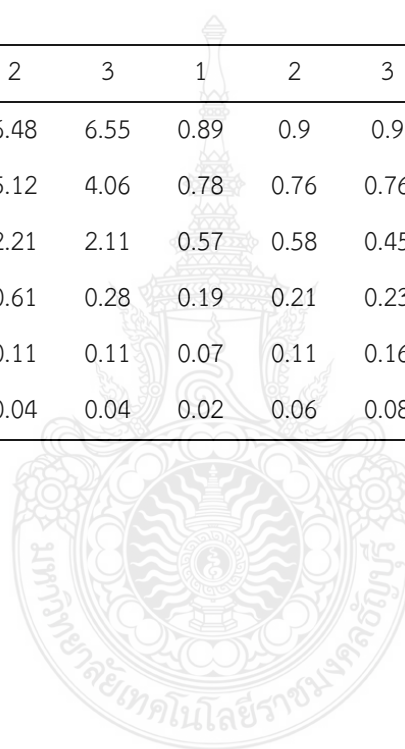
เวลา (minute)	มวลขิง (g)			ความชื้นมาตรฐานแห้ง			ความชื้นมาตรฐานเปียก			มวลขิงเฉลี่ย (g)	ความชื้นมาตรฐานแห้ง	ความชื้นมาตรฐานเปียก	S.D.
	1	2	3	1	2	3	1	2	3				
0	201.65	202.64	203.12	7.23	7.84	8.05	0.84	0.87	0.86	202.47	7.71	0.86	0.0153
15	166.23	160.45	158.34	7.11	7.24	7.16	0.82	0.81	0.79	161.67	7.17	0.81	0.0153
30	133.98	135.67	131.33	6.85	5.48	5.68	0.75	0.74	0.75	133.66	6.00	0.75	0.0058
45	105.64	102.34	109.88	6.26	4.77	4.88	0.67	0.68	0.66	105.95	5.30	0.67	0.0100
60	83.45	86.22	83.91	5.12	3.96	4.08	0.6	0.58	0.57	84.53	4.39	0.58	0.0153
75	65.97	62.78	66.28	4.82	3.08	3.21	0.51	0.48	0.46	65.01	3.70	0.48	0.0252
90	54.22	52.97	53.44	3.34	2.44	2.16	0.33	0.37	0.36	53.54	2.65	0.35	0.0208
105	46.34	47.19	44.21	2.27	1.66	1.56	0.19	0.26	0.24	45.91	1.83	0.23	0.0361
120	41.86	40.39	43.84	1.14	0.97	1.07	0.08	0.17	0.19	42.03	1.06	0.15	0.0586
135	36.79	34.58	35.21	0.34	0.23	0.46	0.06	0.08	0.11	35.53	0.34	0.08	0.0252
150	30.15	29.57	30.16	0.06	0.09	0.11	0.02	0.04	0.05	29.96	0.09	0.04	0.0153

ตารางผนวกที่ ข2 การลดความชื้นซึ่งที่ความดัน 0.6 bar อุณหภูมิ 115 °C

เวลา (minute)	มวลซิง (g)			ความชื้นมาตรฐานแห้ง			ความชื้นมาตรฐานเปียก			มวลซิงเฉลี่ย (g)	ความชื้นมาตรฐานแห้งเฉลี่ย \bar{x}	ความชื้นมาตรฐานเปียก	S.D.
	1	2	3	1	2	3	1	2	3				
0	200.98	202.64	203.22	6.93	7.22	6.23	0.86	0.84	0.85	202.28	6.79	0.85	0.0100
15	142.6	151.29	143.64	5.16	6.45	5.13	0.79	0.78	0.76	145.84	5.58	0.78	0.0153
30	96.25	93.46	98.36	4.28	5.16	4.28	0.69	0.68	0.69	96.02	4.57	0.69	0.0058
45	57.23	52.66	60.48	3.29	2.86	3.16	0.56	0.59	0.54	56.79	3.10	0.56	0.0252
60	35.64	37.88	39.47	1.63	1.45	1.85	0.36	0.35	0.39	37.66	1.64	0.37	0.0208
75	25.47	28.63	29.06	0.76	0.83	1.06	0.23	0.25	0.21	27.72	0.88	0.23	0.0200
90	23.14	24.98	25.11	0.32	0.36	0.45	0.13	0.17	0.11	24.41	0.38	0.14	0.0306
105	22.07	23.56	23.87	0.07	0.06	0.09	0.09	0.11	0.08	23.17	0.07	0.09	0.0153
120	21.67	22.1	21.92	0.05	0.04	0.05	0.02	0.04	0.05	21.90	0.05	0.04	0.0153

ตารางผนวกที่ ข3 การลดความชื้นขิงที่ความดัน 0.6 bar อุณหภูมิ 125 °C

เวลา (minute)	มวลขิง (g)			ความชื้นมาตรฐานแห้ง			ความชื้นมาตรฐานเปียก			มวลขิงเฉลี่ย (g)	ความชื้นมาตรฐานแห้งเฉลี่ย \bar{x}	ความชื้นมาตรฐานเปียก	S.D.
	1	2	3	1	2	3	1	2	3				
0	201.34	200.95	202.66	5.89	6.48	6.55	0.89	0.9	0.9	201.65	6.31	0.90	0.0058
15	104.36	124.34	116.77	4.64	5.12	4.06	0.78	0.76	0.76	115.16	4.61	0.77	0.0115
30	49.34	61.25	50.49	3.24	2.21	2.11	0.57	0.58	0.45	53.69	2.52	0.53	0.0723
45	21.47	24.91	24.6	1.51	0.61	0.28	0.19	0.21	0.23	23.66	0.80	0.21	0.0200
60	20.36	21.93	22.61	0.25	0.11	0.11	0.07	0.11	0.16	21.63	0.16	0.11	0.0451
75	19.45	19.98	20.23	0.02	0.04	0.04	0.02	0.06	0.08	19.89	0.03	0.05	0.0306



ตารางผนวกที่ ข4 การลดความชื้นซึ่งที่ความดัน 0.7 bar อุณหภูมิ 105 °C

เวลา (minute)	มวลชิ่ง (g)			ความชื้นมาตรฐานแห้ง			ความชื้นมาตรฐานเปียก			มวลชิ่งเฉลี่ย (g)	ความชื้นมาตรฐานแห้ง	ความชื้นมาตรฐานเปียก	S.D.
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	เฉลี่ย \bar{x}			
0	201.64	202.13	203.4	8.23	7.21	8.19	0.85	0.85	0.85	202.39	7.88	0.85	0.0000
15	168.29	170.05	171.22	6.87	6.55	7.06	0.81	0.81	0.81	169.85	6.83	0.81	0.0000
30	135.64	136.45	133.91	5.53	5.65	5.84	0.77	0.77	0.77	135.33	5.67	0.77	0.0000
45	106.34	104.66	100.48	4.46	4.66	4.61	0.7	0.71	0.71	103.83	4.58	0.71	0.0058
60	85.36	80.79	82.41	3.67	3.64	3.37	0.61	0.63	0.64	82.85	3.56	0.63	0.0153
75	67.51	65.97	68.82	2.48	2.48	2.51	0.55	0.53	0.52	67.43	2.49	0.53	0.0153
90	52.34	54.32	56.13	1.88	1.96	1.66	0.43	0.45	0.42	54.26	1.83	0.43	0.0153
105	45.62	43.27	46.33	1.36	1.23	1.28	0.33	0.32	0.31	45.07	1.29	0.32	0.0100
120	38.47	37.65	39.77	0.94	0.86	0.85	0.21	0.24	0.26	38.63	0.88	0.24	0.0252
135	35.64	34.23	35.98	0.77	0.79	0.54	0.15	0.17	0.16	35.28	0.70	0.16	0.0100
150	33.24	32.79	33.76	0.46	0.32	0.31	0.09	0.11	0.09	33.26	0.36	0.10	0.0115
165	31.71	31.54	32.46	0.22	0.19	0.22	0.06	0.07	0.06	31.90	0.21	0.06	0.0058
180	31.16	30.87	31.66	0.14	0.11	0.13	0.02	0.04	0.03	31.23	0.13	0.03	0.0100
195	30.68	30.14	30.87	0.12	0.08	0.09	0.01	0.03	0.03	30.56	0.10	0.02	0.0115

ตารางผนวกที่ ข5 การลดความชื้นซึ่งที่ความดัน 0.7 bar อุณหภูมิ 115 °C

เวลา (minute)	มวลซิง (g)			ความชื้นมาตรฐานแห้ง			ความชื้นมาตรฐานเปียก			มวลซิงเฉลี่ย (g)	ความชื้นมาตรฐานแห้ง	ความชื้นมาตรฐานเปียก	S.D.
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	เฉลี่ย \bar{x}			
0	201.65	202.45	200.89	7.23	6.92	6.54	0.85	0.86	0.86	201.66	6.90	0.86	0.0058
15	164.58	159.67	158.24	6.31	6.15	5.36	0.81	0.8	0.81	160.83	5.94	0.81	0.0058
30	125.34	123.69	122.77	4.87	4.63	4.52	0.71	0.72	0.72	123.93	4.67	0.72	0.0058
45	84.64	85.66	86.31	3.24	2.89	2.99	0.61	0.64	0.63	85.54	3.04	0.63	0.0153
60	59.42	60.34	61.79	1.88	1.65	1.88	0.51	0.48	0.49	60.52	1.80	0.49	0.0153
75	40.77	41.73	41.93	1.06	1.01	1.16	0.32	0.31	0.29	41.48	1.08	0.31	0.0153
90	31.21	30.68	31.16	0.64	0.82	0.62	0.19	0.16	0.18	31.02	0.69	0.18	0.0153
105	29.33	29.58	30.71	0.44	0.36	0.17	0.06	0.11	0.09	29.87	0.32	0.09	0.0252
120	28.69	28.54	29.38	0.26	0.16	0.08	0.03	0.08	0.06	28.87	0.17	0.06	0.0252
135	28.06	28.17	28.98	0.12	0.09	0.06	0.01	0.05	0.04	28.40	0.09	0.03	0.0208
150	27.35	27.68	28.05	0.05	0.04	0.02	0	0.03	0.02	27.69	0.04	0.02	0.0153

ตารางผนวกที่ ข6 การลดความชื้นซึ่งที่ความดัน 0.7 bar อุณหภูมิ 125 °C

เวลา (minute)	มวลซิง (g)			ความชื้นมาตรฐานแห้ง			ความชื้นมาตรฐานเปียก			มวลซิงเฉลี่ย (g)	ความชื้นมาตรฐานแห้ง	ความชื้นมาตรฐานเปียก	S.D.
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	เฉลี่ย \bar{x}			
0	204.31	200.49	203.34	6.55	7.88	8.06	0.88	0.85	0.82	202.71	7.50	0.85	0.0300
15	147.68	146.24	147.32	4.08	6.09	6.38	0.72	0.8	0.76	147.08	5.52	0.76	0.0400
30	94.81	94.38	93.77	2.38	5.12	3.53	0.62	0.7	0.51	94.32	3.68	0.61	0.0954
45	56.87	55.31	54.28	1.26	2.93	2.13	0.39	0.48	0.28	55.49	2.11	0.38	0.1002
60	42.26	39.84	37.67	0.89	1.39	1.48	0.21	0.24	0.19	39.92	1.25	0.21	0.0252
75	32.59	31.66	30.98	0.39	0.66	0.62	0.11	0.14	0.08	31.74	0.56	0.11	0.0300
90	26.77	25.79	25.25	0.18	0.27	0.23	0.06	0.09	0.05	25.94	0.23	0.07	0.0208
105	24.16	23.86	23.48	0.11	0.13	0.16	0.03	0.04	0.02	23.83	0.13	0.03	0.0100
120	23.12	23.56	22.97	0.08	0.09	0.11	0.01	0.02	0.01	23.22	0.09	0.01	0.0058

ตารางผนวกที่ ข7 การลดความชื้นซึ่งที่ความดัน 0.8 bar อุณหภูมิ 105 °C

เวลา (minute)	มวลซิง (g)			ความชื้นมาตรฐานแห้ง			ความชื้นมาตรฐานเปียก			มวลซิงเฉลี่ย (g)	ความชื้นมาตรฐาน		S.D.
	1	2	3	1	2	3	1	2	3		แห้ง	เปียก	
												เฉลี่ย \bar{x}	
0	203.05	203.54	200.87	8.23	7.88	8.54	0.85	0.88	0.88	202.49	8.22	0.87	0.0173
15	176.22	183.64	185.22	7.43	7.06	7.22	0.82	0.87	0.87	181.69	7.24	0.85	0.0289
30	148.36	157.38	153.23	6.61	6.23	5.56	0.79	0.85	0.84	152.99	6.13	0.83	0.0321
45	126.36	136.48	128.94	5.34	5.58	4.69	0.76	0.82	0.81	130.59	5.20	0.80	0.0321
60	108.49	119.67	109.34	4.21	4.62	3.79	0.71	0.8	0.78	112.50	4.21	0.76	0.0473
75	92.39	103.34	90.64	3.44	3.84	3.08	0.67	0.77	0.73	95.46	3.45	0.72	0.0503
90	78.89	87.76	76.44	2.69	3.31	2.51	0.61	0.73	0.68	81.03	2.84	0.67	0.0603
105	67.41	75.54	64.28	2.17	2.66	1.99	0.54	0.68	0.63	69.08	2.27	0.62	0.0709
120	58.72	63.94	54.24	1.67	2.15	1.55	0.47	0.62	0.56	58.97	1.79	0.55	0.0755
135	51.74	53.44	45.93	1.26	1.66	1.18	0.4	0.55	0.47	50.37	1.37	0.47	0.0751
150	46.42	45.21	38.88	0.84	1.21	0.91	0.34	0.47	0.37	43.50	0.99	0.39	0.0681
165	42.28	39.79	33.57	0.59	0.89	0.67	0.27	0.39	0.27	38.55	0.72	0.31	0.0693
180	39.64	34.45	29.06	0.38	0.56	0.51	0.22	0.3	0.17	34.38	0.48	0.23	0.0656
195	38.26	31.09	26.54	0.21	0.24	0.37	0.18	0.23	0.09	31.96	0.27	0.17	0.0709
210	36.82	28.84	25.03	0.11	0.16	0.19	0.16	0.17	0.04	30.23	0.15	0.12	0.0723
225	33.87	27.12	24.39	0.08	0.12	0.11	0.06	0.11	0.01	28.46	0.10	0.06	0.0500

ตารางผนวกที่ ข8 การลดความชื้นขิงที่ความดัน 0.8 bar อุณหภูมิ 115 °C

เวลา (minute)	มวลขิง (g)			ความชื้นมาตรฐานแห้ง			ความชื้นมาตรฐานเปียก			มวลขิงเฉลี่ย (g)	ความชื้นมาตรฐานแห้งเฉลี่ย \bar{x}	ความชื้นมาตรฐานเปียก	S.D.
	1	2	3	1	2	3	1	2	3				
0	204.36	202.11	203.16	6.55	6.29	6.78	0.87	0.88	0.88	203.21	6.54	0.88	0.0058
15	188.16	185.46	187.24	5.52	4.08	4.08	0.84	0.82	0.85	186.95	4.56	0.84	0.0153
30	176.13	170.46	171.45	4.21	3.26	3.21	0.8	0.78	0.81	172.68	3.56	0.80	0.0153
45	168.21	162.24	160.24	3.58	2.41	2.36	0.74	0.7	0.72	163.56	2.78	0.72	0.0200
60	135.89	137.71	136.77	2.92	1.68	1.65	0.68	0.55	0.57	136.79	2.08	0.60	0.0700
75	105.46	108.64	107.79	2.08	1.16	0.93	0.58	0.43	0.45	107.30	1.39	0.49	0.0814
90	85.13	84.92	78.65	1.36	0.69	0.61	0.44	0.35	0.37	82.90	0.89	0.39	0.0473
105	63.61	68.38	65.52	0.79	0.37	0.39	0.32	0.23	0.25	65.84	0.52	0.27	0.0473
120	51.24	55.29	52.09	0.61	0.22	0.28	0.21	0.16	0.18	52.87	0.37	0.18	0.0252
135	48.78	48.08	44.93	0.48	0.19	0.19	0.15	0.11	0.12	47.26	0.29	0.13	0.0208
150	40.18	43.24	41.82	0.25	0.12	0.09	0.09	0.06	0.07	41.75	0.15	0.07	0.0153
165	33.46	35.48	40.86	0.16	0.09	0.06	0.03	0.02	0.04	36.60	0.10	0.03	0.0100
180	31.48	30.25	32.47	0.06	0.08	0.04	0.02	0.01	0.01	31.40	0.06	0.01	0.0058

ตารางผนวกที่ ข9 การลดความชื้นซึ่งที่ความดัน 0.8 bar อุณหภูมิ 125 °C

เวลา (minute)	มวลซิง (g)			ความชื้นมาตรฐานแห้ง			ความชื้นมาตรฐานเปียก			มวลซิงเฉลี่ย	ความชื้นมาตรฐาน	ความชื้นมาตรฐาน	S.D.
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	(g)	แห้ง	เปียก	
	เฉลี่ย \bar{x}												
0	201.34	200.98	202.39	7.12	6.98	6.44	0.85	0.84	0.86	201.57	6.85	0.85	0.0100
15	172.64	168.24	174.64	6.23	5.16	5.63	0.82	0.81	0.84	171.84	5.67	0.82	0.0153
30	153.64	152.73	136.72	4.73	3.47	4.41	0.74	0.73	0.79	147.70	4.20	0.75	0.0321
45	109.53	99.24	93.82	30.9	2.71	2.59	0.64	0.63	0.68	100.86	12.07	0.65	0.0265
60	74.97	72.03	69.59	2.28	1.69	1.78	0.48	0.47	0.54	72.20	1.92	0.50	0.0379
75	51.22	53.04	49.24	1.81	1.04	1.04	0.29	0.34	0.37	51.17	1.30	0.33	0.0404
90	36.47	40.46	37.12	0.91	0.98	0.98	0.12	0.2	0.28	38.02	0.96	0.20	0.0800
105	29.03	33.37	30.19	0.46	0.51	0.51	0.08	0.11	0.18	30.86	0.49	0.12	0.0513
120	28.06	30.14	27.24	0.28	0.34	0.25	0.06	0.09	0.09	28.48	0.29	0.08	0.0173
135	26.77	27.34	25.79	0.12	0.13	0.08	0.04	0.03	0.04	26.63	0.11	0.04	0.0058
150	24.96	25.46	24.88	0.03	0.05	0.05	0.01	0	0.01	25.10	0.04	0.01	0.0058

ภาคผนวก ค
อัตรากรอบแห่งขิงที่อุณหภูมิและความตันตางๆ

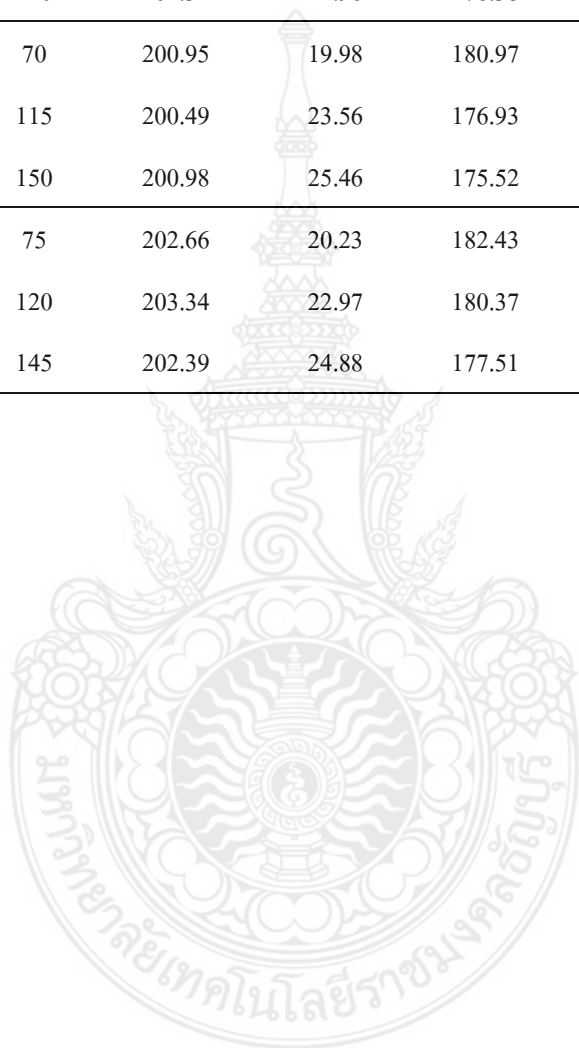


ตารางผนวกที่ ค1 อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105°C ที่ความดันต่างๆ							
จำนวนการทดลอง	ความดัน (bar)	เวลา (minute)	มวลขิง เริ่มต้น (g)	มวลขิง สุดท้าย (g)	มวล สูญเสีย (g)	อัตราการอบแห้ง (kgน้ำ/h)	S.D.
1	0.6	150	201.65	30.15	171.5	0.0686	0.338
	0.7	190	201.64	30.68	170.96	0.0540	0.379
	0.8	220	203.05	33.87	169.18	0.0461	4.880
2	0.6	150	202.64	29.57	173.07	0.0692	0.324
	0.7	195	202.13	30.14	171.99	0.0529	0.421
	0.8	225	203.54	27.12	176.42	0.0470	4.754
3	0.6	155	203.12	30.16	172.96	0.0670	0.341
	0.7	190	203.4	30.87	172.53	0.0545	0.403
	0.8	220	200.87	24.39	176.48	0.0481	4.654

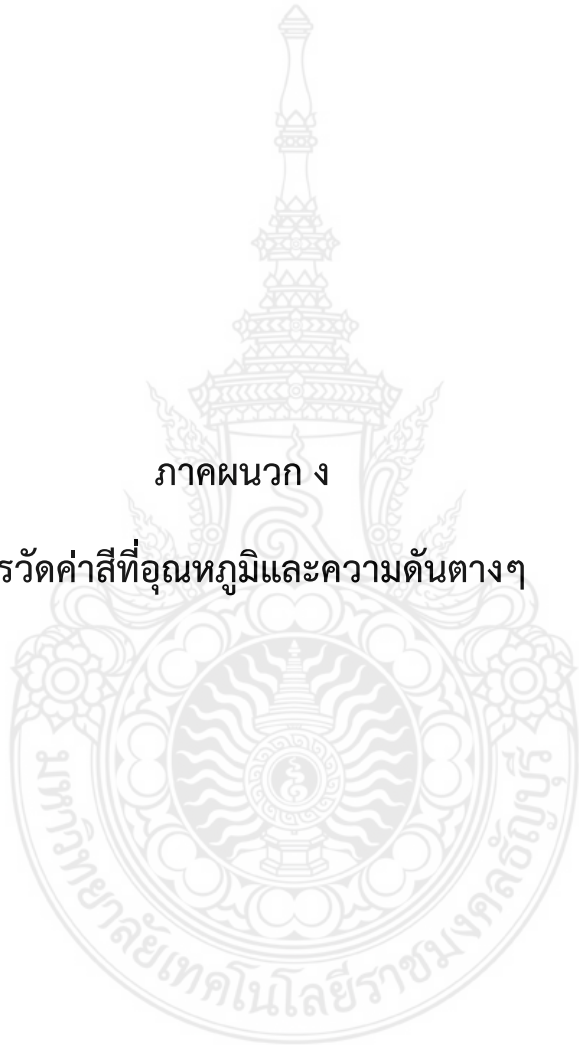
ตารางผนวกที่ ค2 อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ 115°C ที่ความดันต่างๆ							
จำนวนการทดลอง	ความดัน (bar)	เวลา (minute)	มวลขิง เริ่มต้น (g)	มวลขิง สุดท้าย (g)	มวล สูญเสีย (g)	อัตราการอบแห้ง (kgน้ำ/h)	S.D.
1	0.6	110	200.98	21.67	179.31	0.0978	0.216
	0.7	150	201.65	27.35	174.3	0.0697	0.350
	0.8	170	204.36	31.48	172.88	0.0610	1.112
2	0.6	115	202.64	22.1	180.54	0.0942	0.221
	0.7	145	202.45	27.68	174.77	0.0723	0.346
	0.8	175	202.11	30.25	171.86	0.0589	1.034
3	0.6	110	203.22	21.92	181.3	0.0989	0.246
	0.7	150	200.89	28.05	172.84	0.0691	0.329
	0.8	180	203.16	32.47	170.69	0.0569	1.164

ตารางผนวกที่ ๓3 อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ 125°C ที่ความดันต่างๆ

จำนวนการ ทดลอง	ความดัน (bar)	เวลา (minute)	มวลขิง เริ่มต้น (g)	มวลขิง สุดท้าย (g)	มวล สูญเสีย (g)	อัตราการอบแห้ง (kgน้ำ/h)	S.D.
1	0.6	75	201.34	19.45	181.89	0.1455	0.398
	0.7	120	204.31	23.12	181.19	0.0906	0.307
	0.8	140	201.34	24.96	176.38	0.0756	0.314
2	0.6	70	200.95	19.98	180.97	0.1551	0.385
	0.7	115	200.49	23.56	176.93	0.0923	0.314
	0.8	150	200.98	25.46	175.52	0.0702	0.311
3	0.6	75	202.66	20.23	182.43	0.1459	0.395
	0.7	120	203.34	22.97	180.37	0.0902	0.304
	0.8	145	202.39	24.88	177.51	0.0735	0.294



ภาคผนวก ง
การวัดค่าสีที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ



ตารางผนวกที่ ๗1 ค่าความสว่าง(L) ค่าสีแดงและเขียว(a) ค่าสีเหลืองและน้ำเงิน(b) และค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE)

ค่าสี	ครั้งที่	105 °C			115 °C			125 °C			จิงอบแห้งใน ห้องตลาด	จิงสด
		0.6 bar	0.7 bar	0.8 bar	0.6 bar	0.7 bar	0.8 bar	0.6 bar	0.7 bar	0.8 bar		
L	1	51.29	50.29	49.65	52.34	49.28	51.23	50.29	49.96	49.28	56.48	68.25
	2	53.64	49.68	50.74	50.24	51.26	52.34	49.68	49.38	48.96	59.64	66.98
	3	52.44	51.12	49.63	54.98	50.78	51.42	51.96	50.97	48.28	55.67	68.45
	เฉลี่ย \bar{x}	52.46	50.36	50.01	52.52	50.44	51.66	50.64	50.10	48.84	57.26	67.89
	S.D.	1.18	0.72	0.64	2.38	1.03	0.59	1.18	0.80	0.51	2.10	0.80
a	1	3.95	4.26	4.84	4.13	3.48	3.87	3.89	3.96	3.78	5.67	1.29
	2	4.99	4.32	4.06	4.06	3.79	4.06	3.79	3.62	3.65	5.64	-2.67
	3	3.25	3.98	4.18	3.98	4.23	4.28	3.94	3.54	3.56	5.34	2.35
	เฉลี่ย \bar{x}	4.06	4.19	4.36	4.06	3.83	4.07	3.87	3.71	3.66	5.55	0.32
	S.D.	0.88	0.18	0.42	0.08	0.38	0.21	0.08	0.22	0.11	0.18	2.65
b	1	22.34	22.08	22.36	22.14	22.64	23.14	23.48	23.34	24.68	22.67	28.96
	2	21.64	21.78	21.98	20.46	22.37	22.64	22.64	23.78	25.13	23.45	27.36
	3	21.38	21.95	22.57	20.48	21.64	23.09	22.94	24.12	23.52	21.36	28.74
	เฉลี่ย \bar{x}	21.79	21.94	22.30	21.03	22.22	22.96	23.02	23.75	24.44	22.49	28.35
	S.D.	0.50	0.15	0.30	0.96	0.52	0.28	0.43	0.39	0.83	1.06	0.87
ΔE	1	18.40	19.46	20.05	17.54	20.11	18.17	18.96	19.32	19.61	14.05	0
	2	16.41	19.48	18.38	19.32	17.71	16.79	19.06	19.03	19.23	11.76	0
	3	17.64	18.68	19.89	15.88	19.14	18.05	17.55	18.12	20.87	15.06	0
	เฉลี่ย \bar{x}	17.49	19.21	19.44	17.58	18.99	17.67	18.52	18.82	19.90	13.62	0.00
	S.D.	1.00	0.45	0.92	1.72	1.21	0.76	0.84	0.63	0.86	1.69	0.00



ภาคผนวก จ

การวัดค่าการหดตัวอุณหภูมิและความดันต่างๆ

ตารางผนวกที่ 1 ค่าการหดตัวที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ

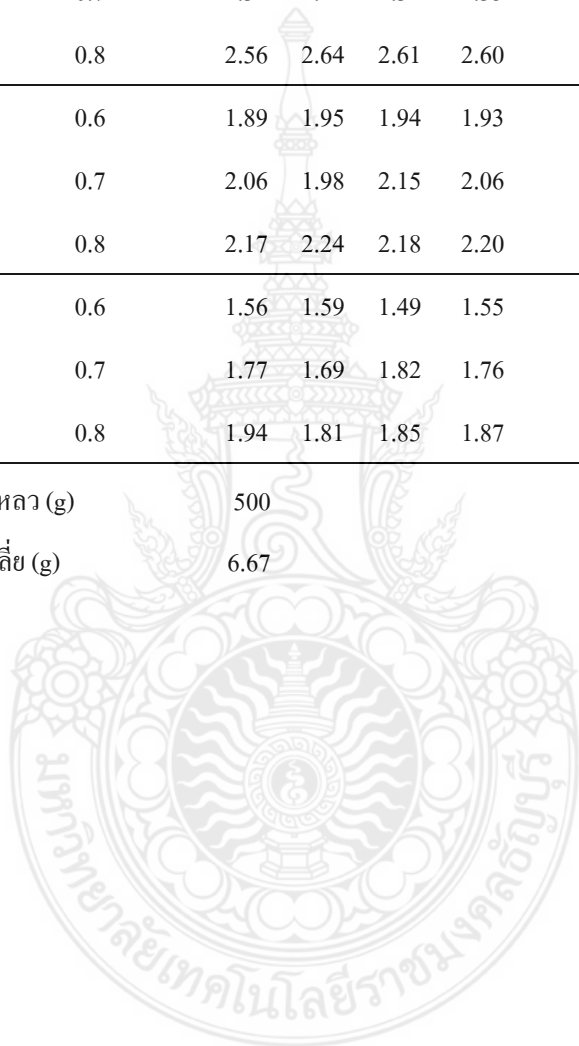
อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (bar)	มวลจิงหลังอบแห้ง (g)				Shrinkage (%)	S.D.
		1	2	3	เฉลี่ย \bar{x}		
105 °C	0.6	2.15	2.11	2.28	2.18	67.30	0.089
	0.7	2.34	2.41	2.31	2.35	64.70	0.051
	0.8	2.56	2.64	2.61	2.60	60.95	0.040
115 °C	0.6	1.89	1.95	1.94	1.93	71.10	0.032
	0.7	2.06	1.98	2.15	2.06	69.05	0.085
	0.8	2.17	2.24	2.18	2.20	67.05	0.038
125 °C	0.6	1.56	1.59	1.49	1.55	76.80	0.051
	0.7	1.77	1.69	1.82	1.76	73.60	0.066
	0.8	1.94	1.81	1.85	1.87	72.00	0.067

* น้ำหนักภาชนะ+ของเหลว (g)

500

* มวลจิงก่อนอบแห้งเฉลี่ย (g)

6.67





ภาคผนวก ฉ

การวัดค่าการคืนตัวอุณหภูมิและความดันต่างๆ

ตารางผนวกที่ ๑1 ค่าการคืนตัวที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 105 °C

เวลา (minute)	0.6 bar			0.7 bar			0.8 bar		
	มวลชิ่งหลังอบแห้ง (g)			มวลชิ่งหลังอบแห้ง (g)			มวลชิ่งหลังอบแห้ง (g)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0	2.15	2.11	2.28	2.34	2.41	2.31	2.56	2.64	2.61
2	2.86	2.78	2.95	2.88	2.91	2.79	3.66	3.45	3.51
4	3.24	3.23	3.34	3.54	3.44	3.61	4.12	3.98	4.09
6	3.88	3.97	4.11	4.22	4.19	4.08	4.59	4.34	4.63
8	4.12	4.25	4.56	4.32	4.68	4.56	4.82	4.96	5.06
10	4.48	4.56	4.89	4.69	4.99	4.78	5.06	5.46	5.39
Rehydration (%)	108.37	116.11	114.47	100.43	107.05	106.93	97.66	106.82	106.51

ตารางผนวกที่ ๑2 ค่าการคืนตัวที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 115 °C

เวลา (minute)	0.6 bar			0.7 bar			0.8 bar		
	มวลชิ่งหลังอบแห้ง (g)			มวลชิ่งหลังอบแห้ง (g)			มวลชิ่งหลังอบแห้ง (g)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0	1.89	1.95	1.94	2.06	1.98	2.15	2.17	2.24	2.18
2	2.28	2.31	2.38	2.54	2.39	2.46	2.56	2.61	2.51
4	2.96	3.09	3.22	3.16	3.26	3.29	3.31	3.33	3.32
6	3.45	3.84	3.94	3.79	3.88	3.56	3.98	4.09	3.95
8	3.99	4.16	4.24	4.23	4.13	4.23	4.23	4.48	4.49
10	4.36	4.59	4.68	4.69	4.32	4.69	4.54	4.87	4.77
Rehydration (%)	130.69	135.38	141.24	127.67	118.18	118.14	109.22	117.41	118.81

ตารางผนวกที่ ๓ ค่าการคืนตัวที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 125 °C

เวลา (minute)	0.6 bar			0.7 bar			0.8 bar		
	มวลซิงหลังอบแห้ง (g)			มวลซิงหลังอบแห้ง (g)			มวลซิงหลังอบแห้ง (g)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0	1.56	1.59	1.49	1.77	1.69	1.82	1.94	1.81	1.85
2	2.25	2.16	2.24	2.31	2.24	2.27	2.16	2.21	2.36
4	2.94	2.76	2.84	2.98	2.95	2.84	2.69	2.76	2.84
6	3.38	3.21	3.14	3.65	3.45	3.33	3.29	3.34	3.14
8	3.92	3.87	3.65	3.94	4.09	3.96	3.86	4.01	3.76
10	4.16	4.23	3.97	4.27	4.36	4.34	4.12	4.29	4.08
Rehydration (%)	166.67	166.04	166.44	141.24	157.99	138.46	112.37	137.02	120.54





ตารางผนวกที่ ข1 การวิเคราะห์สถิติการลดความชื้นซึ่งที่ความดัน 0.6 bar อุณหภูมิ 105 °C									
	N	Range	Minimum	Maximum	Sum	Mean		Std. Deviation	Variance
	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic	Statistic
Time	11	150	0	150	825	75.00	15.000	49.749	2475.000
มวลซิง	11	172.51	29.96	202.47	960.26	87.2964	17.23286	57.15493	3266.687
% d.b.	11	7.62	.09	7.71	40.24	3.6582	.81083	2.68921	7.232
% w.b.	11	.82	.04	.86	5.00	.4545	.09081	.30118	.091
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	11	.0528	.0058	.0586	.2429	.022082	.0044171	.0146500	.000
Valid N (listwise)	11								

ตารางผนวกที่ ข2 การวิเคราะห์สถิติการลดความชื้นซึ่งที่ความดัน 0.6 bar อุณหภูมิ 115 °C									
	N	Range	Minimum	Maximum	Sum	Mean		Std. Deviation	Variance
	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic	Statistic
Time	9	120	0	120	540	60.00	13.693	41.079	1687.500
มวลซิง	9	180.38	21.90	202.28	635.79	70.6433	21.57548	64.72645	4189.513
% d.b.	9	6.74	.05	6.79	23.06	2.5622	.85201	2.55603	6.533
% w.b.	9	.81	.04	.85	3.75	.4167	.10390	.31169	.097
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	9	.0248	.0058	.0306	.1583	.017589	.0025156	.0075468	.000
Valid N (listwise)	9								

ตารางผนวกที่ ๓3 การวิเคราะห์สถิติการลดความชื้นซึ่งที่ความดัน 0.6 bar อุณหภูมิ 125 °C									
	N	Range	Minimum	Maximum	Sum	Mean		Std. Deviation	Variance
	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic	Statistic
Time	6	75	0	75	225	37.50	11.456	28.062	787.500
มวลซิง	6	181.76	19.89	201.65	435.68	72.6133	29.77373	72.93045	5318.850
% d.b.	6	6.28	.03	6.31	14.43	2.4050	1.05485	2.58383	6.676
% w.b.	6	.85	.05	.90	2.57	.4283	.14625	.35824	.128
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	6	.0665	.0058	.0723	.1853	.030883	.0100679	.0246612	.001
Valid N (listwise)	6								

ตารางผนวกที่ ๓4 การวิเคราะห์สถิติการลดความชื้นซึ่งที่ความดัน 0.7 bar อุณหภูมิ 105 °C									
	N	Range	Minimum	Maximum	Sum	Mean		Std. Deviation	Variance
	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic	Statistic
Time	14	195	0	195	1365	97.50	16.771	62.750	3937.500
มวลซิง	14	171.83	30.56	202.39	1061.87	75.8479	15.10430	56.51511	3193.958
% d.b.	14	7.78	.10	7.88	36.51	2.6079	.71101	2.66036	7.077
% w.b.	14	.83	.02	.85	5.66	.4043	.08289	.31015	.096
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	14	.1000	.0000	.1000	.2257	.016121	.0067248	.0251618	.001
Valid N (listwise)	14								

ตารางผนวกที่ ข5 การวิเคราะห์สถิติการลดความชื้นซึ่งที่ความดัน 0.7 bar อุณหภูมิ 115 °C									
	N	Range	Minimum	Maximum	Sum	Mean		Std. Deviation	Variance
	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic	Statistic
Time	11	150	0	150	825	75.00	15.000	49.749	2475.000
มวลซิง	11	173.97	27.69	201.66	819.81	74.5282	18.52623	61.44455	3775.432
% d.b.	11	6.86	.04	6.90	24.74	2.2491	.75874	2.51645	6.333
% w.b.	11	.84	.02	.86	4.20	.3818	.09950	.32999	.109
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	11	.0194	.0058	.0252	.1651	.015009	.0021237	.0070434	.000
Valid N (listwise)	11								

ตารางผนวกที่ ข6 การวิเคราะห์สถิติการลดความชื้นซึ่งที่ความดัน 0.7 bar อุณหภูมิ 125 °C									
	N	Range	Minimum	Maximum	Sum	Mean		Std. Deviation	Variance
	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic	Statistic
Time	9	120	0	120	540	60.00	13.693	41.079	1687.500
มวลซิง	9	179.49	23.22	202.71	644.25	71.5833	21.39661	64.18982	4120.333
% d.b.	9	7.41	.09	7.50	21.07	2.3411	.89242	2.67726	7.168
% w.b.	9	.84	.01	.85	3.03	.3367	.10920	.32760	.107
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	9	.0944	.0058	.1002	.3574	.039711	.0115168	.0345503	.001
Valid N (listwise)	9								

ตารางผนวกที่ ข7 การวิเคราะห์สถิติการลดความชื้นซึ่งที่ความดัน 0.8 bar อุณหภูมิ 105 °C									
	N	Range	Minimum	Maximum	Sum	Mean		Std. Deviation	Variance
	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic	Statistic
Time	16	225	0	225	1800	112.50	17.854	71.414	5100.000
มวลซิง	16	174.03	28.46	202.49	1342.25	83.8906	14.18596	56.74382	3219.862
% d.b.	16	8.12	.10	8.22	45.43	2.8394	.66260	2.65041	7.025
% w.b.	16	.81	.06	.87	8.42	.5263	.07006	.28024	.079
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	16	.0582	.0173	.0755	.8860	.055375	.0047439	.0189757	.000
Valid N (listwise)	16								

ตารางผนวกที่ ข8 การวิเคราะห์สถิติการลดความชื้นซึ่งที่ความดัน 0.8 bar อุณหภูมิ 115 °C									
	N	Range	Minimum	Maximum	Sum	Mean		Std. Deviation	Variance
	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic	Statistic
Time	13	180	0	180	1170	90.00	16.202	58.417	3412.500
มวลซิง	13	171.81	31.40	203.21	1329.11	102.2392	17.44168	62.88688	3954.760
% d.b.	13	6.48	.06	6.54	23.29	1.7915	.56512	2.03757	4.152
% w.b.	13	.87	.01	.88	5.41	.4162	.09013	.32498	.106
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	13	.0756	.0058	.0814	.3795	.029192	.0068216	.0245955	.001
Valid N (listwise)	13								

ตารางผนวกที่ ข9 การวิเคราะห์สถิติการลดความชื้นซึ่งที่ความดัน 0.8 bar อุณหภูมิ 125 °C									
	N	Range	Minimum	Maximum	Sum	Mean		Std. Deviation	Variance
	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic	Statistic
Time	11	150	0	150	825	75.00	15.000	49.749	2475.000
มวลซิง	11	176.47	25.10	201.57	894.43	81.3118	19.49338	64.65222	4179.910
% d.b.	11	12.03	.04	12.07	33.90	3.0818	1.14637	3.80209	14.456
% w.b.	11	.84	.01	.85	4.35	.3955	.09914	.32880	.108
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	11	.0742	.0058	.0800	.3224	.029309	.0067986	.0225485	.001
Valid N (listwise)	11								



ภาคผนวก ซ
บทความตีพิมพ์



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวรพล โปธิ์ศรีทอง
วัน เดือน ปีเกิด	26 กุมภาพันธ์ 2534
ที่อยู่	1401/82 ถ.สามพระยา ต.ชะอำ อ.ชะอำ จ.เพชรบุรี 76120
การศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกรเครื่องกล บริษัท โปรแอคทีฟ แมเนจเม้นท์ จำกัด พ.ศ.2560 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	082 – 2546286
อีเมล	worapon.456@gmail.com

