



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

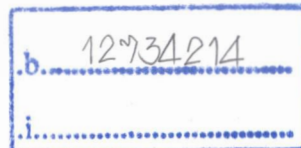
การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งขมิ้นชันโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน
A study of the factors affecting the turmeric drying by hybrid drying
(hot air and infrared)

นาย กฤษณ์ ผลโพธิ์
ผศ.ดร.ประสันท์ ชุ่มใจหาญ

RC4

ก281 ก

2556



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 140098
วันเดือนปี 11 S.A. 2558

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบสรุปผลงานวิจัย

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งขมิ้นชันโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน.....
(ภาษาอังกฤษ) A study of the factors affecting the turmeric drying by.....
..... hybrid drying (hot air and infrared).....

รายนามคณะผู้วิจัย

1. นาย ภูษณ์ ผลโพธิ์..... (หัวหน้าโครงการ)

..... สังกัด:หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์

..... โทร 5009 Email : kpkrit@kmitl.ac.th

2. ดร.ประสันท์ ชุ่มใจหาญ..... (ผู้ร่วมโครงการ)

..... สังกัด:หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์

..... โทร 5009 Email : kcprasan@kmitl.ac.th

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้ประจำปี 2556 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
คุณทหารลาดกระบัง ระยะเวลา 1 ปี เริ่มต้นเดือน 1 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2555 ถึง 30 เดือน กันยายน พ.ศ. 2555

สรุปผลงานวิจัยที่แบบย่อ

ขมิ้นชันเป็นพืชที่นิยมนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์สมุนไพร ซึ่งการผลิตนั้นควรต้องมีการลดความชื้นของขมิ้นชันเสียก่อนเพื่อช่วยในการยืดอายุในการเก็บรักษา และเพื่อช่วยเป็นการเตรียมขมิ้นชันแห้งเพื่อเป็นวัตถุดิบเบื้องต้นสำหรับขนวนการอื่นๆ การทดลองนำขมิ้นชันมาทำเป็นแผ่นนางแล้วทำการลดความชื้นจาก 4.51 ± 0.638 ให้เหลือ 0.085 ± 0.003 กรัม/น้ำ/กรัม ของแห้ง ด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนและด้วยรังสีอินฟราเรด ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80°C ที่ระดับความเร็วลมที่ 0.32 m/s ได้เวลาในการอบแห้งด้วยลมร้อนประมาณ 1,050, 780, 380 และ 290 นาที และใช้เวลาในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดประมาณ 180, 135, 95 และ 60 นาที ตามลำดับ นำผลการศึกษาไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าสมการกึ่งทฤษฎี (Semi - Theoretical Model) ของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของเหง้าขมิ้นชันแผ่น สำหรับค่าพารามิเตอร์สี่ของเหง้าขมิ้นชันแผ่น ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน มีค่า L^* , a^* และ b^* ลดลงสูงส่งผลให้มีค่าความแตกต่างสี (Total Color Different, TCD) โดยรวมสูงกว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ซึ่งสำหรับการศึกษากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบแห้งขมิ้นชันแผ่น พบว่าไม่มีผลต่อปริมาณสารเคอร์คิวมินที่สกัดได้ แต่วิธีการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดสามารถเพิ่มปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมินให้มากกว่าปริมาณสารเคอร์คิวมินที่สกัดได้ในขมิ้นชันสดและที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งขมิ้นชันแผ่นด้วยด้วยลมร้อนไม่มีการตรวจพบจำนวนจุลินทรีย์ ยีสต์, รา และโคลิฟอร์ม แต่ในขณะที่การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ตรวจพบว่ามียีสต์, รา และโคลิฟอร์ม เมื่อพิจารณาถึงค่าพลังงานสำหรับการอบแห้ง พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนมีอัตราการใช้พลังงานสูงสุดที่ 0.0960 ยูนิต์ต่อกรัมขมิ้นชันสด และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด มีอัตราการใช้พลังงานสูงที่สุดที่ 0.0924 ยูนิต์ต่อกรัมขมิ้นชันสด

ผลงานวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ.....สามารถนำไปใช้วิธีการอบแห้งที่เหมาะสมไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายตามเป้าหมายที่กำหนด เช่น ใช้เป็นยาสมุนไพรแห้ง หรือใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการสกัดสารสำคัญ.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไขมันชั้นเป็นพืชที่นิยมปลูกทั่วทั้งประเทศไทย โดยส่วนมากไขมันชั้นจะถูกนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์สมุนไพร โดยต้องมีการลดความชื้นก่อนเพื่อช่วยในการยืดอายุในการเก็บรักษา และเพื่อช่วยเป็นการเตรียมไขมันชั้นแห้งเพื่อเป็นวัตถุดิบเบื้องต้นสำหรับขบวนการอื่นๆ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะการอบแห้ง, การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งไขมันชั้น ตลอดจนผลกระทบของอุณหภูมิและวิธีการในการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีและปริมาณสารเคอร์คิวมิน ซึ่งผลการทดลองแสดงดังนี้

ไขมันชั้นถูกสไลด์เป็นแผ่นบางแล้วทำการลดความชื้นจาก 4.51 ± 0.638 ให้เหลือ 0.085 ± 0.003 กรัม น้ำ/กรัม ของแห้ง ด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนและด้วยรังสีอินฟราเรด ที่อุณหภูมิ 50 60 70 และ 80°C ที่ระดับความเร็วลมที่ 0.32 m/s ได้เวลาในการอบแห้งด้วยลมร้อนประมาณ 1,050 780 380 และ 290 นาที และใช้เวลาในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดประมาณ 180 135 95 และ 60 นาที ตามลำดับ นำผลการศึกษาไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าสมการกึ่งทฤษฎี (Semi - Theoretical Model) ของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของเหง้าไขมันชั้นแผ่น สำหรับค่าพารามิเตอร์สีของเหง้าไขมันชั้นแผ่น ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน มีค่า L^* a^* และ b^* ลดลงสูงส่งผลให้มีค่าความแตกต่างสี (Total Color Different, TCD) โดยรวมสูงกว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ซึ่งสำหรับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบแห้งไขมันชั้นแผ่น พบว่าไม่มีผลต่อปริมาณสารเคอร์คิวมินที่สกัดได้ แต่วิธีการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดสามารถเพิ่มปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมินให้มากกว่าปริมาณสารเคอร์คิวมินที่สกัดได้ในไขมันชั้นสดและที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยด้วยลมร้อนไม่มีการตรวจพบจำนวนจุลินทรีย์ ยีสต์ รา และโคลิฟอร์ม แต่ในขณะที่การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ตรวจพบว่ามีจำนวนจุลินทรีย์ ยีสต์ รา และโคลิฟอร์ม เมื่อพิจารณาถึงค่าพลังงานสำหรับการอบแห้ง พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนมีอัตราการใช้พลังงานสูงสุดที่ 0.0960 ยูนิตต่อกรัมไขมันชั้นสด และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด มีอัตราการใช้พลังงานสูงสุดที่ 0.0924 ยูนิตต่อกรัมไขมันชั้นสด

Abstract

Curcuma longa Linn has been widely planted throughout Thailand and it is typically produced for being the pharmacy products. The drying is needed as the first priority of producing to extend the storage period and to use for being the raw material. Therefore, the objectives of this thesis are to study drying properties of Curcuma longa Linn, to study the mathematical model of Curcuma longa Linn drying and the influences of the drying temperature and of the drying techniques to the total color different (TCD) and the amount of curcumin. The results are shown here:

The sliced Curcuma longa Linn was dried from 4.51 ± 0.63 to 0.085 ± 0.003 $\text{g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry solid}}$ by the hot air dryer and infrared dryer under the temperature of 50, 60, 70 and 80 °C at the wind speed of 0.32 m/s. The drying period of using hot air dryer at 50, 60, 70 and 80 °C were at 1,050, 780, 380 and 290 minutes. These results gave the best fit under the empirical mathematical model of Page. The color of the dried sample was measured under the scale of L* a* and b* and compare the color changing by calculating total color different (TCD). The reduction of the TCD under hot air drying was higher than under infrared drying. The drying temperatures were not affected to the obtaining extracted curcumin from the dried sample for both technique; nevertheless, the infrared dried sample was extracted more curcumin than both fresh and hot air dried sample. The hot air dried sample was also subjected to the microbial test limit and found none of microorganism yeast and fungus and less of coliform, while, the infrared dried sample found high value of microorganism yeast and fungus and high of coliform, which these can be concluded that the drying sample under hot air dryer were approved by Thai Community Product Standard. Finally, the maximum energy consumption of drying Curcuma longa Linn with hot air and with infrared were 0.0960 and 0.0924 unit/g fresh material respectively.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำงานวิจัยชิ้นนี้ ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังสำหรับทุนสนับสนุนวิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัยกระบวนการการแปรรูปธัญพืชและการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ฤทธิชัย อัครราชันย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้แนวคิด และคำแนะนำตลอดการดำเนินงานวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อ	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตของการทำวิจัย	2
บทที่ 2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ความรู้ทั่วไปของไขมันชั้น	3
2.2 ความรู้พื้นฐานการอบแห้ง	5
2.3 หลักการอบแห้ง	6
2.4 การเกิดความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด	12
2.5 วิธีการหาความชื้น	14
2.6 การศึกษาจลนพลศาสตร์และหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	16
2.7 การวิเคราะห์สี	18
2.8 หลักการของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer	21
2.9 การตรวจวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ไขมันชั้น	25
2.10 การศึกษาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน	25
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	
3.1 วิธีการดำเนินงาน	28
3.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์และการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	33
3.3 การวัดค่าสี	37
3.4 การศึกษาปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมินของไขมันชั้น	38
3.5 การตรวจวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ไขมันชั้น	41
3.6 การศึกษาหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจากการอบแห้งไขมันชั้น	47

หัวข้อ	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	
4.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งทางกายภาพเบื้องต้นของขมิ้นชัน	48
4.2 ผลการศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนาย ค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง	55
4.3 ผลการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีของขมิ้นชันแผ่นอบแห้ง	58
4.4 ผลการศึกษาปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมินของขมิ้นชัน	65
4.5 ผลการตรวจวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ขมิ้นชัน	67
4.6 ผลการศึกษาหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจากการอบแห้งขมิ้นชัน ในสภาวะการอบแห้งแบบต่างๆ	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	73
5.2 ข้อเสนอแนะ	74
เอกสารอ้างอิง	76

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1	3
รูปที่ 2.2	5
รูปที่ 2.3	7
รูปที่ 2.4	11
รูปที่ 2.5	13
รูปที่ 2.6	19
รูปที่ 2.7	20
รูปที่ 2.8	20
รูปที่ 2.9	22
รูปที่ 2.10	22
รูปที่ 3.1	29
รูปที่ 3.2	31
รูปที่ 3.3	32
รูปที่ 3.4	33
รูปที่ 3.5	33
รูปที่ 3.6	37
รูปที่ 3.7	38
รูปที่ 3.8	38
รูปที่ 3.9	39
รูปที่ 3.10	39
รูปที่ 3.11	40
รูปที่ 3.12	40
รูปที่ 3.13	42
รูปที่ 3.14	42
รูปที่ 3.15	43
รูปที่ 3.16	45
รูปที่ 4.1	49
รูปที่ 4.2	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ความชื้นเริ่มต้นของไขมันชั้นแผ่น ตามมาตรฐาน AOAC (2005)	50
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างไขมันชั้นแผ่นอบแห้งหลังการหาความชื้นตามมาตรฐาน AOAC (2005)	51
รูปที่ 4.5 เครื่องอบแห้งแบบถาด	52
รูปที่ 4.6 ชุดทดลองการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด	52
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ในระหว่างการอบแห้ง ด้วยลมร้อน ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส	53
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ในระหว่างการอบแห้ง ด้วยรังสีอินฟราเรด ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส	54
รูปที่ 4.9 แสดงสีไขมันชั้นแผ่นที่สภาวะต่าง ๆ (ก) ไขมันชั้นแผ่นสด (ข) ไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อน 50 C (ค) ไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อน 60 C (ง) ไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อน 70 C (จ) ไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อน 80 C	59
รูปที่ 4.10 แสดงสีไขมันชั้นแผ่นที่สภาวะต่าง ๆ (ก) ไขมันชั้นแผ่นสด (ข) ไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 50C (ค) ไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 60C (ง) ไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 70C (จ) ไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 80C	60
รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าสีไขมันชั้นแผ่นสดกับไขมันชั้นแผ่นหลังการอบแห้งด้วยลมร้อน ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส	62
รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าสีไขมันชั้นแผ่นสดกับไขมันชั้นแผ่นหลังการอบแห้งด้วย รังสีอินฟราเรด ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส	63
รูปที่ 4.13 เส้นมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (แกน x) กับค่าความเข้มข้นของสารละลายเคอร์คิวมิน (แกน y) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัม/ลิตร	65
รูปที่ 4.14 ผลกระทบของวิธีการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมิน	67
รูปที่ 4.15 แสดงจำนวนจุลินทรีย์ ยีสต์และรา โดยการอบแห้งด้วยลมร้อน	68
รูปที่ 4.16 แสดงจำนวนจุลินทรีย์ ยีสต์และรา โดยการอบแห้งด้วยอินฟราเรด	68
รูปที่ 4.17 แสดงจำนวนโคลิฟอร์ม โดยการอบแห้งด้วยลมร้อน (ซ้าย) และโดยการอบด้วยอินฟราเรด (ขวา)	69

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางความร้อนของอาหารบางชนิด	12
ตารางที่ 2.2 รูปแบบสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง แบบต่าง ๆ	17
ตารางที่ 3.1 ตารางหาปริมาณโคลิฟอร์ม (MPN) ต่อ 100 มิลลิลิตร จากตัวอย่างที่เจือจางความเข้มข้นแตกต่างกัน 10 เท่า	46
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และการวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองการอบแห้งด้วยลมร้อน ของไขมันชั้นแผ่น	56
ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพของไขมันชั้นแผ่น ในระหว่างการอบแห้งแบบต่างๆ	57
ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นของสารเคอร์คิวมินที่สกัดได้จากไขมันชั้นแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส	66
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการตรวจวัดจำนวนจุลินทรีย์ ยีสต์และรา โดยใช้วิธี Pour plate method และผลการตรวจวัดจำนวนโคลิฟอร์ม โดยใช้วิธี Most-probable-number method (MPN)	70
ตารางที่ 4.6 แสดงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจากการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยลมร้อน และการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยรังสีอินฟราเรด	71

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันมีการส่งเสริมให้มีการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของสมุนไพรมากขึ้นใช้ในชุมชนเพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการผลิตยาสมุนไพร เครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ซึ่งมุ่งเน้นให้ชุมชนได้บริโภคผลิตภัณฑ์ที่มีความปลอดภัย ประหยัดและใช้วัตถุดิบในท้องถิ่น โดยสมุนไพรแต่ละชนิดมีคุณสมบัติ และสรรพคุณที่แตกต่างกันออกไป เช่น สามารถนำไปใช้ในการรักษาอาการแพ้ แผลอักเสบ ผิพุพอง รักษาโรคกลากเกลื้อน และมีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อราและแบคทีเรีย เป็นต้น สำหรับขมิ้นนิยมนำมาเป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอาง โดยเฉพาะในส่วนของลำต้นที่อยู่ใต้ดินที่เรียกว่าเหง้า เพราะในส่วนของเหง้าขมิ้นชันประกอบไปด้วย สารเคอร์คิวมิน ซึ่งเป็นสารสีเหลืองสกัดจากเหง้าขมิ้นชัน (*Curcuma longa* Linn.) [1] สารเคอร์คิวมินมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ดี จึงได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลายด้าน โดยเฉพาะทางด้านการผลิตยา อาหาร และเครื่องสำอาง นอกจากนี้ได้มีการวิจัยทั้งในคนและสัตว์ทดลองพบว่า เคอร์คิวมินมีฤทธิ์ด้านการอักเสบ ฤทธิ์บำรุงรักษาตับ ช่วยป้องกันมะเร็ง ฤทธิ์ในการลดระดับโคเลสเตอรอล และฤทธิ์ในการป้องกันสมองเสื่อม [2]

การทำผลิตภัณฑ์สมุนไพรจากขมิ้นชันนั้นควรต้องมีการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ก่อนเพื่อช่วยในการยืดอายุในการเก็บรักษาและเพื่อช่วยเป็นการเตรียมขมิ้นชันแห้งเพื่อเป็นวัตถุดิบเบื้องต้นสำหรับกระบวนการอื่นๆ การลดความชื้นหรือเรียกว่าการอบแห้งสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การอบแห้งโดยใช้แสงอาทิตย์ (การตากแดด) ซึ่งเป็นวิธีการที่ทำได้ง่าย เสียค่าใช้จ่ายน้อยแต่ยากต่อการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สำหรับการอบแห้งระบบสุญญากาศและการอบแห้งแบบฟลูอิดไbezเบตเป็นวิธีการที่ต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินงานสูง วิธีการที่นิยมใช้ในการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรและผลิตผลทางการเกษตรคือการอบลมร้อน วิธีการนี้ใช้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งต่ำ ทำให้ช่วยรักษากลิ่นและสีของผลิตภัณฑ์ไว้ได้ แต่ก็มีข้อเสียคือใช้เวลาในการอบแห้งค่อนข้างนานส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงานในการนำกระบวนการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลมาประยุกต์ใช้เป็นวิธีการที่น่าสนใจ เนื่องจากรังสีอินฟราเรดไกลสามารถทะลุผ่านวัตถุโดยเฉพาะผลผลิตทางการเกษตรเข้าไปทำให้โมเลกุลของวัตถุนั้นๆเกิดการสั่นสะเทือนมากกว่าปกติ เป็นผลให้วัตถุนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น นอกจากนี้พลังงานที่แผ่รังสีออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะไม่ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุนั้นๆต้องเสียไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในส่วนการอบแห้งด้วยลมร้อนและด้วยรังสีอินฟราเรด

ความท้าทายของการอบแห้งวัสดุไม่ใช่เพียงแค่เป็นการทำให้วัสดุแห้งเท่านั้น แต่เป็นการศึกษาหาสถานะที่เหมาะสม (อุณหภูมิและเวลา) ของการอบแห้งผลิตภัณฑ์ให้ได้มาตรฐานและผลิตภัณฑ์ที่มี

คุณภาพทั้งทางกายภาพและทางเคมี ดังนั้นการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการอบแห้ง
ไขมันชั้นระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน กับการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดจึงเป็นแนวทางในการผลิต
ไขมันชั้นอบแห้งเพื่อยังคงให้มีระดับสารเคอร์คิวมินในไขมันชั้นที่สูง และเพื่อสามารถใช้เป็นวัตถุดิบที่สำคัญ
การพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตได้อย่างครบวงจรเป็นการต่อยอดทางเศรษฐกิจของประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1. ศึกษาคุณลักษณะการอบแห้ง (ค่าความชื้นเริ่มต้น ค่าความชื้นสมดุล และค่าความชื้น
สุดท้าย) ของไขมันชั้นแผ่นบางที่อุณหภูมิต่างๆ

1.2.2. ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสี และ
ปริมาณสารออกฤทธิ์ ในการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยคลื่นความร้อนอินฟราเรด

1.2.3. ศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร
ในระหว่างการอบแห้ง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ภายหลังจากทำทดลองผู้วิจัยคาดว่าจะได้ประโยชน์ โดยผู้ประกอบการสามารถเอาสถานะและ
วิธีการอบแห้งที่เหมาะสมในการอบแห้งไขมันชั้นเป็นแนวทางในการผลิต ผลิตภัณฑ์จากไขมันชั้นอบแห้งที่
สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆในอุตสาหกรรมชุมชนเกี่ยวกับอาหารและยา และเป็นแนวทางการเพิ่ม
มูลค่าและใช้ประโยชน์จากวัสดุทางการเกษตรในอุตสาหกรรมผลิตต่างๆได้อย่างคุ้มค่ามากที่สุด

1.4 ขอบเขตของการทำวิจัย

1. ทดลองหาความชื้นเริ่มต้น และค่าความชื้นสมดุลของไขมันชั้น เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ในการ
คำนวณสมดุลมวลและสมดุลความร้อนในระหว่างการทดลองอบแห้ง

2. หาอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้งที่เหมาะสม ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสี ปริมาณสารเคอร์คิว
มิน และปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์อบแห้ง ตลอดจนการศึกษาหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน ของ
ทั้งการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งด้วยคลื่นความร้อนอินฟราเรด

3. ทดลองหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่
เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้งของไขมันชั้นในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน และรังสีอินฟราเรด

บทที่ 2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาการอบแห้งสมุนไพรโดยใช้เหง้าขมิ้นชันเป็นวัตถุดิบ ผู้วิจัยได้รวบรวมเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อประกอบการทำวิจัย ได้แก่ความรู้ทั่วไปของขมิ้นชัน ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ สารสำคัญที่พบความรู้พื้นฐานการอบแห้ง หลักการอบแห้งในวิธีต่างๆ การเกิดความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น การวิเคราะห์ค่าสี การวิเคราะห์เชิงปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมิน การตรวจวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ขมิ้นชัน เพื่อให้ได้ขมิ้นชันตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน การศึกษาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน และการตรวจเอกสาร ตัวอย่างงานวิจัยในด้านการอบแห้ง โดยรายละเอียดเพิ่มเติมของการรวบรวมความรู้และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

2.1 ความรู้ทั่วไปของขมิ้นชัน

ชื่อวิทยาศาสตร์: *Curcuma Longa* Linn

ชื่อสามัญ: Turmeric, Curcuma

วงศ์: Zingiberaceae

ชื่ออื่น: ขมิ้นแกง (เชียงใหม่) ขมิ้นชัน (กลาง,ใต้) ขมิ้นหยอก (เชียงใหม่) ขมิ้นหัว (เชียงใหม่) ขี้มัน (ตรัง,ใต้) ตายอ (กะเหรี่ยง กำแพงเพชร) สะยอ (กะเหรี่ยง แม่ฮ่องสอน) และ หมิ้น (ตรัง,ใต้)



รูปที่ 2.1 ขมิ้นชัน ที่มา: <http://www.the-than.com>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ขมิ้นขมิ้นชัน (*Curcuma domestica* Val.) เป็นไม้ล้มลุกอยู่ในวงศ์ Zingiberaceae เช่นเดียวกับ ขิงและ ข่า [3] มีชื่อสามัญคือ Turmeric, Curcuma, Indian saffron และ Yellow root [4] เมื่อโตเต็มที่จะสูงประมาณ 1 เมตร ลำต้นที่แท้จริง คือ ส่วนที่อยู่ใต้ดิน เรียกว่าเหง้า ประกอบด้วยแง่ง ที่เรียกว่า แง่งแม่หรือแง่งหลัก (mother rhizome or bulbs) แง่งนี้มีลักษณะกลม และเป็นที่แตกแขนงออกไปทางด้านข้างเป็นแขนงที่สองและสามต่อไป (secondary or tertiary branches) แขนงที่แตกออกถ้ามีลักษณะกลม เรียกว่า คอรัม (corm) ถ้ามีลักษณะยาวคล้ายนิ้วมือ เรียกว่า ฟิงเกอร์ (finger) ซึ่งแขนงนี้เองจะเป็นแหล่งกำเนิดของรากฝอยที่จะเจริญเป็นลำต้นและใบต่อไป สำหรับลำต้นที่ปรากฏให้เห็นเหนือพื้นดินนั้น คือ ลำต้นเทียมประกอบด้วยกาบใบซ้อนทับเป็นชั้น ๆ ซึ่งจากโคนถึงปลายใบจะมีลักษณะยาวรี ปลายแหลม เมื่อโตเต็มที่จะมีใบ 6-10 ใบ ช่อดอกเห็นรูปทรงกระบอกหรือโคน (cone) แต่ปกติแล้วดอกของขมิ้นชันจะเป็นหมัน เช่นเดียวกับขิงจึงมักไม่ติดผลและเมล็ด [5] ขมิ้นชันเป็นพืชสมุนไพร ทรงคุณค่าที่มีอยู่ตามธรรมชาติมาช้านานเพราะด้วยคุณสมบัติที่สามารถนำมาใช้ทางยา จากงานวิจัยและการทดลองวิจัยและศึกษาค้นคว้าของสถาบัน รวมถึงหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต่างๆ พบว่าขมิ้นชันสามารถใช้บำบัดรักษาอาการของโรคต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับคนเราได้ไม่น้อยกว่า 50 โรค อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้ปรุงแต่งสีส้ม [6] เพิ่มรสชาติของอาหารให้มีความน่ารับประทาน และมีคุณค่าทางโภชนาการมากยิ่งขึ้น

สารเคมีที่พบในขมิ้นชันจะพบในส่วนของน้ำมันหอมระเหยเป็นสำคัญประมาณ 2-6 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบสารที่มีความสำคัญอีกชนิดหนึ่งคือ เคอร์คิวมิน (Curcumin Content) ในขมิ้นจะมีสารเคอร์คิวมินอยู่ประมาณ 1.8-5.4 เปอร์เซ็นต์ สารนี้มีสีเหลืองส้มหรือสีเหลืองแดง ซึ่งเป็นสีของขมิ้นชันเอง สารนี้ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ดีในแอลกอฮอล์ และกรดอะซิติก จากการศึกษาพบว่าปริมาณน้ำมันหอมระเหยและเคอร์คิวมินในขมิ้นจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับอายุของพืช [7] กล่าวคือขมิ้นที่มีการเจริญเต็มที่แล้วจะมีปริมาณของเคอร์คิวมินเปลี่ยนแปลงไปในช่วงระยะเจริญตั้งแต่เดือนที่ 5 ถึงเดือนที่ 8 เพียง 7 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ส่วนน้ำมันหอมระเหยในขมิ้นที่มีการเจริญเติบโตเต็มที่จะมีปริมาณลดลงและการลดลงจะมีมากที่สุดในเดือน 8 นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าในการปลูกขมิ้นชัน ถ้าใส่ปุ๋ย ไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสหรือโพแทสเซียมหรือทั้งสามชนิดจะทำให้ได้ผลผลิตของขมิ้นเพิ่มมากขึ้นแต่ปริมาณของเคอร์คิวมินจะลดลง [8]

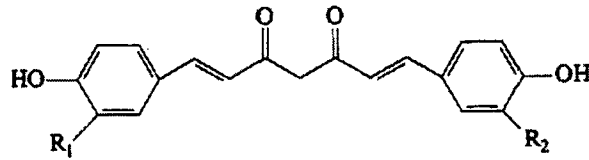
เคอร์คิวมิน (Curcumin)

สารเคมีที่พบในขมิ้นชัน จะพบในส่วนของน้ำมันหอมระเหยเป็นสำคัญ โดยทั่วไปแล้วขมิ้น จะมีน้ำมันหอมระเหยตั้งแต่ 2-6% (v/w) น้ำมันมีสีเหลืองและเรืองแสงได้เล็กน้อย สารเคมีที่พบมากที่สุด คือ เทอร์เมโรน (termeron) ประมาณ 58-59 % นอกจากนี้ยังพบสารที่สำคัญอีกกลุ่มหนึ่งคือ เคอร์คิวมินนอยด์ (curcuminoids) ซึ่งประกอบด้วยสารที่สำคัญ 3 ตัว คือ เคอร์คิวมิน (curcumin 75-81%) เดสเมธอกซีเคอร์คิวมิน (desmethoxycurcumin 15-19%) และบิสเดสเมธอกซีเคอร์คิวมิน (bisdsmethoxycurcumin 2.2-6.6%) ทั้งเดสเมธอกซีเคอร์คิวมินและบิสเดสเมธอกซีเคอร์คิวมิน เป็นอนุพันธ์ของเคอร์คิวมิน [9] เนื่องจากมีสารเคอร์คิวมินในปริมาณมากที่สุด ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการเรียกชื่อจึงมักเรียกสารทั้งสามตัวนี้รวมกันว่า สารเคอร์คิวมิน สูตรโครงสร้างของสารเคอร์คิวมินนอยด์แสดงในภาพที่ 2.2 เคอร์คิวมินซึ่งมีประมาณ 1.8-5.4% เป็นสารสีเหลืองส้ม หรือสีเหลืองแดง ซึ่งเป็นสีของขมิ้นชันเอง สารนี้ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ดีในแอลกอฮอล์ และกรดอะซิติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา 4 หน้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[10] จากการศึกษาพบว่าเคอร์คิวมินมีฤทธิ์ต่อต้านการเจริญเติบโตของเชื้อราและเชื้อแบคทีเรีย ยับยั้งการเกาะกลุ่มของเกล็ดเลือด ลดไขมันในเลือด ขับน้ำดี สมานแผล ยับยั้งการเกิดพิษต่อตับ ต้านอนุมูลอิสระ ป้องกันการเกิดแผลในกระเพาะอาหาร ต้านมะเร็ง โล่และฆ่ายุง เป็นต้น [11]



รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างเคมีของสารเคอร์คิวมิน

Curcumin : R1 = R2 = OCH3

Desmethoxycurcumin : R1 = H, R2 = OCH3

Bisdsmethoxycurcumin : R1 = R2 = H

เนื่องจากขมิ้นชันเป็นพืชสมุนไพรที่มีประโยชน์มากมายดังกล่าวข้างต้นอีกทั้งมีปลูกมากมายในประเทศไทยประกอบกับรัฐบาลพยายามส่งเสริมภูมิปัญญาชาวบ้านในการนำสมุนไพรมาสกัดทำเป็นยารักษาโรค ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวและอาหารเสริม งานวิจัยเกี่ยวกับขมิ้นชันส่วนใหญ่จะเน้นการนำขมิ้นชันไปใช้ประโยชน์มากกว่า ดังนั้นการศึกษابัจจัยของตัวแปรต่างๆที่ควบคุมกระบวนการสกัดสารเคอร์คิวมินซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของขมิ้นชันจึงเป็นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ โดยงานวิจัยนี้จะทำการอบแห้งขมิ้นชันแผ่นเพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมินจากขมิ้นโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์เมธานอลในการสกัด เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งขมิ้นชันแผ่น การตรวจวิเคราะห์ค่าสี การศึกษาถึงผลกระทบต่อปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมิน จากนั้นจะนำขมิ้นชันแผ่นที่ผ่านการอบแห้งไปตรวจหาเชื้อจุลินทรีย์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.676/2547) และการศึกษาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้ง เพื่อนำข้อมูลไปต่อยอดส่งเสริมกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมชุมชนหรือกลุ่มแม่บ้าน รวมถึงการนำสารสกัดเคอร์คิวมินไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านการแพทย์เพื่อผลิตยาที่มีคุณภาพต่อไป

2.2 ความรู้พื้นฐานการอบแห้ง

2.2.1 ทฤษฎีการอบแห้ง [12]

การทำแห้ง เป็นกระบวนการแปรรูปเพื่อเก็บรักษาอาหารโดยใช้ความร้อนภายใต้สภาวะควบคุมเพื่อกำจัดน้ำส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในอาหาร โดยการระเหย การระเหิด การสกัดน้ำออกด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม หรือใช้กระบวนการออสโมติกด้วยน้ำตาลหรือเกลือ มีวัตถุประสงค์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของอาหารโดยการลดค่า Water activity ปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์ส่วนมากจะอยู่ในรูปของน้ำอิสระ ซึ่งมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ และเป็นสาเหตุสำคัญของการเสื่อมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้การลดน้ำหนักและปริมาตรของอาหารยังช่วยลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มความสะดวกในการเก็บรักษา ขนส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา 5 แผ่นนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแสดงความชื้น (Moisture content) หรือน้ำที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์สามารถบอกในรูปของอัตราส่วน หรือเปอร์เซ็นต์ฐานเปียก (Wet basis) หรือฐานแห้ง (Dry basis)

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำแห้ง

การทำแห้งคือ การเคลื่อนย้ายน้ำออกจากอาหารโดยปัจจัยใดๆ ที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายนี้จึงมีผลต่ออัตราของการทำแห้ง ได้แก่

1. คุณสมบัติของอาหาร อาหารเนื้อโปร่งมีการเคลื่อนที่ของน้ำภายในอาหารแบบผ่านช่องแคบซึ่งเร็วกว่าการแพร่ในอาหารเนื้อแน่น ดังนั้นอาหารเนื้อโปร่งจึงแห้งได้เร็วกว่าอาหารเนื้อแน่น อาหารที่มีน้ำตาลสูงจะเหนียวกีดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำ จึงทำให้แห้งได้ช้ากว่าอาหารที่มีการลวกนวดคลึง ทำให้เซลล์แตกจึงแห้งได้เร็วขึ้น
2. ขนาดและรูปร่าง ขนาดและรูปร่างมีผลต่อพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก เช่น รูปร่างเหมือนกันขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากกว่าขนาดใหญ่จึงทำให้แห้งเร็วกว่า แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศที่จะเกิดการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไป ถ้าชิ้นเล็กมากทับถมกันการระเหยเกิดได้เฉพาะที่ผิวสัมผัสกับอากาศจึงทำให้การทำแห้งเกิดได้ช้าทั้งๆ ที่พื้นที่ต่อหน่วยน้ำหนักมาก
3. อุณหภูมิของอากาศร้อน ถ้าอากาศมีความชื้นคงที่ การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับไอน้ำจึงมีผลต่อการทำแห้งในช่วงอัตราการทำแห้งคงที่และอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การแพร่กระจายของน้ำดีขึ้นจึงมีผลต่อการอบในช่วงการทำแห้งลดลงด้วย
4. ความเร็วของลมร้อน ลมร้อนทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปด้วย เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจึงเคลื่อนย้ายได้ดีขึ้น การเคลื่อนย้ายเกิดขึ้นเต็มที่ที่ความเร็ว 244 เมตรต่อนาที นอกจากนั้นความเร็วลมทำให้เกิดกระแสปั่นป่วนของอากาศในเตาอากาศจึงสัมผัสอาหารได้ดีขึ้น

2.3 หลักการอบแห้ง

2.3.1 กระบวนการทำแห้ง [13]

การทำแห้ง (drying) คือ การลดความชื้นของอาหารจนถึงระดับที่สามารถระงับการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้คือ มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (water activity, a_w) ต่ำกว่า 0.70 ทำให้เก็บอาหารไว้ได้นาน อาหารแห้งแต่ละชนิดจะมีความชื้นในระดับปลอดภัยที่ไม่เท่ากัน เช่น ผลไม้แช่อิ่มเก็บได้ที่ความชื้น 15-20% แต่ถ้าเป็นเมล็ดธัญพืชเก็บที่ความชื้นนี้จะเกิดราได้

ในการทำแห้งจะต้องมีการให้พลังงานแก่อาหาร ทำให้น้ำในอาหารเปลี่ยนสถานะเป็นไอแล้วเคลื่อนย้ายออกจากอาหาร แสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนจากธรรมชาติและกระแสลมที่พัดผ่านอาหารทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายไอน้ำ เนื่องจากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ให้อุณหภูมิไม่ได้สูงนักและกระแสลมธรรมชาติไม่สูงพอ ทำให้การตากแห้งต้องใช้เวลาาน ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเครื่องอบที่มีการให้พลังงานความร้อนในปริมาณที่ควบคุมได้และมีอุปกรณ์ในการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกจากผิวอาหาร การถ่ายเทความร้อนและมวลสารเกิดได้เร็ว อาหารจึงแห้งได้เร็วขึ้น การถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างการอบแห้งทำได้หลายวิธีคือ

จากภาพที่ 2.3 สามารถแบ่งช่วงกราฟอัตราการอบแห้งเป็น 3 ช่วง ได้แก่

1. ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial Adjustment Period) เป็นช่วงที่ความชื้นที่มีอยู่ในอาหารปรับตัวเพื่อมีอุณหภูมิเท่ากับลมร้อน อัตราการอบแห้งจะต่ำและจะค่อยๆเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงช่วงที่อัตราการอบแห้งคงที่ จากรูปที่ 2.3 คือ ช่วง AB ซึ่งถือว่าเป็นช่วงสั้นๆ สามารถตัดทิ้งได้เมื่อคำนวณเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (Drying Time) ส่วนช่วง A'B เป็นกรณีที่บริเวณผิวหน้าของแข็งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่จะเริ่มเกิดการระเหยในตอนแรก จะสูงและค่อยๆลดลงจนคงที่

2. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Period) เป็นช่วงที่น้ำในอาหารระเหยเป็นไออย่างต่อเนื่อง คล้ายกับการระเหยของน้ำโดยทั่วไป

3. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period) เป็นช่วงที่ความชื้นในอาหารเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารอย่างไม่ต่อเนื่อง ทำให้ชั้นของเหลวที่ปกคลุมอยู่ไม่สม่ำเสมอ อัตราการอบแห้งจึงลดลง และเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น ความชื้นจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงความชื้นสมดุล ซึ่งน้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก

2.3.3 ประเภทของการอบแห้งในอุตสาหกรรม

อุตสาหกรรมอาหารและการแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจและการพัฒนาคุณภาพชีวิตของสังคมไทยเป็นอย่างมาก การอบแห้งเป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญในการแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรให้ยาวนาน ซึ่งสามารถรองรับปัญหาผลผลิตทางการเกษตรล้นตลาดได้เป็นอย่างดี เทคโนโลยีการอบแห้งเป็นกระบวนการให้ความร้อนภายใต้สภาวะควบคุมกับวัสดุอาหารหรือผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่มีความชื้นสูง เพื่อลดปริมาณน้ำหรือความชื้นด้วยวิธีระเหยน้ำออกไป คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งขึ้นอยู่กับกลไกการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารในระหว่างกระบวนการอบแห้ง การวิจัยและพัฒนาเพื่อช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งจึงเป็นกุญแจสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพของสินค้าทางการเกษตรและอาหารอบแห้ง เพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่สามารถรักษากลิ่นรสและคุณค่าทางโภชนาการไว้ได้ใกล้เคียงสินค้าสดวิธีการอบแห้งส่วนใหญ่จะอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อน ทั้งการนำและการพาความร้อนด้วยตัวกลางทางความร้อนแบบต่างๆ เช่น การอบแห้งด้วยลมร้อนการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง การอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด การอบแห้งแบบอิมพิงจ์เมนท์ การอบแห้งแบบพ่นฝอย วิธีการอบแห้งแบบต่างๆ จะมีหลักการและกลไกการอบแห้งที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. วิธีการอบแห้งโดยลมร้อน (Hot Air Drying)

การอบแห้งด้วยลมร้อนนี้เป็นวิธีการอบแห้งที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากมีความสะดวกต่อการปฏิบัติและง่ายต่อการควบคุม ซึ่งหลักการของวิธีการอบแห้งด้วยวิธีนี้ จะอาศัยคุณสมบัติและความสามารถในการถ่ายเทมวลของอากาศร้อนที่ใช้เป็นตัวกลาง อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันในการดูดซึมความชื้นของอากาศและคุณสมบัติของอาหารอบแห้ง วิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนนี้ได้รับความนิยมมากในระดับอุตสาหกรรม เช่น เครื่องอบแห้งแบบถาดหรือตู้อบ (Hot Air Oven) เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ (Tunnel Drying) เครื่องอบแห้งระบบสายพาน (Belt or Conveyor Drying)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา 8 หน้านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิธีการอบแห้งฟลูอิดไคซ์ เบด (Fluidized Bed Drying)

การอบแห้งด้วยลมร้อนมีข้อจำกัดในด้านต่างๆ มากมาย เนื่องจากมีอัตราการถ่ายเทมวลในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่ช้า ส่งผลให้มีอัตราการอบแห้งที่ต่ำและมีการเสื่อมสลายของคุณภาพอาหารสูง จึงได้มีการพัฒนารูปแบบการอบแห้งเพื่อช่วยเร่งอัตราการระเหย วิธีการอบแห้งโดย วิธีการอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบด นิยมใช้กับการอบแห้งอาหารชนิดผง และธัญพืช เพราะมีน้ำหนักเบาและมีขนาดเล็ก รวมทั้งมีโครงสร้างเซลล์ที่แข็งแรงสามารถทนต่อแรงปะทะของลมร้อนได้ โดยไม่เกิดความเสียหายสำหรับกลไกการอบแห้งของวิธีการอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบด โดยการเป่ากระแสลมร้อนที่มีความเร็วสูง จากด้านใต้ของเครื่องอบแห้งจนชั้นอาหารลอยตัวอยู่ในกระแสลมร้อน ชั้นอาหารจะถูกปกคลุมในกระแสลมร้อน ทำให้ชั้นอาหารมีอัตราการอบแห้งที่รวดเร็วและสามารถควบคุมสถานะการอบแห้งและอุณหภูมิได้สม่ำเสมอ ปัจจุบันได้มีการพยายามพัฒนาการอบแห้งด้วยวิธี อบแห้งฟลูอิดไคซ์เบด โดยการลดอุณหภูมิแต่เพิ่มอัตราเร็วลม ซึ่งพบว่าสามารถช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งและยังช่วยลดการเสื่อมคุณภาพของอาหารได้ดีกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง แต่ความเร็วลมต่ำ

3. วิธีการอบแห้งด้วยวิธีอิมพิงจเมนต์ (Air Impingement Drying)

การอบแห้งด้วยวิธีอิมพิงเมนต์ เป็นนวัตกรรมล่าสุดของการพัฒนาการอบแห้งด้วยลมร้อน และสามารถใช้ได้กับอาหารหลากหลายประเภท โดยสามารถอธิบายหลักการการทำงานแบบง่าย ๆ ได้ดังนี้ การอบแห้งด้วยวิธีอิมพิงเมนต์ จะใช้หัวฉีดลมร้อนที่มีอัตราเร็วสูง พ่นไปที่ตัวอาหารในลักษณะรอบทิศทาง ส่งผลให้น้ำในอาหารเกิดการระเหยอย่างรวดเร็ว และถูกถ่ายเทออกจากอาหารโดยลมร้อน โดยวิธีการนี้สามารถใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่ต่ำ แต่มีอัตราการอบแห้งที่สูงได้ดี ทำให้อาหารอบแห้งมีคุณภาพสูง แต่เนื่องวิธีการอิมพิงเมนต์ ยังเป็นนวัตกรรมที่ใหม่มาก จึงไม่มีรายงานที่เด่นชัดมาว่าได้มีการนำวิธีการนี้มาใช้ในระดับอุตสาหกรรม

4. วิธีการอบแห้งด้วยการแช่แข็งแบบระเหิด (Freeze Drying)

วิธีการอบแห้งด้วยการแช่แข็งแบบระเหิด มีกลไกที่สำคัญอยู่สองกระบวนการโดยเริ่มจากการแช่เยือกแข็งอาหาร จนปริมาณน้ำนอกเซลล์ของอาหารเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง จากนั้นให้ความร้อนแก่อาหารภายใต้สภาวะแรงดันสุญญากาศ (Vacuum Pressure) ประมาณ 610.5 Pa เมื่ออาหารได้รับความร้อนภายใต้สภาวะดังกล่าว น้ำแข็งที่อยู่ในอาหารแช่เยือกแข็งก็จะเกิดการระเหิด หรือการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นไอ โดยที่ปริมาณน้ำแข็งในอาหารจะเกิดการระเหิดกลายเป็นไอน้ำออกมาและถูกดูดออกด้วยปั๊มสุญญากาศ ดังนั้นอาหารอบแห้งด้วยวิธีนี้จึงมีคุณภาพสูง สามารถลดความเสียหายของโครงสร้างและเกิดการหดตัวของโครงสร้างเซลล์น้อยมาก ลดอัตราการเสื่อมของสารประกอบกลิ่น รส และสีของอาหาร และมีรูปทรงที่เหมือนกับอาหารสด แต่ทั้งนี้การอบแห้งอาหารด้วยวิธีนี้ก็มีความค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าวิธีอื่นๆ หลายเท่า อีกทั้งยังมีข้อจำกัดในเรื่องของอัตราการผลิตที่ต่ำ วิธีการอบแห้งอาหารด้วยวิธีนี้จะนิยมใช้กับอาหารที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูง เช่น การผลิตยาและ เครื่องสำอาง

5. การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared Drying)

การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด เป็นการอบแห้งโดยใช้ประโยชน์จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อช่วยลดผลการกระทบของการถ่ายเทความร้อน โดยรังสีอินฟราเรดจะเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการระเหยที่ผิวเซลล์ และการเคลื่อนที่ของน้ำได้ผิวเซลล์ออกมาชั้นผิวนอกของเซลล์ ปัจจุบันนิยมใช้รังสีอินฟราเรดที่ระดับความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร ซึ่งจากรายงานวิจัยของ Kumar และคณะ ในปี 2006 และ Timoumi และคณะในปี 2007 ซึ่งได้ทำการศึกษาวิธีการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรด กับหัวหอมใหญ่ และ แอปเปิ้ลสไลด์ โดยผลวิจัยพบว่า การอบแห้งด้วยรังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา 94 นั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินฟราเรดสามารถช่วยลดอัตราการเสื่อมสลายของสารให้กลิ่นหอมได้ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน และใช้เวลาในการอบแห้งที่น้อยกว่า และเมื่อนำมาใช้ร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อน ก็สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งได้ดีขึ้นทั้งในด้านการผลิตคุณภาพของอาหารอบแห้ง นอกจากการอบแห้งแล้ว ปัจจุบันนิยมใช้การอบด้วยรังสีอินฟราเรด เพื่อช่วยเพิ่มสีและกลิ่นของอาหาร เช่นการอบคั่วเมล็ดกาแฟ

6. การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Drying)

การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ เป็นการอบแห้งด้วยการเหนี่ยวนำความร้อนจากภายในอาหารเอง โดยคลื่นไมโครเวฟจะเป็นตัวกระตุ้นทำให้โมเลกุลน้ำในอาหารเกิดการสั่นและหมุนด้วยความถี่สูง ส่งผลให้เกิดการเสียดสีและชนกันของโมเลกุลน้ำ และทำให้เกิดความร้อนที่อัตราสูง การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้งได้ดี เนื่องจากมีอัตราการอบแห้งที่สูง ผลผลิตภัณฑอาหารอบแห้งที่ได้จึงมีคุณภาพสูง งานวิจัยหลายชิ้นได้สนับสนุนข้อดีของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ เช่นงานวิจัยของ Yuanyuan Huang และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบการอบแห้งใบชาเขียวด้วยเครื่องอบแห้งแบบไมโครเวฟกับเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อน โดยการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟจะมีอัตราการอบแห้งที่รวดเร็วกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนหลายเท่า และยังให้ใบชาเขียวที่มีคุณภาพดีกว่า โดยสามารถรักษาวิตามินซีและคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสได้ดี เช่นเดียวกับผลงานวิจัยของ Ozkan และคณะ (2007), Iraz และคณะ (2005) และ Sharma และ Prasad (2001) ที่ให้การยอมรับถึงประสิทธิภาพการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ทั้งในด้านของการลดเวลาในการอบแห้ง การลดการเสื่อมคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้ง การลดอัตราการปนเปื้อนในกระบวนการอบแห้ง สำหรับตัวอย่างอาหารอบแห้ง ได้แก่ แอปปริคอต (Apricot), ผักโขม (Spinach), มักรกะโรนี (Macaroni Beads) และกระเทียม (Garlic Cloves) ตามลำดับ

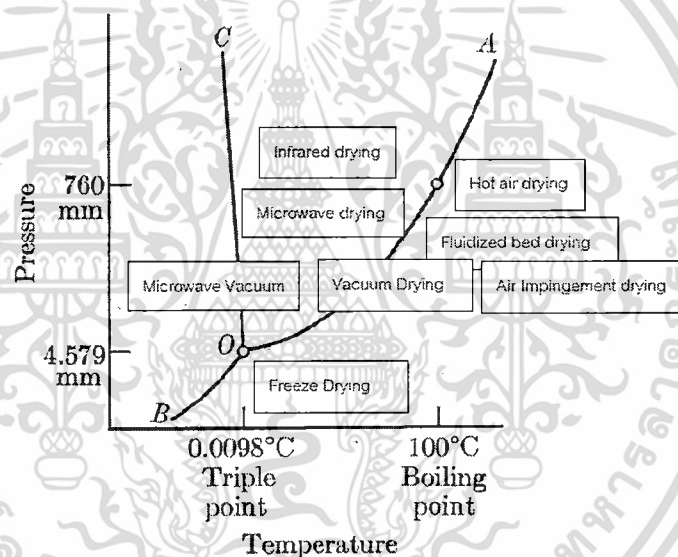
7. การอบแห้งด้วยระบบสุญญากาศ (Vacuum Drying)

ธรรมชาติของน้ำจะระเหยกลายเป็นไอ ก็ต่อเมื่อได้รับความร้อนจนถึงจุดเดือดของน้ำ โดยน้ำจะเริ่มระเหยกลายเป็นไอที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสภายใต้ความดันไอ 1 บรรยากาศ การอบแห้งทั่วไปจึงมักจะใช้อุณหภูมิสูงเพื่อช่วยเร่งอัตราการระเหยของอาหารอบแห้ง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพอาหารอย่างมาก เนื่องจากสารอาหารจะเสื่อมสลายได้ง่ายเมื่อโดนความร้อนสูง เพื่อพัฒนากระบวนการอบแห้งและสามารถรักษาคุณภาพของอาหารได้ดีขึ้นนั้น จึงได้มีการนำระบบสุญญากาศเข้ามาใช้ เพื่อช่วยลดจุดเดือดของน้ำในอาหาร ซึ่งการเพิ่มประสิทธิภาพของการอบแห้งอาหาร โดยความสัมพันธ์ของความดันไอและจุดเดือดของน้ำ สามารถอธิบายได้ตามหลักการของเฟสไดอะแกรม ดังนั้นผลของการลดความดันไอในระบบการอบแห้ง จะช่วยลดจุดเดือดของอาหารทำให้อัตราการระเหยของอาหารสูงขึ้น โดยอัตราการอบแห้งจะแปรผันตรงกับอัตราการลดของความดันไอและการเพิ่มของอุณหภูมิในการอบแห้ง การอบแห้งด้วยระบบสุญญากาศจึงนิยมใช้ในกระบวนการอบแห้งที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากภายใต้สภาวะสุญญากาศอาหารจะมีจุดเดือดที่ต่ำและมีอัตราการถ่ายเทมวลที่สูง ทำให้อาหารที่อบแห้งด้วยวิธีนี้มีคุณภาพสูง ทั้งในด้านลักษณะ สัมผัส สี กลิ่น รส และสารอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการ

8. การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Microwave Vacuum Drying)

การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Microwave Vacuum Dehydration) นับเป็นการพัฒนานวัตกรรมการอบแห้งที่มีความสมบูรณ์แบบมากที่สุด ทั้งในด้านวิศวกรรมการผลิตและด้านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา-10- นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการลดการเสื่อมคุณภาพ เนื่องจากการอบแห้งภายใต้ระบบสุญญากาศจะช่วยลดอุณหภูมิในการระเหยของน้ำในอาหาร จึงสามารถช่วยลดการเสื่อมคุณภาพของอาหารอบแห้งได้ดี และเมื่อนำมาผสมผสานกับการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ จะช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างกระบวนการอบแห้ง จึงเป็นการพัฒนาศักยภาพในกระบวนการอบแห้งได้อย่างดีเยี่ยม โดยปัจจุบันเริ่มมีการนำการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศมาใช้ในระดับอุตสาหกรรมเพื่อพัฒนามาตรฐานคุณภาพสินค้าทางการเกษตรและผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้ง ทั้งในแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch) และแบบต่อเนื่อง (Continuous) โดยเฉพาะการนำมาใช้อบแห้งพืชสมุนไพรเพื่อช่วยเพิ่มมูลค่าของสินค้าเช่น การอบแห้งขมิ้นชันและเห็ดหลินจือ เพื่อช่วยลดอัตราการเสื่อมสลายของสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidat) การอบแห้งพริกแดงเพื่อช่วยรักษาสีแดงและสารให้ความเผ็ด (Capsaicin Content) การอบแห้งสับปะรดเพื่อช่วยลดการเสื่อมสลายของสารแคโรทีนอยด์ (Carotenoids Content) ซึ่งเป็นรงควัตถุสีเหลืองที่สำคัญในสับปะรด และช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล นอกจากนี้การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศจะมีข้อได้เปรียบในเรื่องของการประหยัดพลังงานและ ค่าใช้จ่ายในการกระบวนการอบแห้งอีกด้วย



รูปที่ 2.4 แสดงเฟสไดอะแกรมของน้ำและวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ
ที่มา : www.foodfocusthailand.com

เฟสไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิซึ่งจุดรวมสามเป็นจุดที่แยกสถานะของน้ำออกเป็น 3 สถานะ (แสดงในภาพที่ 2.4) ซึ่งประกอบไปด้วย ของแข็ง ของเหลวและไอ โดยให้เส้น OA อยู่ระหว่างของเหลวและไอ เส้น OC จะอยู่ระหว่างของแข็งและของเหลว เส้น OB อยู่ระหว่างของแข็งและไอ ภาพดังกล่าวแสดงความสามารถในการลดความชื้นของเครื่องอบแห้งแต่ละชนิด ในช่วงความดันและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

2.4 การเกิดความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด

เทคนิคในการเตรียมอาหารที่เกี่ยวข้องกับอินฟราเรด (infrared) ที่ให้อุณหภูมิสูงเป็นการแปรรูปที่มีแนวโน้มที่จะเป็นที่ต้องการของผู้บริโภคในอนาคต เนื่องจากเตรียมง่ายแต่มีกลิ่นรสและรสชาติดี

รังสีอินฟราเรดจะปล่อยออกจากวัตถุที่ทำให้ร้อน โดยที่ความยาวคลื่นของการแผ่รังสีขึ้นกับอุณหภูมิของวัตถุที่ปล่อยความร้อนออกมา อาหารร้อนขึ้นเนื่องจากการดูดซับรังสีอินฟราเรดและเปลี่ยนไปเป็นความร้อนทำให้อุณหภูมิของสารเพิ่มขึ้น รังสีอินฟราเรดใช้ลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ใช้สำหรับแยกเปลือก และทำลายเอ็นไซม์ในเมล็ดถั่วต่างๆ

หลักการของอินฟราเรดในอาหาร

แถบสเปกตรัมของแม่เหล็กไฟฟ้าภายในความยาวคลื่นของอินฟราเรด ที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปอาหารที่ปล่อยออกมาแบ่งได้เป็น 3 ส่วนคือ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000°C จะให้รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น (0.7 μm – 2 μm) ขณะที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้ จะให้รังสีอินฟราเรดคลื่นกลาง (2 μm – 4 μm) และคลื่นยาว (4 μm – 1 μm) (ภาพที่ 2.5) รังสีอินฟราเรดคลื่นยาวจะเกิดขึ้นตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงประมาณ 400°C รังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นสั้นไม่สามารถแทรกซึมเข้าสู่อาหารได้มาก จึงเหมาะสำหรับกระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นอาหารก่อน อาหารสามารถผ่านขั้นตอนการทำให้สุกเบื้องต้น เช่น การทำให้เกิดสีน้ำตาล เป็นต้น ซึ่งทำให้ผิวหน้าของอาหารปิดก่อนที่จะเสร็จสิ้นกระบวนการทำให้สุกในชั้นผลิตภัณฑ์อาหาร

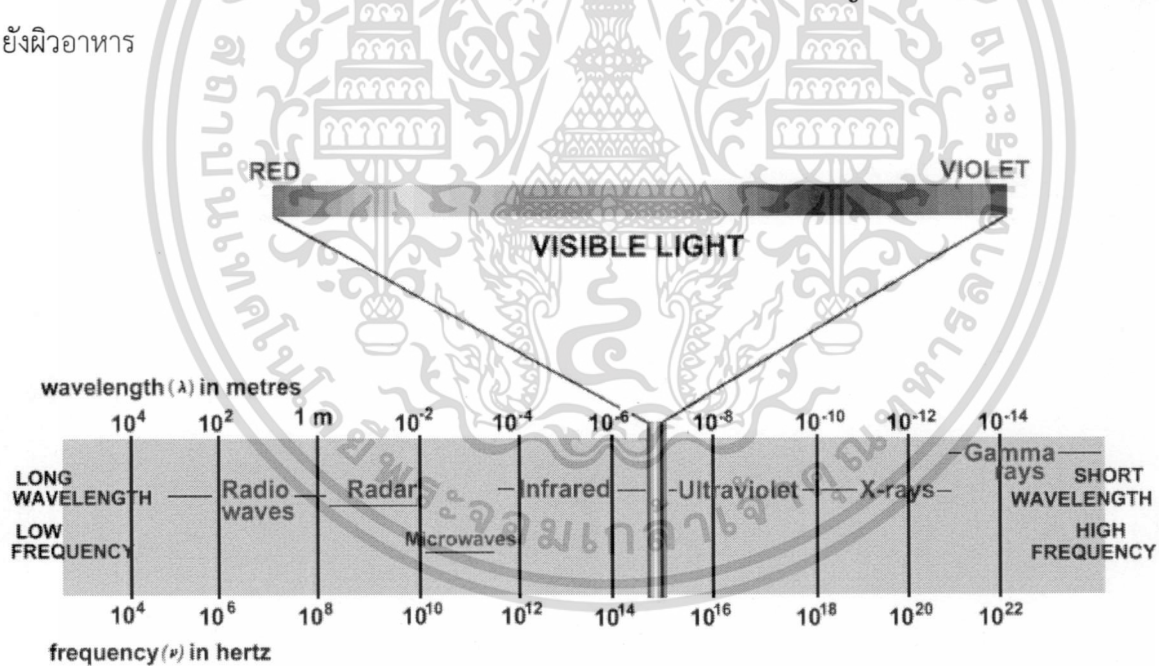
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางความร้อนของอาหารบางชนิด

อาหาร	ความร้อนจำเพาะ (kJ/kg °C)	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m °C)
เนื้อ		
เนื้อไม่มีมัน	3.06-3.43	0.36-0.61
ไขมัน	2.59-2.89	0.20-0.26
ผัก		
ผักสด	3.77-4.10	0.30-0.42
ผักอบแห้ง	1.84	0.21
ผลไม้		
ผลไม้สด	3.73-4.10	0.40-0.55
ผลไม้อบแห้ง	2.14-2.47	0.3-0.4
นม		
นมอุดมด้วยมันเนย (whole)	3.85	0.54
นมพร่องมันเนย (skimmed)	3.98	0.57
ครีม	3.14	0.57
อื่นๆ		
ขนมปัง	2.85	0.35-0.45
ไข่ดาว	3.85	0.45-0.50
ไข่แดง	2.81	0.33-0.97

ที่มา : King (1989)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา-12- นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวคิดพื้นฐานของการแผ่รังสีอินฟราเรดคือ ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่สูง การแทรกซึมความร้อนโดยตรงเข้าสู่อาหาร การควบคุมกระบวนการเร็ว และไม่มีทำให้ความร้อนแก่อากาศที่อยู่รอบๆ คุณภาพเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่า รังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งพลังงานอุดมคติสำหรับการให้ความร้อน ตัวให้รังสีอินฟราเรดคือ เรดิเอเตอร์ (radiator) ซึ่งมีหลายชนิดและมีรูปร่างต่างๆกัน เช่น gas heated radiators (ให้รังสีคลื่นยาว) และ electrically heated radiators (อาจเป็น ceramic heater) ที่ให้รังสีคลื่นยาว หรือ quartz tube heaters (ให้รังสีคลื่นสั้นและปานกลาง) เมื่อคลื่นอินฟราเรดกระทบกับวัตถุ ก็จะสะท้อน (R) หรือส่งผ่าน (T) หรือดูดซับ (A) เมื่อรังสีถูกดูดซับก็จะเปลี่ยนไปเป็นความร้อนและอุณหภูมิของวัตถุก็เพิ่มขึ้น โดยที่ความลึกของการทะลุทะลวงมีความสำคัญสำหรับการให้ความร้อนแก่อาหาร อัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นกับอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุที่ให้และรับความร้อน คุณสมบัติที่ผิวของวัตถุทั้งสอง และรูปร่างของวัตถุที่ปล่อยและรับ อาหารเป็นสารที่ไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน สมบัติการดูดซับอินฟราเรดของอาหารจึงอธิบายได้ไม่ง่าย สมบัติการแทรกซึม (penetration properties) มีความสำคัญเช่นกัน ความลึกของการแทรกซึมนิยามว่าเป็น 37% ของพลังงานรังสีที่ไม่ได้ดูดซับไว้ สำหรับคลื่นสั้น ความสามารถในการแทรกซึมของคลื่นเป็น 10 เท่าของคลื่นยาว ความสามารถในการแทรกซึมโดยตรงของรังสีอินฟราเรดทำให้ค่าฟลักซ์ของพลังงานเพิ่มขึ้นโดยไม่ทำให้ผิวหนังอาหารไหม้ และช่วยลดเวลาในการให้ความร้อนที่กระบวนการให้ความร้อนทั่วไปต้องใช้ ความยาวคลื่นสั้นจึงเป็นสิ่งที่สนใจที่สุดเนื่องจากสามารถผ่านเข้าไปในอาหารได้ดีกว่า ส่วนรังสีคลื่นยาวมีความสำคัญในแง่ปริมาณให้พลังงานที่ถ่ายเทไปยังผิวหนังอาหาร



ภาพที่ 2.5 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา : <http://www.atom.rmutphysics.com>

2.5 วิธีการหาความชื้น

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณน้ำ ที่มีอยู่ในผลผลิตเมื่อเทียบกับมวลของผลผลิต ซึ่งโดยทั่วไปจะ บอกได้ 2 แบบด้วยกันคือ เมื่อเทียบกับมวลของผลผลิตขึ้นก็จะเรียกว่า ความชื้นในฐานเปียก เป็น ความชื้นที่นิยมบอกในทางการค้าหรือการซื้อขายผลผลิตทางการเกษตรของเกษตรกร และเมื่อเทียบกับ มวลของผลผลิตแห้งก็จะเรียกว่า ความชื้นในฐานแห้ง ซึ่งเป็นความชื้นที่นิยมใช้ในเอกสารวิชาการ เนื่องจากว่าน้ำ หนักแห้งจะมีค่าคงที่เสมอไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการอบแห้ง ดังนั้นจึงง่ายในการ อ้างอิง ซึ่งความชื้นทั้งสองมาตรฐานนี้สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

ความชื้นฐานเปียก (wet basis)

$$MC_{wb} = \frac{\text{mass of water}}{\text{mass of sample}} \quad (\text{Eq 2.5})$$

ความชื้นฐานแห้ง (dry basis)

$$MC_{db} = \frac{\text{mass of water}}{\text{mass of dry solids}} \quad (\text{Eq 2.6})$$

เมื่อ MC_{wb} คือ ความชื้นฐานเปียก

MC_{db} คือ ความชื้นฐานแห้ง

หรือ

$$MC = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100 \quad (\text{Eq 2.7})$$

เมื่อ MC = ความชื้น (เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง)

W_1 = น้ำหนักของตัวอย่างก่อนอบแห้ง (กิโลกรัม)

W_2 = น้ำหนักของตัวอย่างหลังอบแห้ง (กิโลกรัม)

สำหรับหน่วยของความชื้นนั้นโดยทั่วไปทางการค้านิยมบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถเปลี่ยนได้โดยการคูณด้วย 100 และตัวย่อด้านท้าย เปอร์เซ็นต์ d.b. หมายถึงฐานแห้ง และ เปอร์เซ็นต์ w.b. หมายถึงฐานเปียก

บางครั้งมีความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนความชื้นจากฐานหนึ่งสู่อีกมาตรฐานหนึ่ง ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้สมการซึ่งได้จากการแก้สมการสองสมการข้างต้น

$$MC_{wb} = \frac{MC_{db}}{MC_{db} + 1} \quad (\text{Eq 2.8})$$

$$MC_{db} = \frac{MC_{wb}}{1 - MC_{db}} \quad (\text{Eq 2.9})$$

ในการหาน้ำหนักของผลผลิตสุดท้ายเมื่อทราบความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้าย ในกรณีที่ทราบน้ำหนักเริ่มต้นของผลผลิตที่ต้องการอบแห้งสามารถหาน้ำหนักผลผลิตสุดท้ายได้จากสมการ

$$W_w = \frac{(M_i - M_f)W_i}{(100 - M_f)} \quad (\text{Eq 2.10})$$

เมื่อ M_f คือ ความชื้นสุดท้าย (ฐานเปียก)

W_i คือ น้ำหนักผลผลิตเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)

W_w คือ น้ำหนักน้ำที่ต้องการเอาออกจากผลผลิต (กรัม)

M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น (ฐานเปียก)

W_f คือ น้ำหนักผลผลิตสุดท้ายหลังอบ (กรัม)

กรณีใช้น้ำหนักผลิตภัณฑ์แห้งที่ต้องการเป็นฐาน สมการที่ใช้ในการคำนวณ ได้แก่

$$W_w = \frac{(M_i - M_f)W_f}{(100 - M_i)} \quad (\text{Eq 2.11})$$

อัตราส่วนความชื้น

$$MR = \frac{M - M_e}{M_i - M_e} \quad (\text{Eq 2.12})$$

เมื่อ M คือ ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ ณ เวลาใดๆ

M_e คือ ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์

M_i คือ ค่าความชื้นเริ่มต้น

MR คือ อัตราส่วนความชื้น

ความชื้นสมดุลเปอร์เซ็นต์ (ฐานเปียก)

$$M_e = \frac{W_1 - W_2}{W_f} \quad (\text{Eq 2.13})$$

เมื่อ W_1 = น้ำหนักของตัวอย่างก่อนอบแห้ง (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของตัวอย่างหลังอบแห้งจนไม่เหลือความชื้น (กรัม)

W_f = น้ำหนักสุดท้ายของตัวอย่างอบแห้ง (กรัม)

2.6 การศึกษาจลนพลศาสตร์และหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.6.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

สุนทรและฤทธิชัย (2554) [14] ได้อธิบายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการออกแบบวิธีการอบแห้งให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีความเกี่ยวข้อง ทั้งในด้านวิธีการอบแห้ง แหล่งพลังงานที่ใช้ ผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการทดลองเพื่อหาค่าสภาวะการอบแห้ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบระบบ การอบแห้งแบบต่างๆ เนื่องจากสามารถบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลสารและความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ตลอดจนการหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมของกระบวนการอบแห้งแบบต่างๆ ได้ดี ปัจจุบันแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งจะถูกนำไปใช้ในการจำลองสภาวะการอบแห้งและการศึกษาผลกระทบของปัจจัยด้านต่างๆ ในกระบวนการอบแห้ง ตลอดจนการทดสอบและเปรียบเทียบเงื่อนไขการอบแห้งแบบต่างๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งแทนการทดลองจริง ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง ซึ่งมีความสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดสอบเงื่อนไขในการอบแห้ง

จากการสำรวจเอกสารของรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งด้วยระบบการอบแห้งด้วยอินฟราเรดที่นิยมใช้ในการศึกษา สำหรับการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร มักจะเลือกใช้แบบจำลองสมการกึ่งทฤษฎี (Semi – Theoretical Model) อาทิเช่นแบบจำลองของ Newton, Page, Henderson and Pabis, และ Logarithmic ซึ่งรูปแบบความสัมพันธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงในตารางที่ 2.2 และสมการกึ่งทฤษฎี

ตารางที่ 2.2 รูปแบบสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง แบบต่าง ๆ

ชื่อแบบจำลอง	รูปแบบสมการ	เอกสารอ้างอิง
Newton	$MR = \exp(-kt)$	Kaleemullah and Kailappan (2005) [15], Waewsak, Chindaruksa and Punlek (2006)[16], Dadali, Apar and Özbek (2007) [17]
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	McMinn, (2006) [18], Kingly and Singh (2007) [19], Vega, Fito, Andrés and Lemus (2007) [20], Assawarachan <i>et al.</i> , (2013) [21]
Henderson and Pabis	$MR = a * \exp(-kt)$	Kingly and Singh (2007)[19], Vega, Fito, Andrés and Lemus (2007)[20], Assawarachan <i>et al.</i> , (2013) [21]
Logarithmic	$MR = a * \exp(-kt) + c$	McMinn, (2006)[18], Wu and Hu (2007)[22], Evin (2012), Assawarachan <i>et al.</i> , (2013)[21]

หมายเหตุ เมื่อ k, n, a, b คือค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 (D_{eff}) t}{4L^2}\right) \quad (\text{Eq 2.14})$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (เมตร²/วินาที)

L คือ ความหนาของตัวอย่าง (เมตร)

T คือ เวลาในการอบแห้ง (วินาที)

สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจากค่าความชื้นของกราฟเส้นตรง

ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ และเวลาในการอบแห้ง (t) ดังแสดงในสมการที่ 2.15

$$\text{Slope} = \frac{\pi^2 \cdot D_{eff}}{4L^2} \quad (\text{Eq 2.15})$$

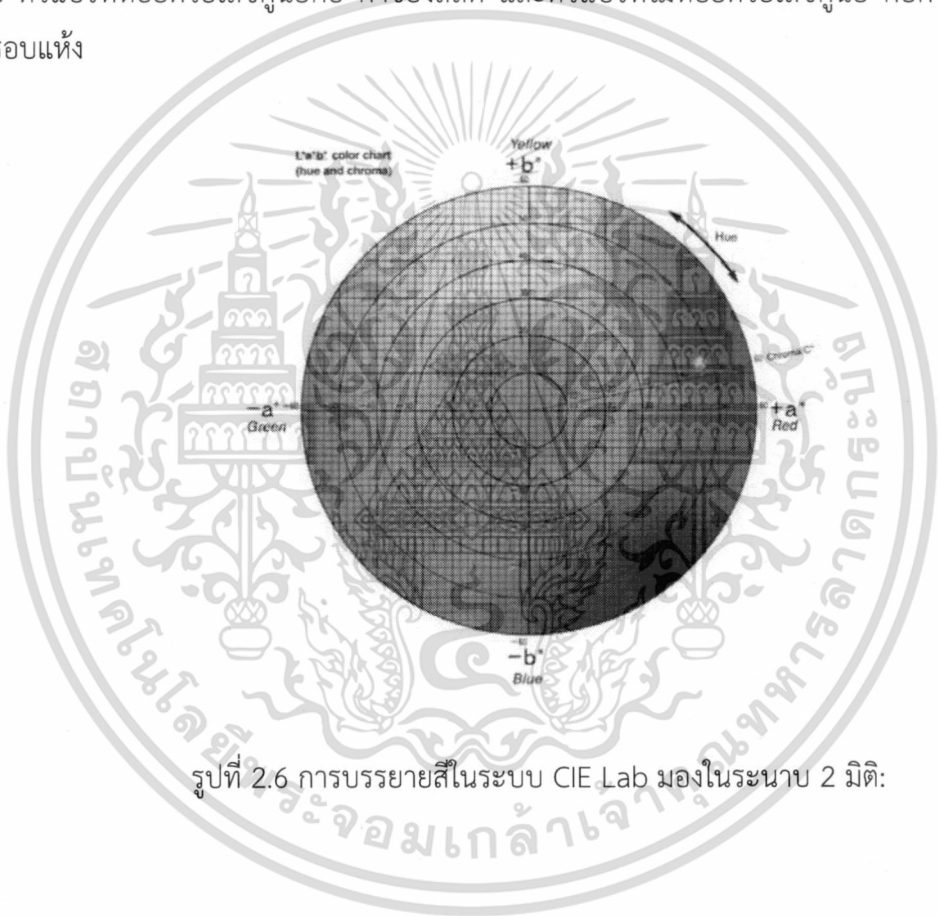
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของตาผู้บรรยาย ลักษณะแสงที่ตกกระทบ เป็นต้น ดังนั้นการวัดและการบรรยายสีในเชิงวิชาการจึงต้องมีการจัดมาตรฐานเพื่อเป็นการลดความไม่เป็นกลาง (Bias) ของผู้บรรยายสีของวัสดุนั้น

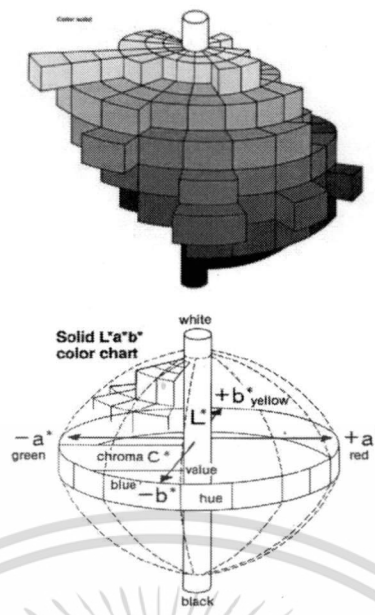
ในงานวิจัยนี้ใช้การวัดค่าสีในระบบ $L^*a^*b^*$ ซึ่งเป็นระบบบรรยายสีแบบ 3 มิติ โดยที่แกน L^* จะบรรยายถึงความสว่าง (lightness) จากค่า $+L^*$ แสดงถึงสีขาว จนไปถึง $-L^*$ แสดงถึงสีดำ แกน a^* จะบรรยายถึงแกนสีจากเขียว ($-a^*$) ไปจนถึงสีแดง ($+a^*$) ส่วนแกน b^* จะบรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน ($-b^*$) ไปเหลือง ($+b^*$) ลักษณะการบรรยายสีของ CIE (ภาพที่ 2.4) และวิเคราะห์ค่าความแตกต่างสีโดยรวม (Total Color Difference : TCD หรือ ΔE) จากสมการ (Eq 2.19)

$$\Delta E = \sqrt{(L_r - L_0)^2 + (a_r - a_0)^2 + (b_r - b_0)^2} \quad (\text{Eq 2.19})$$

เมื่อ ตัวแปรที่ห้อยด้วยเลขศูนย์คือ ค่าของสีสด และตัวแปรที่ไม่ห้อยด้วยเลขศูนย์ คือค่าที่ได้จากการวัดค่าสีหลังการอบแห้ง

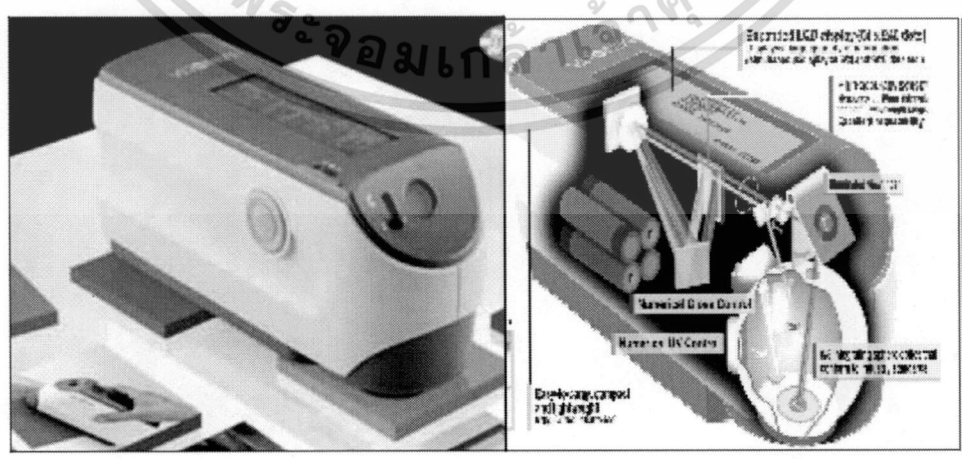


รูปที่ 2.6 การบรรยายสีในระบบ CIE Lab มองในระนาบ 2 มิติ:



รูปที่ 2.7 การบรรยายสีพื้นในระบบ CIE Lab ในรูป 3 มิติ

อุปกรณ์วัดสีที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ spectrophotometer อุปกรณ์ดังกล่าวจะใช้แสงจากแหล่งประดิษฐ์ (illuminant) คือแสงที่แต่งค่าความเข้มแสง (intensity) หรืออุณหภูมิของสี (color temperature) แล้ว ตัวอย่างของแหล่งแสงประดิษฐ์ได้แก่ D65 - แสงเที่ยงวัน (noon daylight) A- แสงส้มจากหลอดทั้งสแตน C - แสงกลางวันเฉลี่ย (average daylight) CWF - แสงขาวเย็นจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ (cooled white fluorescent) อุปกรณ์วัดสี spectrophotometer ในท้องตลาดมีหลายรุ่นและหลายยี่ห้อ ที่นิยมใช้ได้แก่ ของ Hunter lab, Nikon และ Minolta (ภาพที่ 2.7) ซึ่ง spectrophotometer บางรุ่นสามารถบอกค่าสีได้หลายสเกลในเครื่องเดียว เช่น XYZ, Lab, $L^*a^*b^*$, CMYK (CrayonMagenta-Yellow-Black) ซึ่งเป็นระบบสีนิยมใช้ในเกี่ยวกับสิ่งพิมพ์



รูปที่ 2.8 Spectrophotometer แบบพกพาของ Minolta รุ่น 2600d

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา 2016 นั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 หลักการของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

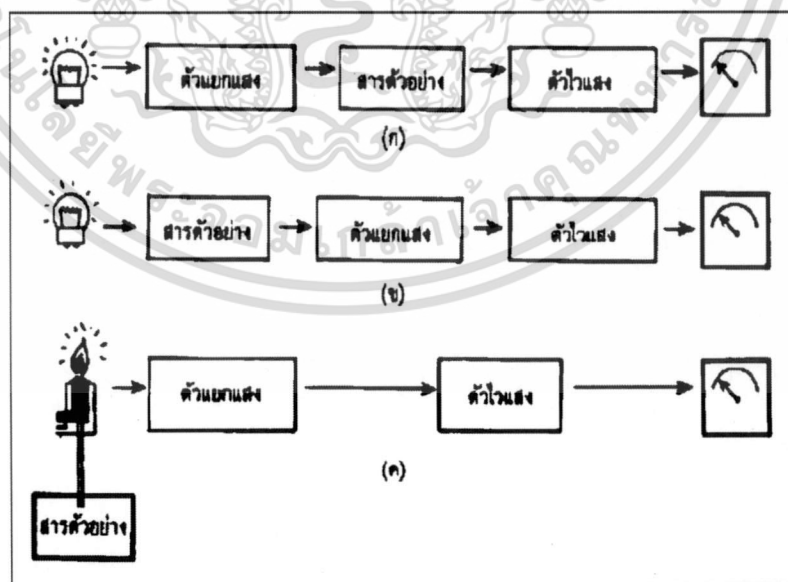
การหาปริมาณสารใดสารหนึ่งโดยวิธีการทางห้องปฏิบัติการมีอยู่หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้มากคือการวัดความเข้มของสี (colorimetry) หรือการวัดความเข้มของแสง โดยการเปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐาน (standard solution) ที่ทราบค่า ในระยะแรก ๆ การเปรียบเทียบความเข้มของสีอาศัยสายตา (visual colorimetry) ซึ่งมีความถูกต้องและแม่นยำต่ำ ต่อมาได้มีการนำตัวไวแสง (photo sensor) มาใช้แทนการเปรียบเทียบด้วยสายตา จึงเรียกเครื่องมือที่ใช้ตัวไวแสงว่า “photoelectric colorimeter” หรือ “photometer” เนื่องจากสารหรือสีที่จะวัดมีความสามารถในการดูดกลืนแสง หรือ ปล่อยแสงที่มีช่วงความยาวคลื่น (spectrum) ที่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อให้การวัดมีความจำเพาะ (specificity) และความไว (sensitivity) สูง จึงได้พัฒนาเครื่องมือที่สามารถวัดความเข้มของแสงช่วงความยาวคลื่นแคบ ๆ ได้อย่างต่อเนื่องตามต้องการ และใช้ตัวไวแสงที่มีประสิทธิภาพสูง เครื่องมือดังกล่าวถูกเรียกว่า “สเปกโตรโฟโตมิเตอร์” (spectrophotometer) ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาไปมากมีทั้งแบบอะนาล็อก แบบดิจิตอล รวมทั้งแบบดิจิตอลที่ทำงานโดยอัตโนมัติที่มีระบบไมโครโพรเซสเซอร์ควบคุมการทำงาน (รูปที่ 2.9)

เครื่องวัดความเข้มของแสง (spectrophotometer) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่คือ การวัดแสงที่เปล่งออกมา (emission light) การวัดแสงที่ถูกดูดกลืน (absorption light) และการวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescence light) ที่เปล่งออกมา

เครื่องวัดการดูดกลืนแสงและเครื่องวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์ มีองค์ประกอบที่คล้ายกันแต่ ตำแหน่งการวางอุปกรณ์ต่างกัน กล่าวคือ เครื่องวัดการดูดกลืนแสงมีหลอดไฟกำเนิดแสง (light source) ส่งแสงผ่านไปยังตัวแยกแสง (monochromator) ผ่านสารตัวอย่าง (sample) ผ่านตัวไวแสง (photo sensor) แล้วจึงอ่านค่าออกมา ส่วนเครื่องวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์ หลอดไฟกำเนิดแสงจะส่งแสงผ่านสารตัวอย่างเพื่อทำให้เกิดแสงฟลูออเรสเซนซ์ แล้วให้แสงฟลูออเรสเซนซ์ที่เกิดขึ้นส่องผ่านไปสู่อุปกรณ์แยกแสงและอุปกรณ์อื่นๆ ตามลำดับ ส่วนเครื่องวัดการเปล่งแสงโดยเปลวไฟมีอุปกรณ์ต่างๆ เหมือนกับเครื่องวัดการดูดกลืนแสงแต่ต่างกันตรงที่ไม่มีหลอดไฟกำเนิดแสง (ภาพที่ 2.10) ในบทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะเครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่ใช้กันทั่ว ๆ ไปในห้องปฏิบัติการ ส่วนเครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม และเครื่องวัดความเข้มของแสงชนิดอื่น ๆ จะกล่าวถึงในบทต่อไป



ภาพที่ 2.9 รูปร่างของเครื่องวัดการดูดกลืนแสง แบบอะนาล็อก (ก) แบบดิจิทัลชนิดตั้งโต๊ะ (ข, ง, จ, ฉ, ช) และแบบดิจิทัลชนิดมือถือ (ค)
ที่มา: <http://home.kku.ac.th>



ภาพที่ 2.10 องค์ประกอบหลักของเครื่องวัดความเข้มของแสงโดยการวัดการดูดกลืนแสง (ก) วัดแสงฟลูออเรสเซนซ์ (ข) และวัดการเปล่งแสงโดยเปลวไฟ (ค)
ที่มา: <http://home.kku.ac.th>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา 22 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative analysis)

การวัดค่าการดูดกลืนแสงเพื่อนำค่ามาคำนวณหาปริมาณสารนิยมวัดอยู่ 2 วิธี คือ

1.) การวัดค่าการดูดกลืนแสงสมบูรณ์ (absolute absorbance) เป็นการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารเมื่อเทียบกับอากาศ หรือน้ำกลั่นในควิเวทท์ ที่มีควมกว้าง 1 เซนติเมตร หลังจากนั้นหารค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ด้วย E จะได้ค่าความเข้มข้นของสาร ($A = Ect$)

การวิเคราะห์โดยวิธีนี้ถือว่าค่า E มีค่าคงที่ แต่ในทางปฏิบัติค่า E มักจะแตกต่างกันไปจากที่กำหนดไว้เป็นค่ามาตรฐาน เพราะค่า E ขึ้นอยู่กับคุณภาพของเครื่องวัดการดูดกลืนแสง ตัวอย่างเช่น ความถูกต้องของการวัดความเข้มของแสง (photometric accuracy) แสงรบกวนจากเครื่องมือ ฯลฯ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับคุณภาพของควิเวทท์ที่ใช้ด้วย เพื่อให้การวิเคราะห์หาปริมาณสารมีความถูกต้องมากที่สุดจึงควรหาค่า E สำหรับเครื่องวัดการดูดกลืนแสงนั้น ๆ โดยวัดจากสารมาตรฐานที่บริสุทธิ์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ

2.) การวัดค่าการดูดกลืนแสงสัมพัทธ์ (relative absorbance) เป็นการวัดค่าการดูดกลืนแสงเปรียบเทียบกับระหว่างสารละลายมาตรฐานที่ทราบค่า (standard solution) กับสารละลายที่ต้องการหาปริมาณ วิธีนี้นิยมใช้มากเนื่องจากลดความผิดพลาดจากความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดการดูดกลืนแสง คุณภาพควิเวทท์ ตลอดจนเทคนิคที่ใช้ได้ เพราะใช้เทคนิค อุปกรณ์และเครื่องมืออันเดียวกันการวัดค่าการดูดกลืนแสงอาจแบ่งตามปฏิกิริยาเคมีได้ 2 แบบคือ

- แบบปฏิกิริยาสมดุล (equilibrium reaction) เป็นการวัดค่าการดูดกลืนแสงเมื่อปฏิกิริยาเคมีสมดุล หรือถึงจุดหยุดปฏิกิริยา สารละลายจะดูดกลืนแสงคงที่ที่จุดนี้ แต่ปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะใช้เวลาในการเกิดสมดุล

- แบบปฏิกิริยาจลน์ (kinetic reaction) เป็นการวัดค่าการดูดกลืนแสงในขณะที่ปฏิกิริยายังไม่หยุดนิ่ง ค่าการดูดกลืนแสงมีการเปลี่ยนแปลงได้ในลักษณะที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง คำนวณหาปริมาณสารได้จากค่าการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงต่อหน่วยเวลา แต่เนื่องจากช่วงเวลา มักจะเป็นช่วงสั้น ๆ เป็นวินาที การวัดแบบนี้จึงควรใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่มีระบบวัดค่าการดูดกลืนแสงต่อหน่วยเวลาแบบอัตโนมัติ

โดยทั่วไปจะวัดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเดียว แต่ในระยะหลัง นิยมวัดหลายความยาวคลื่น (multi wavelength measurement) เพื่อลดการรบกวนจากสารอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการวัดตัวอย่างเช่น ระบบการวัด 2 ความยาวคลื่น (bichromatic measurement system) ใช้ความยาวคลื่นอันแรกสำหรับวัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารที่ต้องการวิเคราะห์ และใช้ความยาวคลื่นอันที่สอง สำหรับวัดการดูดกลืนแสงของสารรบกวนที่ปนอยู่ในสารตัวอย่างที่ทำกรวิเคราะห์ หลังจากนั้นจึง นำค่าการดูดกลืนแสงของสารรบกวนมาลบออกจากค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่าง ซึ่งจะทำให้ได้ค่าการดูดกลืนแสงเฉพาะที่เกิดจากสารที่ต้องการวิเคราะห์ หรือในระบบการวัด 3 ความยาวคลื่น (trichromatic measurement system) จะเพิ่มความยาวคลื่นอันที่ 3 มาวัดค่าการดูดกลืนแสงของสาร รบกวนตัวที่ 2 หลังจากนั้นจึงหาค่าเฉลี่ยของค่าการดูดกลืนแสงของความยาวคลื่นอันที่ 2 และ อันที่ 3 ก่อนนำไปลบออกจากค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่าง ฯลฯ

UV-VIS Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า intensity ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้

คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่าเมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้

2.8.2 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

1.) แหล่งกำเนิดแสง

แหล่งกำเนิดแสงในเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์จะต้องให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการอย่างต่อเนื่อง และคงที่ตลอดเวลา รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอด้วยหลอดกำเนิดแสงมีหลายชนิดตามความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมา ซึ่งต้องเลือกใช้ให้ถูกต้องเหมาะสมกับของเหลวที่นำมาวัดค่าดูดกลืนแสง

ตัวอย่างแหล่งกำเนิดแสง ช่วง UV ใช้หลอด H₂ and D₂ lamp ให้ความยาวคลื่นอยู่ในย่าน 160-380 nm ชนิดของสเปกโทรสโกปี UV molecular absorption และช่วง visible ใช้หลอด Tungsten/halogen ให้ความยาวคลื่นในช่วง 240-2,500 nm ชนิดของสเปกโทรสโกปีเป็นแบบ UV/visible/near-IR molecular absorption

2.) Monochromator

ส่วนประกอบนี้เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิโครเมติก ให้เป็นแสงโมโนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียว ใช้ฟิลเตอร์(กระจกสี) ปริซึม (prism) หรือ เกรตติง (grating)

3.) เซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่าง

เซลล์ที่ใส่สารตัวอย่าง (cell sample) บางครั้งอาจเรียกว่า คิวเวทท์ (cuvettes) รูปแบบที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่เซลล์ที่ทำด้วยแก้วธรรมดา จะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิล เพราะเนื้อแก้วธรรมดาดูดกลืนแสงในช่วงยูวีได้ และเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา และควอร์ตซ์ (quartz) ใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิล

4.) Detector

ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้าเครื่องตรวจจับสัญญาณที่ดีต้องมีสภาพไวสูง คือแม้ปริมาณแสงจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย ก็สามารถตรวจจับสัญญาณความแตกต่างได้ เครื่องวัดแสงที่ยังนิยมกันอยู่ในปัจจุบัน คือ หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube, PMT) และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด (silicon diode detector)

2.9 การตรวจวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ขมิ้นชัน

ขมิ้นชันเป็นพืชสมุนไพรชนิดหนึ่งที่อยู่ในตำรามาตรฐานยาสมุนไพรไทย ซึ่งได้จัดทำขึ้นเพื่อส่งเสริมศักยภาพในการผลิต และการใช้สมุนไพรในยาสำเร็จรูปทั้งแผนปัจจุบันและแผนโบราณ ยาสมุนไพรบางชนิดมีราคาแพง ขาดแคลน และคุณภาพไม่ดีพอ มีการปลอมปน การขาดข้อมูลทางวิทยาศาสตร์และไม่มีมาตรฐานในการควบคุมคุณภาพสมุนไพร ทำให้ยาสมุนไพรที่ใช้ในการแพทย์และเภสัชกรรมแผนโบราณ ยังไม่เป็นที่ยอมรับในการรักษาและการบำบัดโรค ทั้งที่ยาสมุนไพรบางชนิดมีราคาถูกและสรรพคุณเชื่อถือได้ ดังนั้นการสร้างมาตรฐานของสมุนไพรรองรับทำให้ผู้บริโภคมั่นใจในผลิตภัณฑ์สมุนไพรมากขึ้น ปัจจุบันกลุ่มแม่บ้านชุมชนได้รวมตัวกันผลิตขมิ้นชันผงกันมานานและแพร่หลาย โดยมีการควบคุมดูแลตามข้อกำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ซึ่งได้กำหนดไว้ให้ ขมิ้นผง หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำเหง้าขมิ้นหรือที่เรียกกันว่า “ขมิ้นชัน” ที่อยู่ในสภาพดีมาล้างให้ สะอาด อาจนำมาต้ม นึ่ง หรือแช่ในน้ำเดือด หั่นให้ละเอียด นำไปผึ่งแดดหรืออบให้แห้ง แล้วบดให้เป็นผงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ขมิ้นผง (มผช.676/2547) กำหนดคุณลักษณะเกี่ยวกับจุลินทรีย์ไว้ดังนี้ จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดต้องไม่เกิน 1×10^5 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม โคลิฟอร์ม โดยวิธีเอ็มพีเอ็น ต้องน้อยกว่า 3 ต่อตัวอย่าง 1 กรัม ยีสต์และราต้องไม่เกิน 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม โดยการทดสอบจุลินทรีย์ให้ใช้ตาม AOAC หรือ BAM หรือวิธีการทดสอบอื่นที่เป็นที่ยอมรับ

2.10 การศึกษาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน

ค่าการใช้พลังงานในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด เป็นค่าที่สะท้อนถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และยังสามารถแสดงถึงต้นทุนการอบแห้งวัสดุชีวภาพในอุตสาหกรรมอาหารอย่างหายากๆ ค่าพลังงานจำเพาะสามารถคำนวณได้จากปริมาณพลังงานที่วัดได้ในการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด วัดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ด้วยเครื่องวัดพลังงาน (ยี่ห้อ Fluke รุ่น Clamp Meter 322) วัดค่าพลังงานไฟฟ้าระหว่างการอบแห้งทั้ง 2 แบบ ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ทำการบันทึกทุก 10 นาที เมื่อได้ข้อมูลครบจากนั้นก็คำนวณหาค่าพลังงานที่ใช้ตั้งสมการ (Eq 2.20– 2.21)

$$P = IV \cos \phi \quad (\text{Eq 2.20})$$

$$\text{จำนวนหน่วย (ยูนิต) ใน 1 วัน} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้า (วัตต์)} \times \text{จำนวนเครื่องใช้ไฟฟ้า}}{1000} \times \text{จำนวนชั่วโมงที่ใช้งานในหนึ่งวัน} \quad (\text{Eq 2.21})$$

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lin et al. (1998) [23] ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งของขึ้นแครอทซึ่งอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้ง 3 วิธีคือ การอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ และการอบแห้งแบบฟัดตาย โดยทำการเปรียบเทียบคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง (การดูดซับน้ำ สี ความหนาแน่น ปริมาณแร่ธาตุ

เนื้อสัมผัส) จากการศึกษาพบว่าการอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศจะทำให้ ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพใกล้เคียงกับการอบแห้งแบบพืตตาย ในขณะที่การอบแห้งด้วยลมร้อนจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำกว่า ทั้งสองวิธี

Maskan (2000) [24] ศึกษาการอบแห้งตัวอย่างกล้วยหั่นแว่นซึ่งมีความหนาแตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 4.3, 7.4 และ 14 มิลลิเมตร โดยเปรียบเทียบวิธีการอบแห้ง 3 วิธี ได้แก่แบบลมร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.45 เมตรต่อวินาที การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่ระดับ 350, 490 และ 700 วัตต์ และแบบพลังงานผสม (ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ) ที่กำลังงานไมโครเวฟ 350 วัตต์และความหนา 4.3 มิลลิเมตร พบว่ากราฟการอบแห้งลดลง (Falling rate period) ของการอบแห้ง แบบลมร้อนใช้เวลานานที่สุดอัตราการอบแห้งสูงสุดเกิดที่ระดับกำลังไมโครเวฟที่สูงที่สุดด้วยเช่นกันและใน ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งแบบไมโครเวฟ จะมีค่าความสว่างและมีอัตราการคืนรูปสูง

Hu et al. (2005) [25] ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้งถั่วเหลือง 3 วิธีการอบแห้งคือการอบแห้งแบบลมร้อนการอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศและการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟระบบสุญญากาศพบว่าการอบแห้งแบบลมร้อนมีอัตราการอบแห้งสูง ในช่วงเริ่มต้นแต่ในช่วงท้ายอัตราการอบแห้งลดลงและทำให้เกิดการเสียหายต่อคุณภาพอาหารการอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศและใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งแบบลมร้อน ส่วนการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟสุญญากาศโดยการอบแห้งลมร้อนที่ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาทีแล้วนำไปอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศที่ความดัน -95 กิโลปาสคาล กำลังไมโครเวฟ 9.33 W/g dry-matter เป็นเวลา 15 นาทีซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งแบบผสมนี้จะนำถั่วเหลืองไปอบแห้งด้วยลมร้อนก่อนเพื่อลดน้ำหนักเริ่มต้น การอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศเพื่อลดการใช้พลังงานจากไมโครเวฟ สุญญากาศ

Doymaz (2006) [26] พหุติกรรมการอบแห้งที่ขึ้นความหนาของใบสาระแหน่ที่ช่วงอุณหภูมิของ 35-60 องศาเซลเซียสที่กำหนดในตู้อบแห้ง การเพิ่มอุณหภูมิอากาศ ลดเวลาในการอบแห้งของใบสาระแหน่ การวิเคราะห์วัสดุเพื่อให้ได้ค่าการแพร่กระจายจากอัตราการอบแห้งลดลงระยะเวลา ในระยะเวลาในการถ่ายเทความชื้นจากใบสาระแหน่ที่อธิบายการนำไปใช้โดยแบบจำลองของ Fick's diffusion ความแตกต่างของการแพร่กระจายจาก 3.067×10^{-9} ถึง 1.941×10^{-8} เมตร²/วินาที และขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศ ความสัมพันธ์ของ Arrhenius กับ การกระตุ้นค่าพลังงานที่ 62.96 กิโลจูล/โมล แสดงให้เห็นผลกระทบของอุณหภูมิการแผ่ แบบจำลองการอบแห้งขึ้นความหนาที่ 4 สามารถใช้ได้ในงานวิจัยที่มีข้อมูลการติดตั้งทั้งหมดของแบบจำลองการอบแห้ง, แบบจำลองของ Logarithmic เป็นที่น่าพอใจในการอธิบายจลนศาสตร์ของการอบแห้งด้วยลมร้อนของใบสาระแหน่

Sakai and Hanzawa (1994) [27] ศึกษาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งหัวหอมหั่นบางแบบชั้นบางด้วยลมร้อนร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด โดยทำการศึกษาพหุติกรรมการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 ถึง 80 องศาเซลเซียส ระดับชั้นความหนา 2 ถึง 6 มิลลิเมตร ความเร็วลม 0.8 ถึง 2 เมตรต่อวินาที โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบชั้นบาง เช่น Page, Modified Page, Fick's และ Exponential ซึ่งใช้อธิบายถึงจลนศาสตร์การอบแห้งของวัสดุอาหาร พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page และ modified Page มีความเหมาะสมโดยพิจารณาค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.980 ถึง 0.995 แต่สำหรับแบบจำลองอื่นค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.767 ถึง 0.933 ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 4 แบบมีค่า R^2 ค่อนข้างแม่นยำ แต่ modified Page มีความแม่นยำสูงสุดในการทำนายพหุติกรรม

Cihan *et al.* (2007) [28] ศึกษาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับสภาวะการอบแห้งแบบชั้นบางของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสและความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที พบว่า ค่าตัวแปรทางสถิติที่เหมาะสมสำหรับสภาวะการอบแห้งรวมถึงการพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli มีความเหมาะสมสำหรับสภาวะการอบแห้งแบบชั้นบางของข้าวเปลือก โดยมีสัมประสิทธิ์ตัวแปรแสดงอยู่ในฟังก์ชันโพลีโนเมียลของอุณหภูมิในการอบแห้ง

Wu *et al.* (2007) [29] ศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งมะเขือม่วงด้วยระบบสุญญากาศ โดยศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่ 30-50 องศาเซลเซียส และผลของความดันที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งและการหดตัวของชิ้นวัสดุทดสอบโดยเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 4 โมเดลที่ใช้กันโดยทั่วไปอีกทั้งยังศึกษาผลของการแพร่กระจายความชื้นและคำนวณค่าพลังงานที่ใช้ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิเป็นตัวเร่งในกระบวนการอบแห้งแบบสุญญากาศในขณะที่ความดันไม่มีผลกระทบบ่อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งยังมีผลต่อการแพร่กระจายความชื้นสำหรับการอบแห้งแบบสุญญากาศของมะเขือม่วง แต่ความดันจะมีผลต่อการหดตัวของวัสดุทดสอบ นอกจากนี้ สมการที่สร้างขึ้นได้จากการทดลองยังมีความแม่นยำที่สุดสำหรับกระบวนการอบแห้งมะเขือม่วงด้วยระบบสุญญากาศ

Abe and Afzal (1997) [30] ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวบาร์เลย์ด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดจากความชื้น 18 % w.b. ให้เหลือความชื้นสุดท้าย 15 % w.b. ระยะติดตั้งแท่งรังสีอินฟราเรดกับวัสดุ 15 cm อุณหภูมิของอากาศเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 30°C ที่ความเข้มรังสีอินฟราเรด 0.1, 0.333 และ 0.5 W/cm² จากการศึกษาพบว่าที่ความเข้มชั้น 0.333 W/cm² มีความเหมาะสมที่สุดโดยลดเวลาลงได้ 55 นาที ซึ่งจะทำให้ความงอกสูงขึ้น 95 %

กิตติศักดิ์ และ คณะ (2546) [31] ได้ศึกษาการอบแห้งแบบป้อนความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล โดยออกแบบ และติดตั้งแท่งรังสีอินฟราเรดขนาด 1.95 kw ในแนวตั้งฉาก กับทิศทางการไหลของอากาศที่ผ่านการอบแห้งผ้าชุบน้ำและห่างจากวัสดุอบแห้ง 0.12 m ป้อนความร้อนมีขนาดเครื่องควบแน่นตัวในและตัวนอก 4.5 kw เครื่องทำระเหย 3.66 kw เครื่องอัดไอ 1.3 kw และบรรจุผลิตภัณฑ์ได้ 12 ถาด (น้ำหนักผลิตภัณฑ์ 100-132 kg) จากผลการทดลอง พบว่า รังสีอินฟราเรดช่วยลดเวลาในการอบแห้งที่ความชื้นเริ่มต้นสูง และอัตราการไหลต่ำ แต่จะมีอิทธิพลน้อยลง เมื่ออัตราการไหลอากาศสูงขึ้น และไม่ช่วยลดเวลาในการอบแห้งที่ความชื้นเริ่มต้นและอัตราการไหลอากาศต่ำ ส่วนการตั้งอุณหภูมิเปิดปิดแท่งรังสีอินฟราเรดให้ต่ำกว่าการอบแห้งประมาณ 8-10°C จะประหยัดพลังงานมากกว่าการตั้งอุณหภูมิควบคุมรังสีอินฟราเรดเท่ากับอากาศอบแห้ง ในขณะที่ใช้เวลาในการอบแห้งเท่าเดิม ซึ่งจากการทดลองทั้งหมดพบว่า ความชื้นเริ่มต้น 200 % d.b. อุณหภูมิอบแห้ง 51°C อุณหภูมิควบคุมการเปิดปิดแท่งรังสีอินฟราเรด 41°C และอัตราการไหลอากาศ 858 kg/hr รังสีอินฟราเรดช่วยลดเวลาในการอบแห้งได้มากที่สุด 3 ชั่วโมง สิ้นเปลืองพลังงาน 3.69 MJ/kg น้ำที่ระเหย ค่าสมรรถนะของระบบป้อนความร้อนเท่ากับ 3.58

ศรีมา และ คณะ (2546) [32] ได้ศึกษาการอบแห้งผลไม้และสมุนไพรโดยใช้ป้อนความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล จากการทดลองปรากฏว่าเกิดการสูญเสียความร้อนจากการพาถึง 699 W และเหลือการใช้งานในส่วนของการแผ่รังสี 350 W เท่านั้น การใช้ป้อนความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพสีและกลิ่น โดยผลิตภัณฑ์ที่จะนำมาอบควรเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงและราคาสูง

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาครั้งนี้เป็นการทดลองการอบแห้งขมิ้นชันแผ่นด้วยวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน เปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ซึ่งขมิ้นชันที่ใช้ในการทดลองนี้มีอายุระหว่าง 9 -11 เดือน ขมิ้นชันดังกล่าวได้ผ่านการอบโดยการควบคุมอุณหภูมิการอบแห้งไว้ที่ 50 - 80 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ เพื่อดูลักษณะการอบแห้ง และการศึกษาหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจากการอบแห้งขมิ้นชัน สำหรับตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ค่าต่างๆ ได้ทำการอบแห้งจนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นสุดท้ายแล้วนำมาลดขนาดด้วยเครื่องบดแบบ Hammer Mill จากนั้นนำตัวอย่างมาตรวจสอบคุณภาพสีด้วยเครื่องวัดสี (Hunter Lab) รุ่น Miniscan XE Plus และวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระหาปริมาณสารเคอร์คิวมิน ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (ยี่ห้อ Thermo SCIENTIFIC รุ่น Genesys 10S UV-VIS) จากนั้นจึงนำผงขมิ้นชันที่ผ่านการอบแห้งมาตรวจวิเคราะห์หาเชื้อจุลินทรีย์ด้วยการเพาะเชื้อ สำหรับค่าความชื้นเริ่มต้นของขมิ้นชันหาโดยวิธีการอบแห้งในตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยรายละเอียดของการทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 วิธีการดำเนินงาน

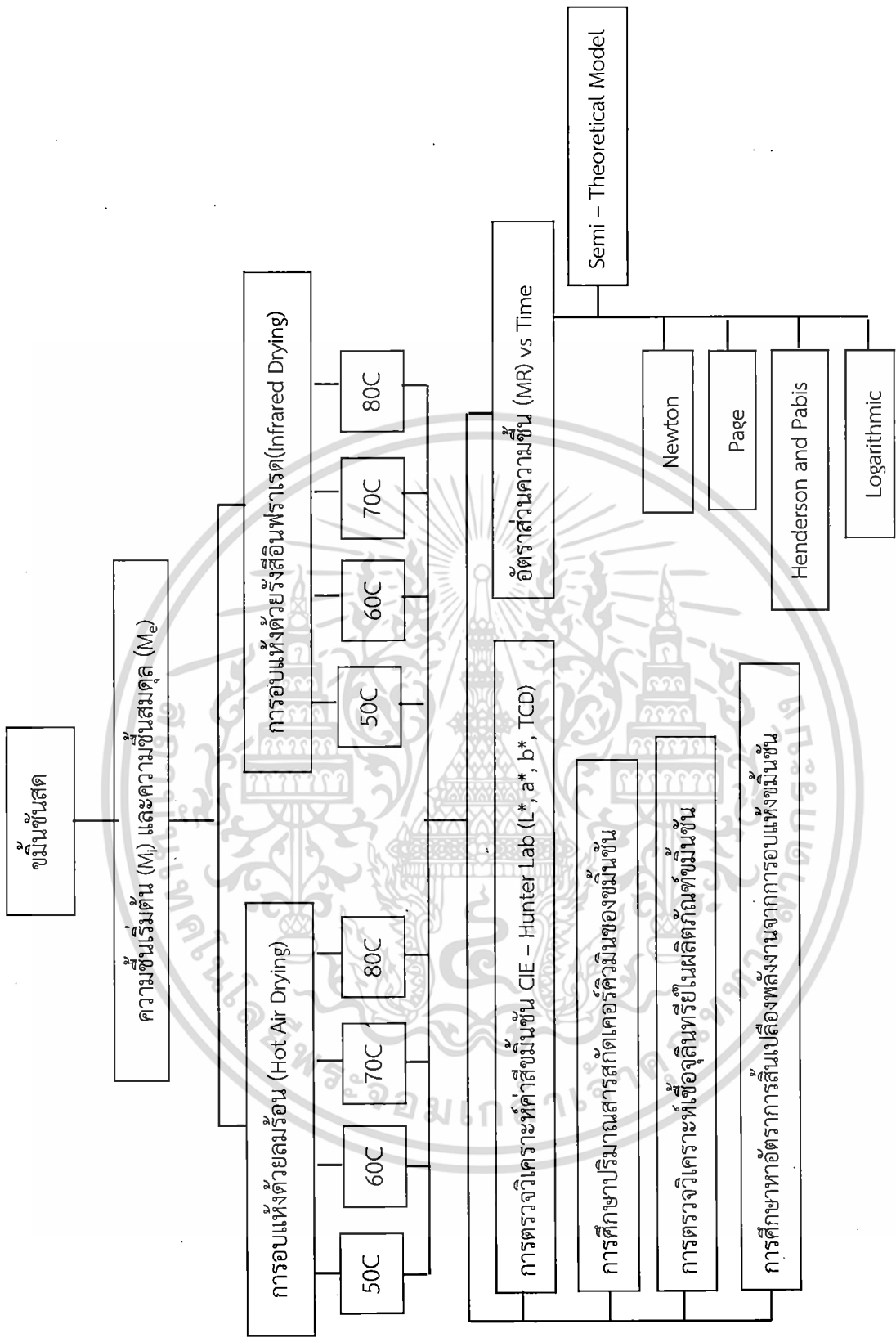
เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ จึงได้แบ่งวิธีการดำเนินงานออกเป็น 3 ส่วนคือ การวางแผนการทดลอง, การเตรียมตัวอย่างและการหาอัตราการอบแห้ง และการศึกษาหาความชื้น โดยที่รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนแสดงดังต่อไปนี้

3.1.1 การวางแผนการทดลอง

แผนการทดลองในงานวิจัยนี้แสดงไว้ดังภาพที่ 3.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การศึกษานี้จะมีการเปรียบเทียบการอบแห้งขมิ้นชันแผ่น 2 วิธี คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ทั้งในด้านการอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และคุณภาพของขมิ้นชันซึ่งประกอบไปด้วย สี, ปริมาณสารเคอร์คิวมินที่คงอยู่, ปริมาณจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ถึงการหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน

3.1.2 การเตรียมตัวอย่างและการหาอัตราการอบแห้ง

นำขมิ้นชันสดมาล้างทำความสะอาดเพื่อเอาดินและสิ่งสกปรกออก จากนั้นนำขมิ้นชันสดไปผึ่งให้แห้งโดยใช้อุณหภูมิอากาศห้องปกติ ทำการคัดเลือกขมิ้นชันสดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่เท่าๆกัน โดยเลือกตรงเหง้าหลักแล้วนำมาเข้าเครื่องสไลด์ให้มีขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร นำไปบรรจุถุงแบบสุญญากาศเก็บไว้ในตู้แช่แข็งสภาวะ -20 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปทดสอบที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ที่ระดับความเร็วมลคงที่ที่ 0.32 เมตร/วินาที โดยการอบแห้งลมร้อนด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดดังแสดงในภาพที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ เก็บข้อมูลน้ำหนักขมิ้นชันแผ่นระหว่างกระบวนการอบแห้งเพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ หาอัตราส่วนความชื้น (MR) ของขมิ้นชันแผ่น โดยชั่งน้ำหนักที่ลดลงทุก ๆ 10 นาที ในการอบแห้งด้วยลมร้อน และชั่งน้ำหนักที่ลดลงทุก ๆ 5 นาทีในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด จนกระทั่งความชื้นลดลงจนถึงจุดสมดุล อัตราการอบแห้งของขมิ้นชันที่แต่ละอุณหภูมิได้จากการคำนวณ



รูปที่ 3.1 แผนภูมิขั้นตอนการทดลองทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การศึกษาหาความชื้น

การศึกษาหาความชื้นเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของไขมันชั้นชั้นตอนแรกซึ่งแบ่งออกเป็น 2 การวิเคราะห์คือ การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (Initial Moisture Content, M_i) และการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, M_e) เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลความร้อนในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญในการออกแบบและกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการทดลอง ดังแสดงต่อไปนี้

1.) การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (Initial Moisture Content, M_i)

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นเริ่มต้นจากไขมันชั้นด้วยการอบแห้งลมร้อนด้วยวิธีของ AOAC (2005) [33] กล่าวคือ นำไขมันชั้นสดมาคัดขนาด แล้วนำไปล้างด้วยน้ำสะอาด ผึ่งลมให้แห้ง บรรจุในถุงสุญญากาศ หลังจากนั้นนำไปแช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส แล้วนำไปอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์นี้สามารถแสดงในรูปของแผนภูมิการทดลองตามภาพที่ 3.2

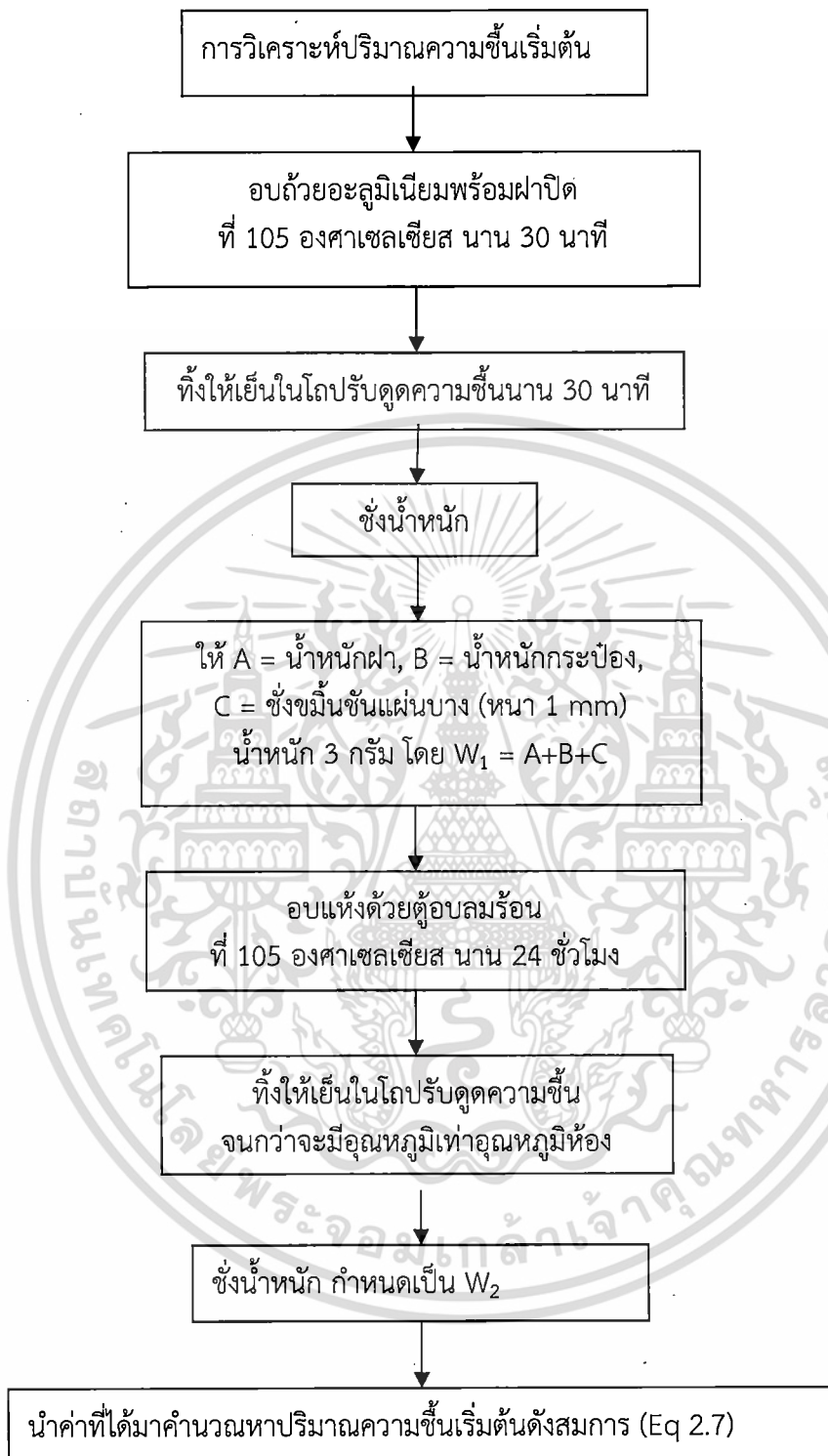
2.) การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, M_e)

การวิเคราะห์ความชื้นสมดุลของไขมันชั้นอบแห้ง สามารถแบ่งวิธีการเข้าสู่สมดุลตามการเคลื่อนที่ของอากาศได้ 2 วิธี ดังนี้

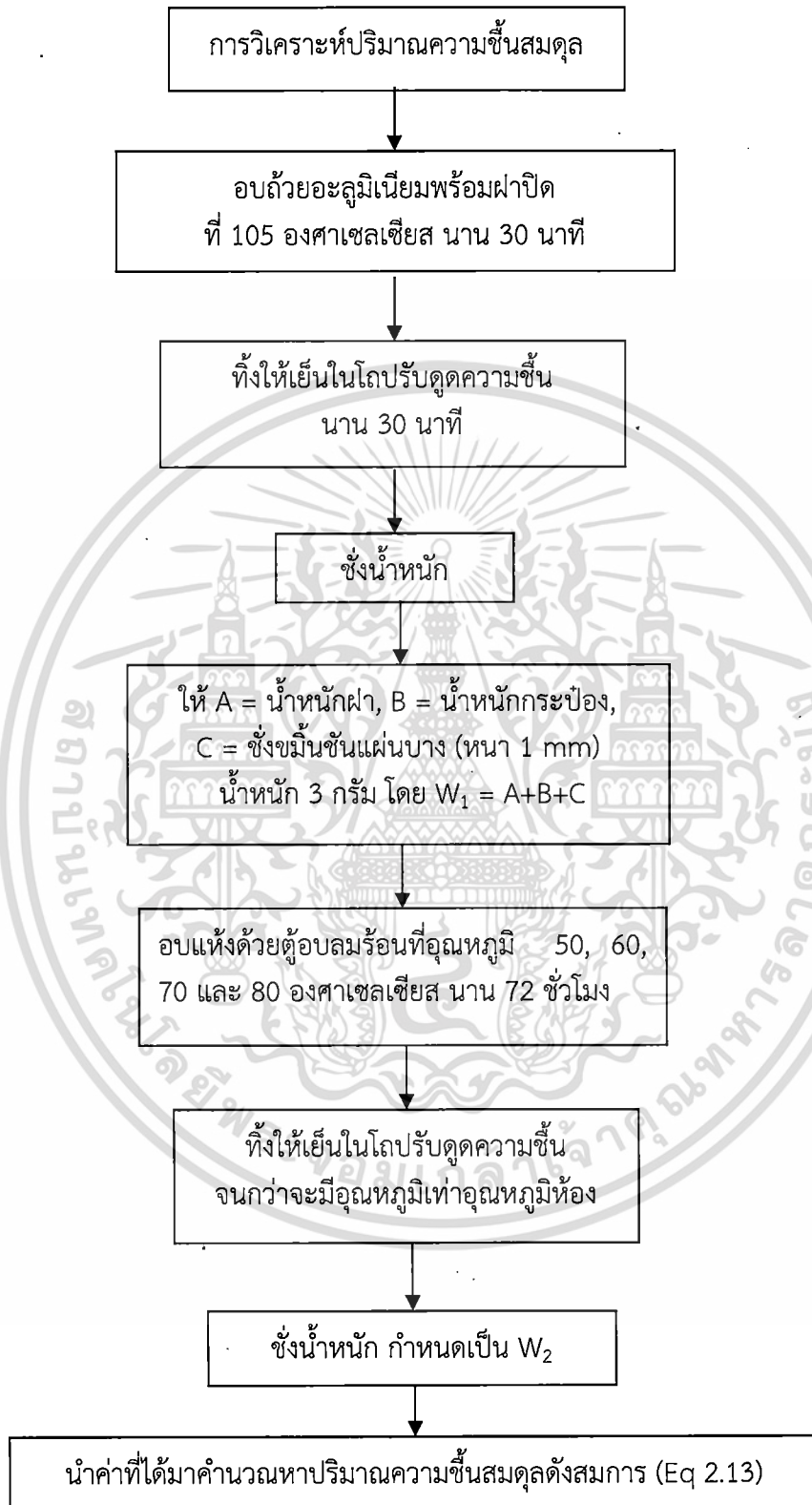
- วิธีเชิงสถิต (Isopiestic Method) เป็นวิธีการวัดความชื้นสมดุลที่วัสดุเข้าสู่จุดสมดุลกับสภาพแวดล้อมโดยปราศจากการก่อกวนด้านพลศาสตร์ของอากาศหรือวัสดุ โดยนิยมนำสารเคมีที่มีความสามารถในการดูดซับความชื้นส่วนเกินมาใช้ ได้แก่ สารละลายเกลืออิ่มตัวหรือสารละลายกรด

- วิธีเชิงพลวัต (Dynamic Method) เป็นการปล่อยให้วัสดุทางการเกษตรสัมผัสกับอากาศแวดล้อม โดยทำให้อากาศหรือผลิตภัณฑ์เคลื่อนไหว วิธีนี้วัสดุจะเข้าสู่สมดุลกับสิ่งแวดล้อมอย่างรวดเร็ว จึงเหมาะสมกับวัสดุที่ความชื้นสูง

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นสมดุลจากไขมันชั้นด้วยการอบแห้งลมร้อนด้วยวิธีของ AOAC (2005) [33] กล่าวคือ นำไขมันชั้นสดมาคัดขนาด แล้วนำไปล้างด้วยน้ำสะอาด ผึ่งลมให้แห้ง บรรจุในถุงสุญญากาศ หลังจากนั้นนำไปแช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส แล้วนำไปอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์นี้สามารถแสดงในรูปของแผนภูมิการทดลองตามภาพที่ 3.3



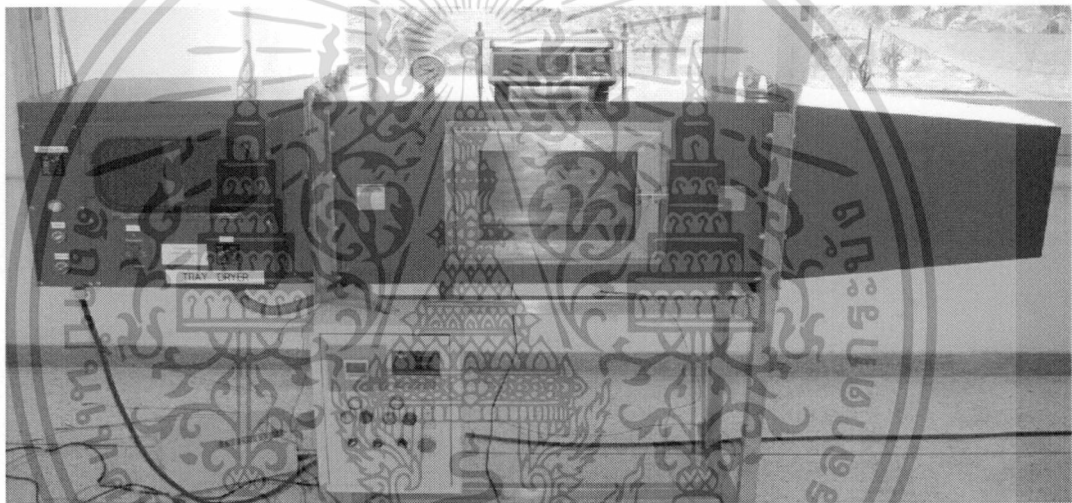
รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงการคำนวณความชื้นเริ่มต้น



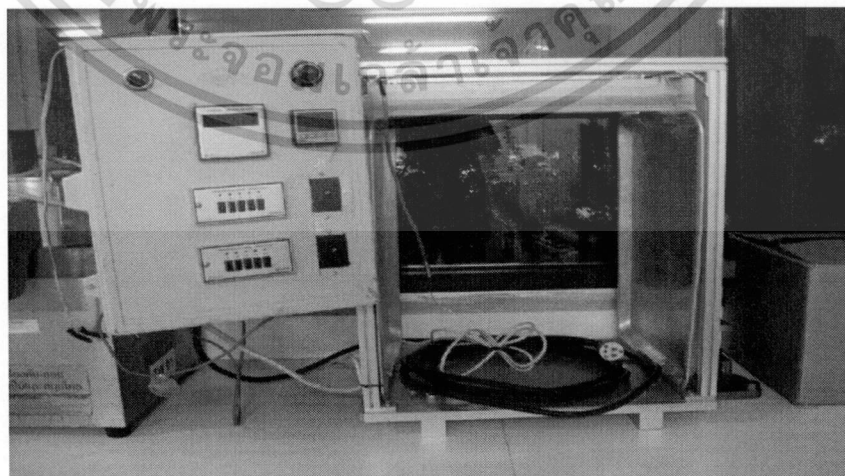
รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงการคำนวณความชื้นสมดุลด้วยวิธีเชิงพลวัต

3.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์และการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การศึกษาจลนพลศาสตร์ และการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญต่อการทำนาย และการวางแผนการผลิตผลิตภัณฑ์ขมิ้นชันแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อน และด้วยรังสีอินฟราเรด (ภาพที่ 3.4 และ 3.5) ดังนั้นเพื่อให้การศึกษาดังกล่าวสมบูรณ์ งานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบการอบแห้งขมิ้นชันแผ่นที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีความเร็วลมที่ 0.32 เมตร/วินาที แล้วทำการเก็บข้อมูลน้ำหนักขมิ้นชันแผ่นที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการอบแห้งทุก ๆ 10 นาที สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน และทุกๆ 5 นาที สำหรับการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด จนกระทั่งความชื้นลดลงจนถึงจุดสมดุล เพื่อนำข้อมูลน้ำหนักดังกล่าวไปวิเคราะห์หาอัตราส่วนความชื้น (MR) ของขมิ้นชันแผ่น อัตราความชื้นการอบแห้งของขมิ้นชันที่แต่ละอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณโดยสมการ (Eq 3.4) ลำดับขั้นตอนการศึกษาในหัวข้อนี้จึงประกอบไปด้วย การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง, การหาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น และการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายกระบวนการอบแห้งของขมิ้นชัน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.4 เครื่องอบแห้งแบบถาด



รูปที่ 3.5 ชุดทดลองการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared Drying)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบวิธี การอบแห้งที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีความเกี่ยวข้อง ทั้งในด้านวิธีการอบแห้ง แหล่งพลังงานที่ใช้ ผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการทดลองเพื่อหาค่าสภาวะการอบแห้ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบระบบการอบแห้งแบบต่าง ๆ เนื่องจากสามารถบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลสารและความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งตลอดจนการหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมของกระบวนการอบแห้งแบบต่าง ๆ ได้ดี ปัจจุบันแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งจะถูกนำไปใช้ในการจำลองสภาวะการอบแห้งและการศึกษาผลกระทบของปัจจัยด้านต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งตลอดจนการทดสอบและเปรียบเทียบเงื่อนไขการอบแห้งแบบต่าง ๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งแทนการทดลองจริง ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง ซึ่งมีความสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดสอบเงื่อนไขในการอบแห้ง

จากการสำรวจเอกสารของรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่นิยมใช้ในการศึกษา สำหรับการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร มักจะเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการกึ่งทฤษฎี (Semi – Theoretical Model) อาทิเช่นแบบจำลองของ Newton, Henderson and Pabis, Page, Logarithmic และแบบจำลองอื่นๆ ซึ่งรูปแบบความสัมพันธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำการคัดเลือกแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งจะมีรูปแบบความสัมพันธ์ในรูปกฎสมการข้อที่สองของฟิค (Fick's law) สามารถใช้ในการหาอัตราส่วนความชื้นดังสมการของ (Fick's law) ในสมการที่ Eq 3.1

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D_{eff} \cdot t}{4L^2}\right) \quad (\text{Eq 3.1})$$

- เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (ตารางเมตร/วินาที)
L คือ ความหนาของขม้นชั้นแผ่น (เมตร)
t คือ เวลาในการอบแห้ง (วินาที)

3.2.2 การหาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งเห้ง้าไขมันชั้นแผ่นด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีจตุรรูปแบบของสมการที่ (Eq 3.1) ในรูปของฟังก์ชันลอการิทึมซึ่งรูปแบบสมการจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ของค่าสัดส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งเป็นแบบเส้นตรง ดังแสดงในสมการที่ (Eq 3.2)

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) + \left(-\pi^2 \frac{D_{eff} \cdot t}{4L^2}\right) \quad (\text{Eq 3.2})$$

สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของเห้ง้าไขมันชั้นแผ่นจากค่าความชันของกราฟเส้นตรงซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ และเวลาในการอบแห้ง (t) เมื่อ L มีค่าความหนาของไขมันชั้นแผ่นเท่ากับ 1.1 ± 0.03 mm ดังแสดงในสมการที่ (Eq 3.3)

$$\text{Slope} = \frac{\pi^2 \cdot D_{eff}}{4L^2} \quad (\text{Eq 3.3})$$

3.2.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายกระบวนการอบแห้งของไขมันชั้น

สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear Regression) ใช้ในการประเมินข้อมูลและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของไขมันชั้นโดยใช้วิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด อัตราส่วนความชื้น (MR) ของไขมันชั้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (\text{Eq 3.4})$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (ไร้นหน่วย)

M_e คือ ความชื้นสมดุล เเปอร์เซ็นต์ (ฐานเปียก)

M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น เเปอร์เซ็นต์ (ฐานเปียก)

M_t คือ ความชื้น ณ เวลาใดๆ เเปอร์เซ็นต์ (ฐานเปียก)

การทดลองเพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งไขมันชั้น โดยจะใช้แบบจำลองของ Newton, Page, Henderson and Pabis และ Logarithmic ใช้ในการพิจารณา รูปแบบสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 4 แบบจำลอง แสดงในตารางที่ 2.2

ในการพิจารณาหาแบบจำลองที่ดีที่สุดในการอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งของขมิ้นชันจะใช้การเปรียบเทียบทางสถิติ ด้วยโปรแกรม SPSS และใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2), Chi-Square (χ^2) และ Root mean square error ($RMSE$) ช่วยในการเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลอง โดยมีสมการดังต่อไปนี้

- สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด ซึ่งหากมีค่ามากจะแสดงว่าตัวแปรต้นสามารถอธิบายตัวแปรตามได้ดี

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{pred} - MR_{pred,i})^2} \quad (Eq\ 3.5)$$

- Chi-Square (χ^2)

เป็นค่าสถิติที่ใช้ทดสอบสมมติฐานทางสถิติว่าตัวแปรต้นและตัวแปรตามมีความสอดคล้องกัน ซึ่งหากมีค่าน้อยหรือเข้าใกล้ศูนย์แสดงว่าตัวแปรต้นและตัวแปรตามมีความสอดคล้องกัน

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z} \quad (Eq\ 3.6)$$

- Root mean square error ($RMSE$)

เป็นค่าที่วัดความแตกต่างระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนาย ซึ่งหากมีค่าน้อยจะแสดงว่าแบบจำลองทำนายค่าได้ใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลอง

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]^{1/2} \quad (Eq\ 3.7)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$ คือ ค่าจากการทดลอง

N คือ จำนวนค่าสังเกต

$MR_{pre,i}$ คือ ค่าที่ได้จากการทำนาย

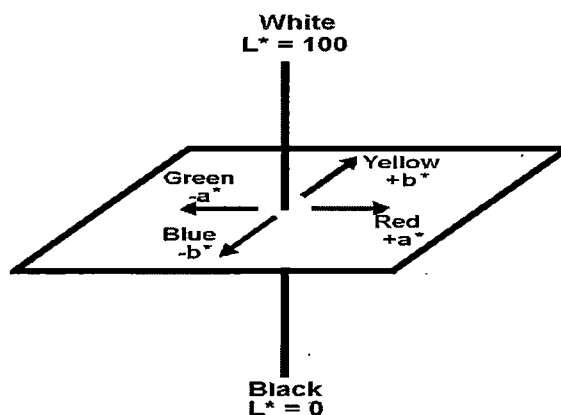
Z คือ ค่าคงที่จากแบบจำลอง

3.3 การวัดค่าสี

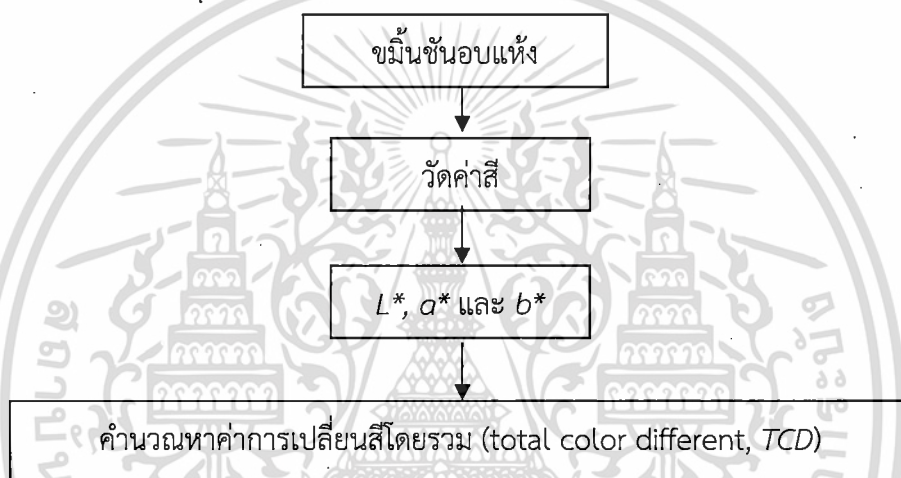
หลังจากอบแห้งขมิ้นชันแผ่นเสร็จแล้วเก็บไว้ในถุงซิปล็อคเก็บไว้ในโถดูดความชื้น (Desiccator) จึงนำขมิ้นชันแผ่นอบแห้งที่บดเป็นผงไปวัดค่าสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer (ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น MiniScan XE PLUS) แสดงดังภาพที่ 3.6 โดยใส่ผงขมิ้นชันลงในถ้วยแก้วควมวาทสำหรับวัดสี แล้วนำเครื่องวัดสีมาตรวจสอบสีของผงขมิ้นชันตามจำนวนตัวอย่างอุณหภูมิที่ทดลอง และวัดค่าสีตัวอย่างอุณหภูมิละ 5 ซ้ำ โดยกระจายตัวอย่างทุกตำแหน่งแบบสุ่ม เพื่อวัดค่าความสว่าง/มืด (L^*) ค่าสีแดง/เขียว (a^*) และค่าสีเหลือง/น้ำเงิน (b^*) ของขมิ้นชันแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส ค่า L^* วัดความมืดและความสว่างของสีมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 100 โดยค่า 0 หมายถึงความเป็นสีดำ(มืด) ค่า 100 หมายถึงความเป็นสีขาว(สว่าง) ค่า a^* วัดความเป็นสีแดง เมื่อมีค่าเป็นบวก วัดความเป็นสีเขียวเมื่อมีค่าเป็นลบและความเป็นสีเทาเมื่อมีค่าเป็นศูนย์ ค่า b^* วัดความเป็นสีเหลืองเมื่อมีค่าเป็นบวก วัดความเป็นสีน้ำเงินเมื่อมีค่าเป็นลบและความเป็นสีเทาเมื่อมีค่าเป็นศูนย์(แสดงในรูปที่ 3.7) นำค่า L^* a^* และ b^* มาคำนวณหาค่าการเปลี่ยนสีโดยรวม (Total Color Different, TCD) และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่ระดับความเร็วลมคงที่ เท่ากับ 0.32 เมตร/วินาที ทั้ง 2 วิธี ดังแสดงในแผนผังการวิเคราะห์ค่าสี ภาพที่ 3.8



รูปที่ 3.6 เครื่อง Spectrophotometer (ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น MiniScan XE PLUS)



รูปที่ 3.7 แสดงค่า L^* a^* และ b^* Color (Hunter, Richard Sewall, 1948)



รูปที่ 3.8 แผนผังการวิเคราะห์ค่าสี

3.4 การศึกษาปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมินของไขมันชั้น

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาปริมาณสารสกัดสารเคอร์คิวมินจากไขมันชั้นผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด โดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ สารเมทานอลในการทดลองนี้ โดยปริมาณของสารสกัดเคอร์คิวมินที่สกัดได้จะถูกนำไปวิเคราะห์โดยเครื่อง ยูวี - วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบหาปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมินในไขมันชั้นผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด กับปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมินในไขมันชั้นสด ซึ่งจะนำไปวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิในการอบแห้งและวิธีการในการอบแห้งต่อปริมาณการสกัดสารเคอร์คิวมิน โดยขั้นตอนในการศึกษาปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมินของไขมันชั้นมีดังต่อไปนี้

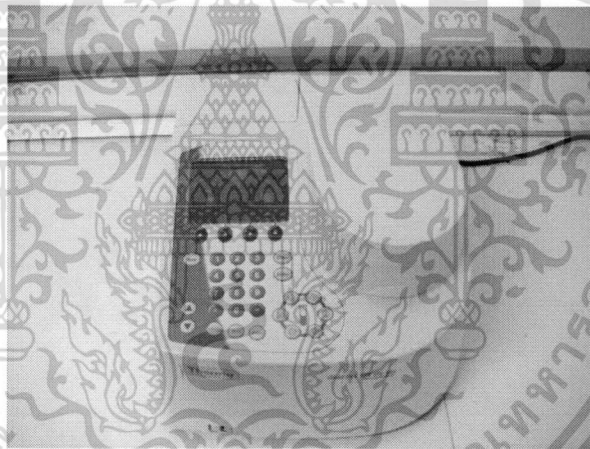
3.4.1 การทำเส้นมาตรฐานของเคอร์คิวมิน

การทำเส้นมาตรฐานของเคอร์คิวมินโดยใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลาย ทำได้โดยเตรียมละลายสารมาตรฐานเคอร์คิวมินปริมาณ 0.01 กรัม (ยี่ห้อ Dr.Ehrenstorfer GmbH ของบริษัท เอ.ที.ชาเยน์ เทรดดิง) แสดงในภาพที่ 3.9 ละลายในเมทานอลปริมาตร 25 มิลลิลิตร จากนั้นปิเปตสารละลายเคอร์คิวมินเป็นปริมาณ 20, 50, 100 ไมโครลิตร เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา 38 ไม่นาน ไม่นาน อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

100, 120 และ 150 ไมโครลิตร ลงในขวดวัดปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วย เมธานอลจนมีปริมาตรสุทธิเป็น 10 มิลลิลิตร ซึ่งจะได้ความเข้มข้นเป็น 0.8, 2.0, 4.0, 4.8 และ 6.0 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ หลังจากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ภาพที่ 3.10 ที่ ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร (โมเชิต, 2547) [34] นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้นำไปสร้างเส้นมาตรฐาน แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (แกน x) กับค่าความเข้มข้นของสารละลายเคอร์คิวมิน (แกน y) มีหน่วย เป็นมิลลิกรัม/ลิตร



รูปที่ 3.9 สารมาตรฐานเคอร์คิวมิน (ยี่ห้อ Dr.Ehrenstorfer GrnbH) ของบริษัท เอ.ที.ชายน์ เทรดิง



รูปที่ 3.10 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (ยี่ห้อ Thermo SCIENTIFIC รุ่น Genesys 10S UV-VIS)

3.4.2 การสกัดสารเคอร์คิวมินจากขมิ้นชันอบแห้ง และการวัดค่าสารเคอร์คิวมิน

1.) ชั่งขมิ้นชันผงที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน ปริมาณ 0.3 กรัม ละลายเมธานอล ปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วเก็บสารตัวอย่างนี้ไว้ในขวดแก้วสีชาและปิดฝาให้สนิทเขย่าให้เข้ากัน โดยเก็บที่ห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 3.11 และทำการเตรียมตัวอย่างแบบเดียวกันนี้ โดย 1 ขวด ต่อ 1 อุณหภูมิการทดลอง (50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.11 ขวดแก้วสีชาและฝาปิด

2.) เก็บขวดแก้วสีชาในข้อ (1) ไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิ (25 องศาเซลเซียส) และทำการเก็บสารละลายตัวอย่าง ที่เวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งในการเก็บแต่ละครั้งต้องทำการกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ แสดงในภาพที่ 3.12 ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 (Whatman No.1) แล้วนำสารละลายที่ได้ไปเข้าเครื่องเหวี่ยง (Spectrafuge Labnet 7M) เป็นเวลา 10 นาที แสดงในภาพที่ 3.13



รูปที่ 3.12 เครื่องกรองสุญญากาศ



รูปที่ 3.13 เครื่องเหวี่ยง (ยี่ห้อ Labnet รุ่น Spectrafuge 7M)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.) หลังจากนั้นปิเปตสารตัวอย่างจากข้อ (2) ในแต่ละชุดการทดลองมา 0.2 มิลลิลิตรโดยใช้ไมโครปิเปตใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 15 มิลลิลิตร จากนั้นตวงตัวทำละลายเมธานอล ปริมาตร 5 มิลลิลิตร แล้วเทใส่ในบีกเกอร์ที่ใส่สารตัวอย่างไว้คนให้เข้ากันโดยใช้แท่งแก้วคนสาร

4.) ปิเปตสารตัวอย่างแต่ละชุดการทดลองที่ได้จากข้อ (3) จำนวน 0.2 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดวัดปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 10 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยตัวทำละลายเมธานอลจนมีปริมาตรครบ 10 มิลลิลิตร

5.) นำสารตัวอย่างแต่ละชุดการทดลองที่ได้จากข้อ (4) ไปวิเคราะห์หาปริมาณสารเคอร์คิวมิน ที่สกัดได้โดยใช้เครื่อง ยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ เพื่อวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสารสกัดโดยใช้ค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 420 นาโนเมตร (โฆซิต, 2547)

6.) นำค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของแต่ละตัวอย่าง ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน เพื่อหาค่าปริมาณความเข้มข้นของสารเคอร์คิวมินที่สกัดได้

7.) ทำการทดลองซ้ำจากข้อ (1) – (6) โดยเปลี่ยนตัวอย่างผงขมิ้นชั้นที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

8.) ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมินระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ดังแสดงในแผนผังการวิเคราะห์ค่าสี

3.5 การตรวจวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ขมิ้นชั้น

ขมิ้นชั้นเป็นพืชสมุนไพรชนิดหนึ่งที่อยู่ในตำรามาตรฐานยาสมุนไพรไทย ซึ่งได้จัดทำขึ้นเพื่อส่งเสริมศักยภาพในการผลิต และการใช้สมุนไพรในยาสำเร็จรูปทั้งแผนปัจจุบันและแผนโบราณ ยาสมุนไพรบางชนิดมีราคาแพง ขาดแคลน และคุณภาพไม่ดีพอ มีการปลอมปน การขาดข้อมูลทางวิทยาศาสตร์และไม่มีมาตรฐานในการควบคุมคุณภาพสมุนไพร ทำให้ยาสมุนไพรที่ใช้ในการแพทย์และเภสัชกรรมแผนโบราณ ยังไม่เป็นที่ยอมรับในการรักษาและการบำบัดโรค ทั้งที่ยาสมุนไพรบางชนิดมีราคาถูกและสรรพคุณเชื่อถือได้ ดังนั้นการสร้างมาตรฐานของสมุนไพรรองรับทำให้ผู้บริโภคมั่นใจในผลิตภัณฑ์สมุนไพรมากขึ้น ปัจจุบันกลุ่มแม่บ้านชุมชนได้รวมตัวกันผลิตขมิ้นชั้นผงกันมานานและแพร่หลาย โดยมีการควบคุมดูแลตามข้อกำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ซึ่งได้กำหนดไว้ให้ ขมิ้นผง หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำเหง้าขมิ้นหรือที่เรียกกันว่า “ขมิ้นชั้น” ที่อยู่ในสภาพดีมาล้างให้ สะอาด อาจนำมาต้ม นึ่ง หรือแช่ในน้ำเดือด หั่นให้ละเอียด นำไปผึ่งแดดหรืออบให้แห้ง แล้วบดให้เป็นผงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ขมิ้นผง (มผช.676/2547) กำหนดคุณลักษณะเกี่ยวกับจุลินทรีย์ไว้ดังนี้ จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดต้องไม่เกิน 1×10^5 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม โคลิฟอร์ม โดยวิธีเอ็มพีเอ็น ต้องน้อยกว่า 3 ต่อตัวอย่าง 1 กรัม ยีสต์และราต้องไม่เกิน 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม โดยการทดสอบจุลินทรีย์ให้ใช้ตาม AOAC หรือ BAM หรือวิธีการทดสอบอื่นที่เป็นที่ยอมรับ

3.5.1 อุปกรณ์และสารเคมี

- ตู้อบ (Incubator)
- เตาอบลมร้อน
- หม้อนึ่งอัตโนมัติ
- ปิเปต
- จานเพาะเชื้อ
- หลอดทดลอง
- Durham tube

- Soybean-Casein Digest Medium (Bacto™, Becton, Dickinson and Company)
- Sabouraud Dextrose Agar (Difco™)
- Lactose Broth (Merck, Germany)
- Tryptic Soy Agar (Merck, Germany)

3.5.2 การทดสอบจุลินทรีย์

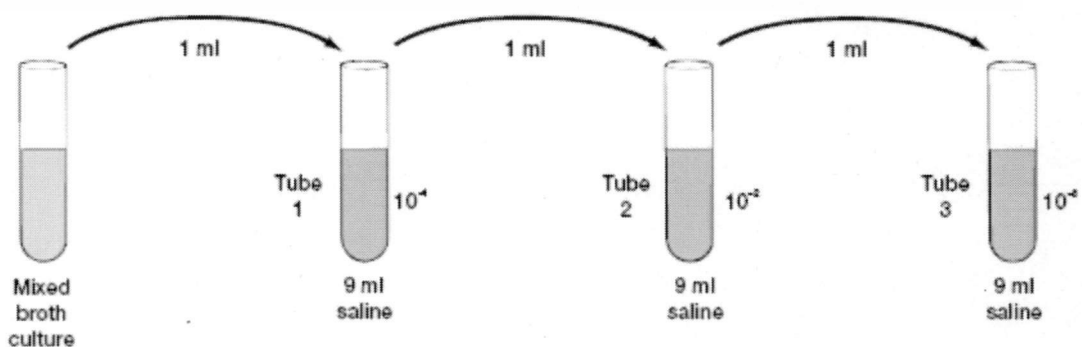
การทดสอบจุลินทรีย์ใช้ตามวิธี ของเกสซ์ตำรับของประเทศอังกฤษ ปี 2007 (BP2007) ในหัวข้อ Microbial limit test การหาจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด การหาจำนวนยีสต์และรา ใช้วิธี Pour plate method คือ เทคนิคการเพาะเชื้อแบบ pour-plate technique ก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการแยกเชื้อให้บริสุทธิ์ได้เช่นกัน โดยตัวอย่างเริ่มต้น และการหาโคลิฟอร์ม ใช้วิธี Most-probable-number method (MPN) โดยใช้ *Escherichia coli* เป็น positive control

(1.) การหาจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด และจำนวนยีสต์และรา ใช้วิธี Pour plate method

เทคนิคการเพาะเชื้อแบบ pour-plate technique ก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการแยกเชื้อให้บริสุทธิ์ได้เช่นกัน โดยตัวอย่างเริ่มต้นจะถูกเจือจางให้มีความเข้มข้นหลายๆ ระดับด้วยเทคนิค 10 serial dilution เพื่อให้เชื้อถูกเจือจางมากพอที่จะทำให้เกิดโคโลนีเดี่ยวๆ บนจานเพาะเชื้อ โดยนำตัวอย่างที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสมเติมลงในจานเพาะเชื้อเปล่าที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว แล้วทำการเทอาหารวุ้น (Agar Medium) ลงในจานเพาะเชื้อ (โดยอุณหภูมิของอาหารเพาะเชื้อประมาณ 48-50 องศาเซลเซียส ซึ่งจะไม่ทำให้เชื้อแบคทีเรียและยีสต์ตายได้) ผสมอาหารและเชื้อให้เข้ากันและให้เกิดการกระจายอย่างสม่ำเสมอด้วยการหมุนจานเพาะเชื้อ เมื่อวุ้นเกิดการแข็งตัว เซลล์จุลินทรีย์จะถูกตรึงให้อยู่ด้านในของอาหาร และจะเกิดโคโลนีเดี่ยวๆ ของเชื้อขึ้นมา

การเจือจางแบบ 10 serial dilutions

- 1.) ปิเปต 1 มิลลิลิตร ชัสเพนชันของเชื้อตั้งต้น (10^0) มาใส่หลอดที่มีน้ำเกลือ (0.9 % NaCl) ที่ฆ่าเชื้อแล้วปริมาตร 9 มิลลิลิตร ด้วยเทคนิคปลอดเชื้อ เขย่าให้เข้ากัน จะได้เป็นชัสเพนชันของเชื้อที่ 10^{-1}
- 2.) ปิเปตชัสเพนชันของเชื้อที่ได้ (10^{-1}) 1 มิลลิลิตร ใส่หลอดที่มีน้ำเกลือ (0.9 % NaCl) ที่ฆ่าเชื้อแล้ว ปริมาตร 9 มิลลิลิตร ด้วยเทคนิคปลอดเชื้อ เขย่าให้เข้ากัน จะได้เป็นชัสเพนชันของเชื้อที่ 10^{-2}
- 3.) ปิเปตชัสเพนชันของเชื้อที่ได้ (10^{-2}) 1 มิลลิลิตร ใส่หลอดที่มีน้ำเกลือ (0.9 % NaCl) ที่ฆ่าเชื้อแล้ว ปริมาตร 9 มิลลิลิตร ด้วยเทคนิคปลอดเชื้อ เขย่าให้เข้ากัน จะได้เป็นชัสเพนชันของเชื้อที่ 10^{-3}
- 4.) นำไปทดลองต่อในขั้นต่อไป : การเพาะเชื้อแบบ Pour Plate

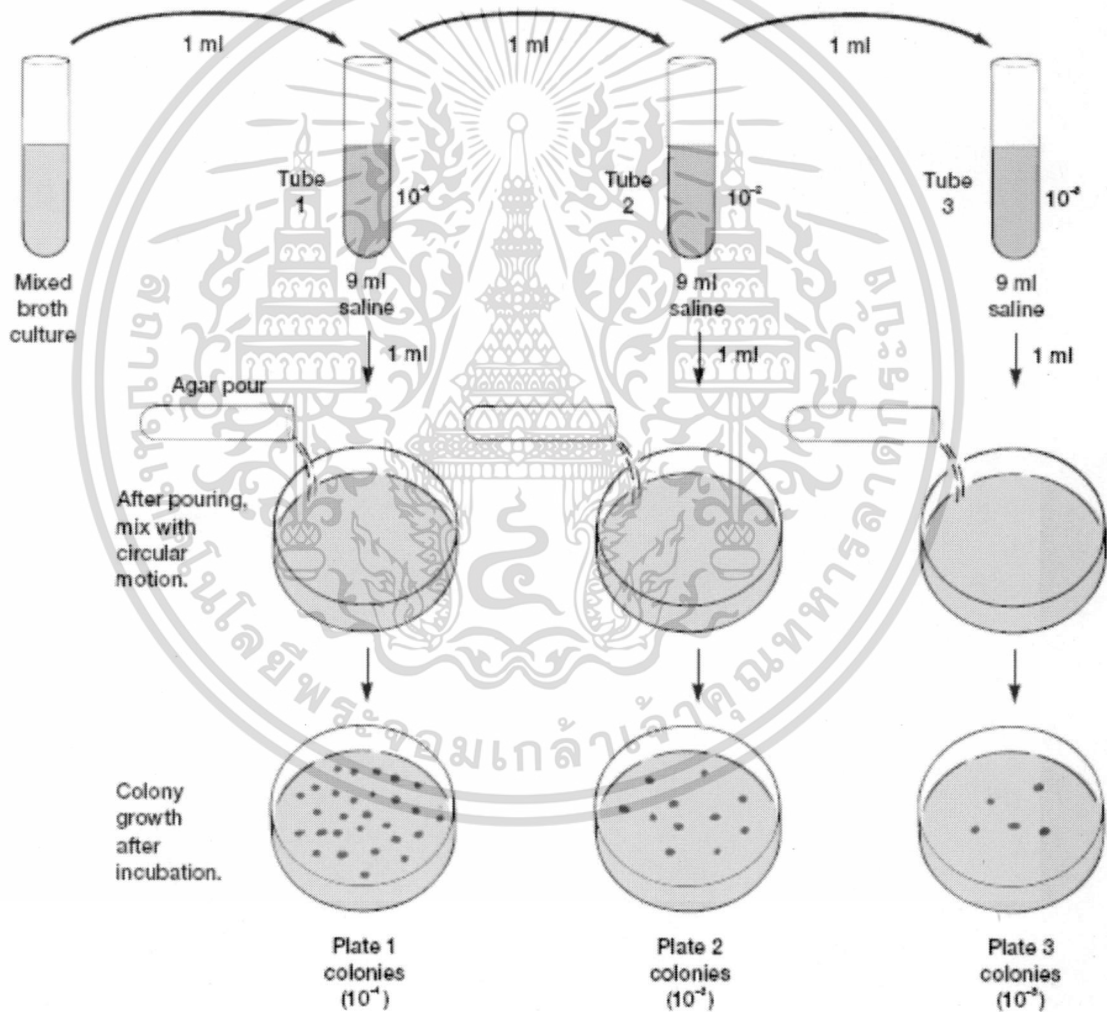


รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการทำ serial dilution [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการตีพิมพ์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเพาะเชื้อแบบ Pour Plate

- 1.) เตรียมจานเพาะเชื้อ (เปล่า) เขียนชื่อตัวอย่าง ที่ทำการทดลองที่ด้านล่างของจานเพาะเชื้อ
- 2.) เตรียมหลอดอาหาร NA ปริมาตร 15 มิลลิลิตร ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว
- 3.) เตรียมปิเปตขนาด 1 มิลลิลิตร ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว
- 4.) ปิเปตซัสเฟนชั้นของเชื้อที่อัตราการเจือจาง 10^{-1} ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร ปล่อยลงในจานเพาะเชื้อด้วยเทคนิคปลอดเชื้อ
- 5.) เทอาหารจากหลอดอาหาร NA 15 มิลลิลิตร ลงในจานเพาะเชื้อที่มีเชื้ออยู่แล้ว
- 6.) หมุนจานเพาะเชื้อเพื่อให้เชื้อและอาหารผสมเข้ากันดี รอจนอาหารกลายเป็นวุ้นแข็งดีแล้วจึงคว่ำจานเพาะเชื้อ แล้วนำไปบ่มที่ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง ทำซ้ำโดยใช้ซัสเฟนชั้นของเชื้อที่ 10^{-3} แทน โดยขั้นตอนการ pour plate แสดงไว้ในภาพที่ 3.15



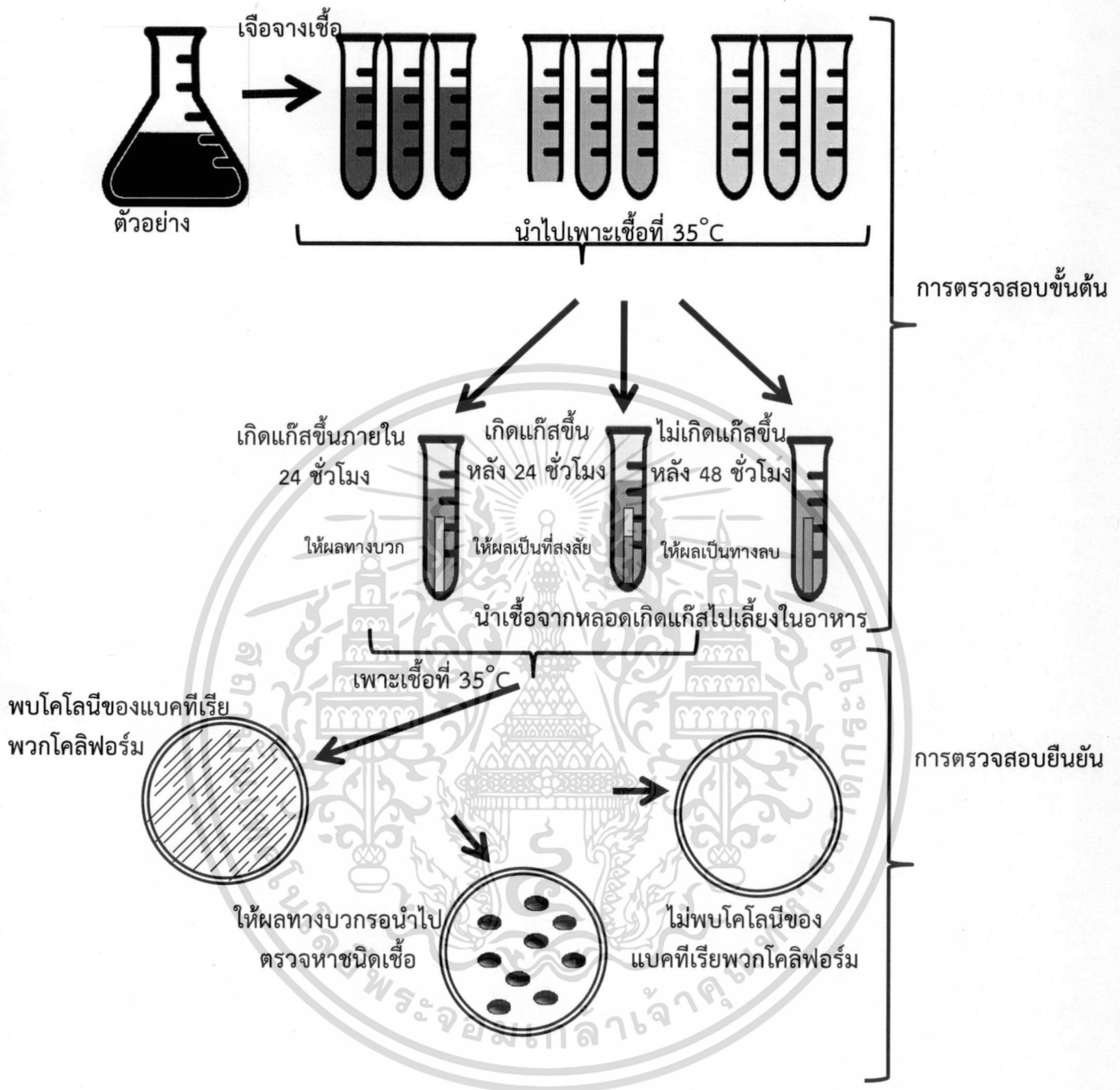
รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการเพาะเชื้อด้วยเทคนิค pour plate [35]

(2.) การหาโคลิฟอร์ม ใช้วิธี Most-probable-number method (MPN)

เป็นเทคนิคการตรวจสอบปริมาณจุลินทรีย์ในตัวอย่างที่เป็นของเหลว และมีปริมาณน้อยมากจนไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธีอื่น มักใช้ในการตรวจสอบเชื้อ *Escherichia coli* ที่ปนเปื้อนในอาหาร วิธีการมักเตรียมตัวอย่างที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 3 ชุด ความเข้มข้นมักแตกต่างกัน 10 เท่า เช่น 10^{-1} 10^{-2} และ 10^{-3} เป็นต้น โดยแต่ละชุดจะใช้หลอดทดลอง 3 หลอด อาจมีการใส่หลอดตรึงก๊าซ (duhrum tube) โดยการคว่ำหลอดลงไม่ให้มีอากาศเข้าก่อนเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ หากหลอดใดเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงของสีหรือเกิดฟองก๊าซ

- วิธีการตรวจนับปริมาณ Fecal coliform bacteria และ E. coli โดยวิธี Most Probable Number (MPN)

- 1.) เตรียมตัวอย่างอาหารเพื่อการตรวจคุณภาพทางจุลชีววิทยา
- 2.) เจือจางเชื้อตัวอย่าง แสดงไว้ในภาพที่ 3.16
- 3.) ใช้ Pipette ขนาด 10 มิลลิลิตร ดูดตัวอย่างเริ่มต้นปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ จำนวน 3 หลอด
- 4.) ใช้ Pipette ขนาด 1 มิลลิลิตร ดูดตัวอย่างเริ่มต้นปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ จำนวน 3 หลอด
- 5.) ใช้ Pipette ขนาด 1 มิลลิลิตร ดูดตัวอย่างที่มีความเข้มข้นลดลง 10 เท่า ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ จำนวน 3 หลอด
- 6.) ใช้ Pipette ขนาด 1 มิลลิลิตร ดูดตัวอย่างที่มีความเข้มข้นลดลง 100 เท่า ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ จำนวน 3 หลอด
- 7.) ใช้ Pipette ขนาด 1 มิลลิลิตร ดูดตัวอย่างที่มีความเข้มข้นลดลง 1,000 เท่า ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ จำนวน 3 หลอด
- 8.) บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง
- 9.) อ่านผลโดยนับจำนวนหลอดที่ให้ผลบวก คือ หลอดที่เกิดก๊าซในหลอดดักก๊าซของแต่ละความเข้มข้น
- 10.) ทดสอบเชื้อชั้นยืนยันผลโดยใช้ห่วงเชียวเชื้อถ่ายเชื้อจากหลอดที่ให้ผลบวกลงสู่ EC หลอดต่อหลอด
- 11.) บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 44.5 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ
- 12.) อ่านผลโดยนับจำนวนหลอดที่ให้ผลบวก คือ หลอดที่เกิดก๊าซในหลอดดักก๊าซของแต่ละความเข้มข้น
- 13.) อ่านค่า MPN Fecal coliform จากตาราง MPN
- 14.) ถ่ายเชื้อจากหลอดที่ให้ผลบวกใน EC ลงใน EMB agar โดยใช้ห่วงเชียวเชื้อ โดยเชียวให้เป็นโคโลนีเดี่ยว (Streak for isolation)
- 15.) บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ในตู้บ่มเชื้อ
- 16.) ทดสอบเชื้อชั้นยืนยันผล โดยเชียวเชื้อจากโคโลนีสีเขียววาวเหมือนโลหะ (Green metallic sheen) ลงใน TW
- 17.) บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ
- 18.) หยด Kovac's reagent ลงใน TW ถ้าเกิดวงแหวนสีแดงขึ้นที่ด้านบน อ่านเป็นผลบวก
- 19.) อ่านผลโดยนับจำนวนหลอดที่ให้ผลบวก ในแต่ละความเข้มข้น
- 20.) อ่านค่า MPN *E. coli* จากตาราง MPN แสดงในตาราง 3.1



รูปที่ 3.16 ขั้นตอนการเพาะเชื้อด้วยเทคนิค Most Probable Number (MPN) [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ตารางหาปริมาณโคลิฟอร์ม (MPN) ต่อ 100 มิลลิลิตร จากตัวอย่างที่เจือจางความเข้มข้นแตกต่างกัน 10 เท่า (ได้แก่ 10, 1, and 0.1 มิลลิลิตร ต่อ ปริมาตร) ระบบ 3 หลอด

No of positive tube No of positive tube In dilutions			MPA per 100 ml	No of positive tube No of positive tube In dilutions			MPA per 100 ml
10 ml	1 ml	0.1 ml		10 ml	1 ml	0.1 ml	
0	0	0	0	2	0	0	9.1
0	0	1	3	2	0	1	14
0	0	2	6	2	0	2	20
0	0	3	9	2	0	3	26
0	1	0	3	2	1	0	15
0	1	1	6.1	2	1	1	20
0	1	2	9.2	2	1	2	27
0	1	3	12	2	1	3	37
0	2	0	6.2	2	2	0	21
0	2	1	9.3	2	2	1	28
0	2	2	12	2	2	2	35
0	2	3	16	2	2	3	42
0	3	0	9.4	2	3	0	29
0	3	1	13	2	3	1	36
0	3	2	16	2	3	2	44
0	3	3	19	2	3	3	53
1	0	0	3.6	3	0	0	23
1	0	1	7.2	3	0	1	39
1	0	2	11	3	0	2	64
1	0	3	15	3	0	3	95
1	1	0	7.3	3	1	0	43
1	1	1	11	3	1	1	75
1	1	2	15	3	1	2	120
1	1	3	19	3	1	3	160
1	2	0	11	3	2	0	3
1	2	1	15	3	2	1	150
1	2	2	20	3	2	2	210
1	2	3	24	3	2	3	290
1	3	0	16	3	3	0	240
1	3	1	20	3	3	1	460
1	3	2	24	3	3	2	1100
1	3	3	29				

ที่มา : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th edition, American Public Health Association, Inc. New York, 1995.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การศึกษาหาอัตราการใช้พลังงานจากการอบแห้งขมิ้นชัน

ค่าการใช้พลังงานในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด เป็นค่าที่สะท้อนถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และยังสามารถแสดงถึงต้นทุนการอบแห้งวัสดุชีวภาพในอุตสาหกรรมอาหารอย่างหายาก ค่าพลังงานจำเพาะสามารถคำนวณได้จากปริมาณพลังงานที่วัดได้ในการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด วัดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ด้วยเครื่องวัดพลังงาน (ยี่ห้อ Fluke รุ่น Clamp Meter 322) วัดค่าพลังงานไฟฟ้าระหว่างการอบแห้งทั้ง 2 แบบ ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ทำการบันทึกทุก 10 นาที เมื่อได้ข้อมูลครบจากนั้นก็คำนวณหาค่าพลังงานที่ใช้ดังสมการ (Eq 3.8 – 3.9)

$$P = IVC\cos\phi \quad (\text{Eq 3.8})$$

$$\text{จำนวนหน่วย (ยูนิท) ใน 1 วัน} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้า (วัตต์)} \times \text{จำนวนเครื่องใช้ไฟฟ้า}}{1000} \times \text{จำนวนชั่วโมงที่ใช้ภายในหนึ่งวัน} \quad (\text{Eq 3.9})$$

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการศึกษาทดลองนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษากระบวนการอบแห้งไขมันชั้น ซึ่งเป็นพืชสมุนไพรที่นิยมบริโภคในประเทศไทย ที่สามารถนำไปต่อยอดในการอบแห้งเพื่อนำไปสกัดในอุตสาหกรรมยาและอาหารเสริมได้ ดังนั้นการศึกษาคุณลักษณะการอบแห้ง เพื่อหาวิธีการอบแห้งที่เหมาะสม ตลอดจนสมภาวะการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 6 ส่วน ได้แก่ การศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งเบื้องต้นของไขมันชั้น เช่น ค่าความชื้นเริ่มต้น ค่าความชื้นสมดุลที่สภาวะการอบแห้งแบบต่างๆ ตามวิธีมาตรฐาน AOAC (2005) จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ของคุณลักษณะการอบแห้งไขมันชั้นหาอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้น หรืออัตราการถ่ายเทมวลสารออกจากระบบในระหว่างการอบแห้ง โดยข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในส่วนที่สองนี้จะถูกนำไปศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยสมการกึ่งทฤษฎี ของวัตถุทางการเกษตรที่มีรูปร่างเป็นแผ่นบาง เพื่อหาสมการในการจำลองสภาวะการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง การเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีของไขมันชั้นอบแห้ง การศึกษาปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมินของไขมันชั้น การตรวจวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ไขมันชั้น และการศึกษาหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจากการอบแห้งไขมันชั้นในสภาวะการอบแห้งแบบต่างๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์ต้นทุนการอบแห้ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งทางกายภาพเบื้องต้นของไขมันชั้น

การศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งทางกายภาพเบื้องต้นของไขมันชั้นได้มีการแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ การศึกษาหาค่าความชื้นเริ่มต้นและค่าความชื้นสมดุล และการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในระหว่างการอบแห้งแบบต่าง ๆ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 ค่าความชื้นเริ่มต้น และค่าความชื้นสมดุลที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ

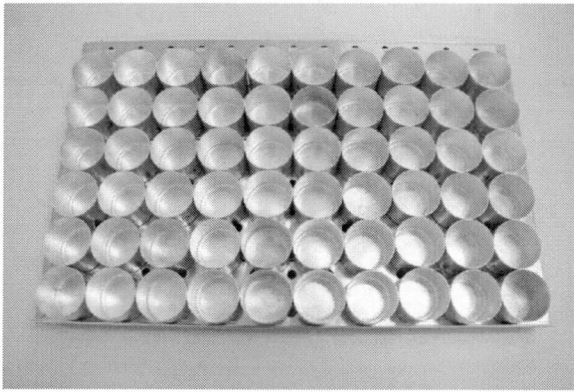
การวิเคราะห์คุณลักษณะการอบแห้งทางกายภาพเบื้องต้นของไขมันชั้น จะทำการศึกษาค่าความชื้นเริ่มต้นด้วยวิธีมาตรฐาน (AOAC, 2005) [33] โดยการนำไขมันชั้นสดมาล้างด้วยน้ำสะอาด ผึ่งลมให้แห้ง บรรจุในถุงสุญญากาศแล้วนำไปแช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้ไขมันชั้นสดเกิดการปรับสภาพความชื้นให้เข้าสู่สภาวะสมดุล เป็นวิธีการเตรียมตัวอย่างของผลผลิตทางการเกษตรและวัสดุชีวภาพก่อนนำไปศึกษาค่าความชื้นเริ่มต้น ค่าความชื้นสมดุลที่สภาวะการอบแห้งแบบต่างๆ จากนั้นนำไขมันชั้นสดเข้าเครื่องสไลด์ให้มีขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร ไปหาค่าความชื้นเริ่มต้นด้วยวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีปรับสภาพสมดุลความชื้นของวัสดุทางการเกษตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dadali et al. (2007) [17], Demirhan และ Özbek (2009) [36] และ Therdthai และ Zhou (2009) [37] และการศึกษาความชื้นสมดุลจะใช้วิธีเชิงพลวัต (Dynamic methods) ซึ่งเป็นวิธีการปล่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ไขมันชั้นแผ่นสัมผัสกับอากาศแวดล้อม (50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ที่ระดับความเร็วลมคงที่) วิธีนี้ไขมันชั้นแผ่นจะเข้าสู่สมดุลกับสิ่งแวดล้อมอย่างรวดเร็ว จึงเหมาะกับวัสดุที่มีความชื้นสูงอย่างไขมันชั้น การหาค่าความชื้นเริ่มต้น จากการดำเนินการตามวิธีมาตรฐานของ AOAC (2005) [33] และมีขั้นตอนการดำเนินการทดลองตามภาพที่ 3.2 – 3.3 (ในหัวข้อที่ 3.1.3.2) โดยใช้ตัวอย่างไขมันชั้นแผ่นจำนวน 3 กรัม และใช้ถ้วยอะลูมิเนียมขนาด 3 ออนซ์ ทำการทดลองหาค่าความชื้นเริ่มต้นจำนวน 100 ตัวอย่าง จากผลการทดลองพบว่าความชื้นเริ่มต้นของไขมันชั้นแผ่นเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 81.52 ± 3.28 เปอร์เซ็นต์ความชื้น (ฐานเปียก) และความชื้นสมดุลของไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อน ด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ระดับความเร็วลมคงที่ 0.32 เมตรต่อวินาที มีค่าความชื้นสมดุลเท่ากับ 6.41 ± 0.09 , 6.09 ± 0.02 , 5.82 ± 0.05 และ 5.57 ± 0.04 เปอร์เซ็นต์ความชื้น (ฐานเปียก) ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ภาพที่ 4.1- 4.4 แสดงวิธีการหาค่าความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสมดุลตามมาตรฐาน AOAC (2005) [33] ในขณะที่การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ระดับความเร็วลมคงที่ 0.32 เมตรต่อวินาที ค่าความชื้นสมดุลจะมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีประสิทธิภาพในการส่งถ่ายพลังงานเข้าสู่ไขมันชั้นแผ่นสูง ส่งผลให้ไขมันชั้นแผ่นเกิดการระเหยน้ำที่ผิวเซลล์ ในโครงสร้างเนื้อเยื่อชั้นใน และน้ำอิสระที่ผิวนอกอย่างรุนแรง ค่าความชื้นสมดุลของไขมันชั้นแผ่นในระหว่างการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดจึงมีค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Dadali et al. (2007) [17], Demirhan และ Özbek (2009) [36] และ Therdtai และ Zhou (2009) [37] ซึ่งศึกษาการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรและวัสดุชีวภาพชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.1 การเตรียมตัวอย่างแห้งไขมันชั้นสด



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.2 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับใช้หาความชื้นของผลผลิตทางการเกษตรตามมาตรฐาน AOAC (2005) (ก) ถ้วยอะลูมิเนียมขนาด 3 ออนด์ (ข) การอบไล่ความชื้น (ค) ถ้วยอะลูมิเนียมที่อบไล่ความชื้นแล้วนำมาทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น (ง) การชั่งน้ำหนักถ้วยอะลูมิเนียม (จ) การชั่งน้ำหนักขมิ้นชันแผ่น



รูปที่ 4.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ความชื้นเริ่มต้นของขมิ้นชันแผ่นตามมาตรฐาน AOAC (2005)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างไขมันชั้นแผ่นอบแห้งหลังการหาความชื้นตามมาตรฐาน AOAC (2005)

การหาน้ำหนักความชื้นสุดท้ายของไขมันชั้นแผ่นอบแห้ง สามารถคำนวณได้จากการทำสมดุลมวลสารโดยมีรายละเอียดดังนี้ มวลตัวอย่าง 300 กรัม, ความชื้นเริ่มต้น 81.52 เปอร์เซ็นต์ความชื้น (ฐานเปียก) จนเหลือความชื้นสุดท้าย 8 เปอร์เซ็นต์ความชื้น(ฐานเปียก) , W_f แทนน้ำหนักสุดท้าย

$$W_f = 300 ((100-81.52)/(100-8))$$

$$W_f = 60.26 \text{ กรัม}$$

ความชื้นสุดท้ายของไขมันชั้นแผ่นอบแห้งที่ความชื้น 8 เปอร์เซ็นต์ความชื้น (ฐานเปียก) มีน้ำหนัก 5.12 กรัม

4.1.2 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในระหว่างการอบแห้งแบบต่าง ๆ

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในระหว่างการอบแห้งแบบต่างๆ ของไขมันชั้นแผ่นสามารถอธิบายจากค่าอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลา โดยอบแห้งไขมันชั้นแผ่นจากความชื้นเริ่มต้น 81.52 ± 3.28 เปอร์เซ็นต์ความชื้น (ฐานเปียก) จนเหลือความชื้น 8 เปอร์เซ็นต์ (ฐานเปียก) ใช้วิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ซึ่งอัตราส่วนความชื้นของไขมันชั้นแผ่นระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบต่างๆ หาได้ตามสมการ (Eq 4.1) ดังที่แสดงในสมการต่อไปนี้

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (\text{Eq 4.1})$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (ไม่มีหน่วย)

M_e คือ ความชื้นสมดุล เปอร์เซ็นต์ (ฐานเปียก)

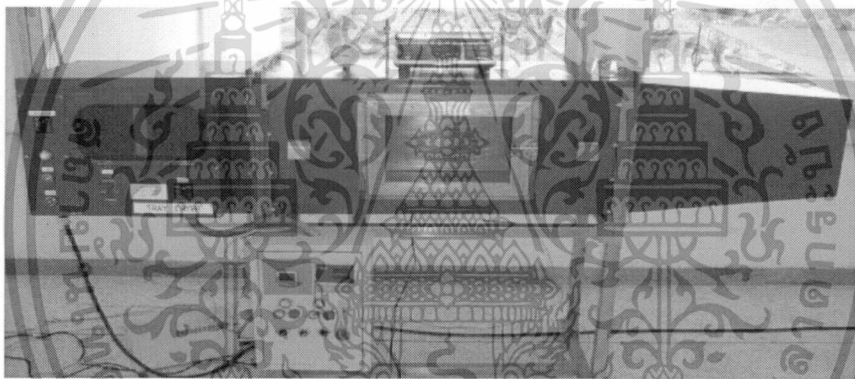
M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น เปอร์เซ็นต์ (ฐานเปียก)

M_t คือ ความชื้น ณ เวลาใดๆ เปอร์เซ็นต์ (ฐานเปียก)

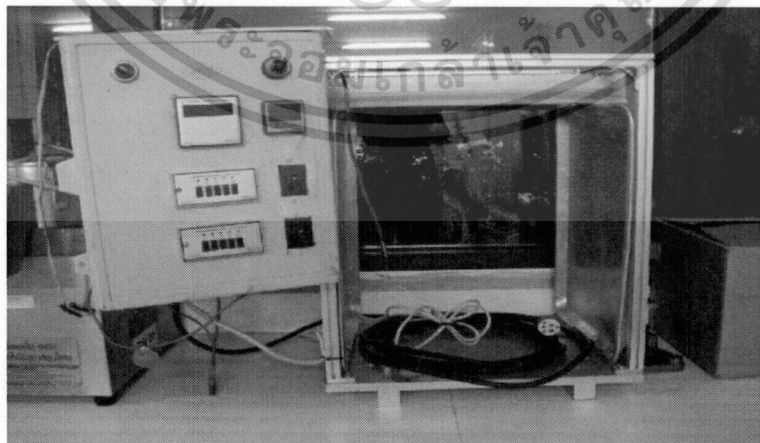
ความชื้นสมดุลของขม้นชั้นแผ่นในขณะที่การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นสมดุลจะมีค่าเท่ากับศูนย์ Dadali และคณะ (2007) [17], Demirhan และ Özbek (2009) [36], Therdtai และ Zhou (2009) [37] สมการแสดงค่าอัตราส่วนความชื้นของขม้นชั้นแผ่นระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด จึงเป็นไปดังที่แสดงในสมการ (Eq 4.2) ต่อไปนี้

$$MR = \frac{M_t}{M_i} \quad (\text{Eq 4.2})$$

รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนแบบถาด และชุดทดลองการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ในงานวิจัยนี้ อบแห้งขม้นชั้นแผ่นที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ที่ระดับความเร็วลมคงที่ ที่ 0.32 เมตรต่อวินาที เก็บข้อมูลน้ำหนักขม้นชั้นแผ่นระหว่างกระบวนการอบแห้ง เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ ห้อตราส่วนความชื้น (MR) ของขม้นชั้นแผ่น โดยชั่งน้ำหนักที่ลดลงทุก ๆ 10 นาทีในการอบแห้งด้วยลมร้อน และชั่งน้ำหนักที่ลดลงทุก ๆ 5 นาทีในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด จนกระทั่งความชื้นลดลงจนถึงจุดสมดุล



รูปที่ 4.5 เครื่องอบแห้งแบบถาด



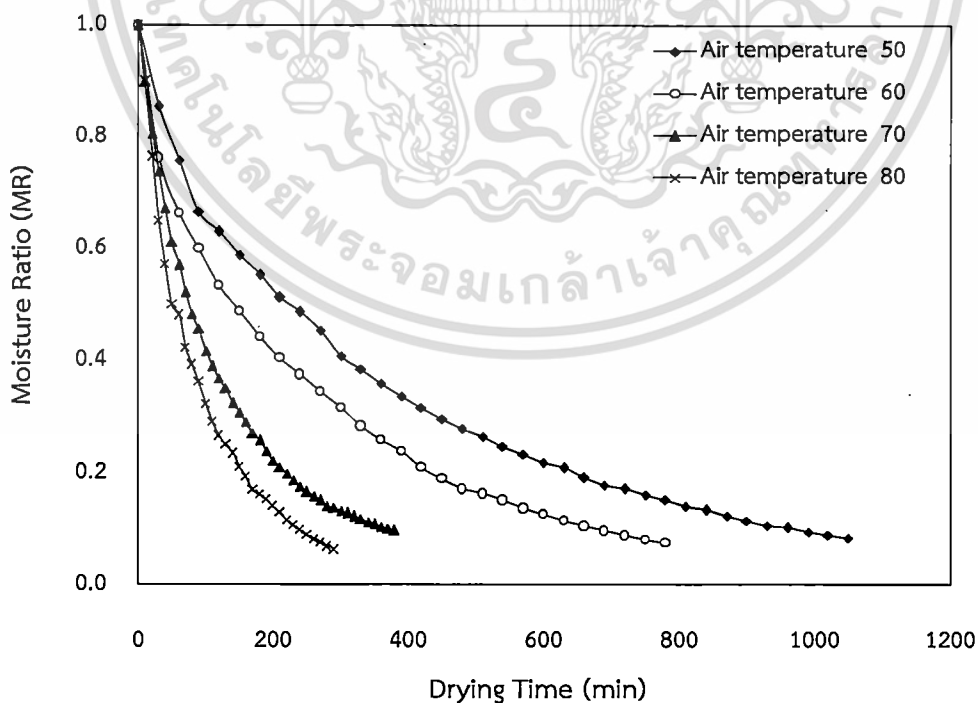
รูปที่ 4.6 ชุดทดลองการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงระยะเวลาอบแห้ง ที่สภาวะต่างๆ พบว่า การอบแห้งไขมันชั้นแผ่นเป็นการอบแห้งแบบอัตรการอบแห้งลดลงเท่านั้น กล่าวคือ ปริมาณ

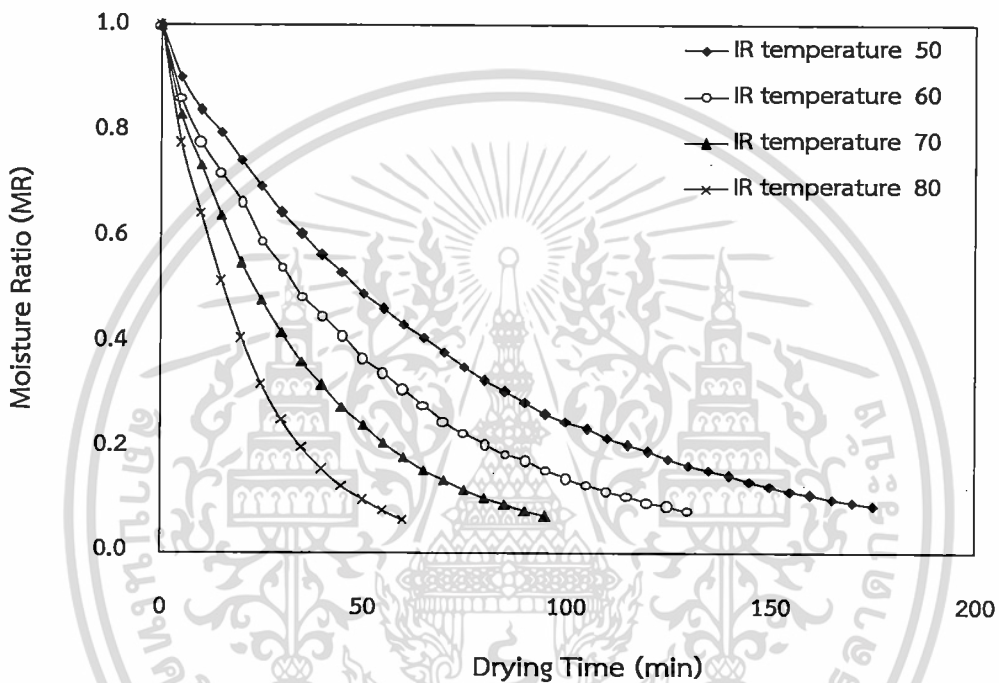
ความชื้นในไขมันชั้นแผ่นมีการถ่ายเทออกจากไขมันชั้นแผ่นอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่ช่วงต้นของการทดลอง ทำให้ อัตรการอบแห้งไม่คงที่ ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณด้วยสมการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัล (รูปที่ 4.7-4.8) จากกราฟทั้งสองกราฟ จะเห็นได้ว่า ในช่วงแรกของการอบแห้งนั้น อัตราส่วนความชื้นในไขมันชั้นแผ่นจะลดลงอย่างรวดเร็ว (เนื่องจากไขมันชั้นแผ่นมีความชื้นสูง) ทำให้การถ่ายเทมวลของน้ำ จากภายในไขมันชั้นแผ่นไปยัง ผิวหน้าเกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็ว และเมื่อระยะเวลาอบแห้งยาวนานขึ้น ความชื้นบริเวณผิวและภายในของไขมันชั้นแผ่นจะมีความชื้นต่ำลง อัตรการถ่ายเทมวลของน้ำจากไขมันชั้นแผ่นไปยังผิวหน้าจะลดลงอย่างช้า ๆ ซึ่งการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยการอบแห้งวัสดุอาหารและผลไม้อีกหลายๆ งานวิจัยที่ผ่านมาของ สมชาติ. 2540 [12] กล่าวคือ อัตรการลดลงของความชื้นในช่วงเวลาอบแห้ง จะมีความสัมพันธ์ไม่เชิงเส้นกับเวลาอบแห้ง และสามารถแสดงในรูปความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียล

จากผลการทดลอง พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) กับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งของการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยลมร้อน แสดงดังรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรการเปลี่ยนแปลงความชื้นของไขมันชั้นแผ่นที่เวลาใดๆ ในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นจนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ความชื้น (ฐานเปียก) มีค่าเท่ากับ 1,050 780 380 และ 290 นาที ตามลำดับ พบว่าที่ระดับอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงที่สุดจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด ใช้เวลาในการอบแห้งไขมันชั้นแผ่น 290 นาที แต่ที่ระดับอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาในการอบแห้งไขมันชั้นแผ่น 1,050 นาที



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของขมิ้นชันแผ่นที่เวลาใดๆ ในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชันแผ่นจนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ความชื้น (ฐานเปียก) มีค่าเท่ากับ 180, 135, 95 และ 60 นาที ตามลำดับ พบว่าที่ระดับอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นระดับที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด ใช้เวลาในการอบแห้งขมิ้นชันแผ่น 60 นาที แต่สำหรับที่ระดับอุณหภูมิในการอบแห้งเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้งขมิ้นชันแผ่น 180 นาที



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ในระหว่างการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส

จากการเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยสภาวะต่างๆ การอบแห้งที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ทั้งกรณีการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ทุกสภาวะการทดลอง พบว่าปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้ง และการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้งสูงจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นระยะเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิสูง โดยสังเกตจากกราฟระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ทั้งกรณีการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด กราฟ (รูปที่ 4.7-4.8) ช่วงแรก จะมีความชันสูง เมื่อระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นกราฟจะมีความชันลดลงตามลำดับ จนถึงความชื้นสุดท้ายที่ต้องการอบแห้ง และในขณะเดียวกันที่ระดับอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ทั้งกรณีการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด พบว่ากราฟมีค่าความชันสูงสุดในการอบแห้ง และที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่ากราฟมีค่าความชันลดลงตามระดับอุณหภูมิที่ต่ำลงมา

ตามลำดับ ทั้งกรณีการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ซึ่งหมายถึงว่า ที่อุณหภูมิสูงจะมีประสิทธิภาพในการอบแห้งสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ

ดังนั้นปัจจัยในการอบแห้งขมิ้นชันแผ่น ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนความชื้น กับระยะเวลาในการอบแห้งของ ทั้งกรณีการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด พบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด จะมีอัตราการอบแห้งที่สูงที่สุด ส่วนการอบแห้งด้วยลมร้อน จะมีอัตราการอบแห้งต่ำที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลาในการอบแห้งเท่ากัน การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด จะสามารถลดความชื้นของวัสดุลงได้สูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน มีสาเหตุมาจากการแผ่รังสีความร้อนของรังสีอินฟราเรดสามารถส่งผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้มากกว่าการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนเพียงอย่างเดียว

4.2 ผลการศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งเป็นการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งจะช่วยในการออกแบบระบบการอบแห้งต่างๆ ในการศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของน้ำจากขมิ้นชันแผ่นสามารถอธิบายในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งทั้งในรูปแบบของสมการเอมพิริคัล (Empirical equation) และสมการกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical equation) ซึ่งจะมีรูปแบบความสัมพันธ์ในรูปกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) สามารถใช้ในการหาอัตราส่วนความชื้น สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นแผ่นระนาบที่มีความยาวมากๆ (Infinite slab) และมีความหนาครึ่งหนึ่งของตัวอย่างอาหารหรือวัสดุชีวภาพที่มีรูปร่างเป็นแผ่นระนาบ การพิจารณาช่วงอัตราการอบแห้ง พบว่าค่าอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลา โดยนำขมิ้นชันแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส จากความชื้นเริ่มต้น 81.52 ± 3.28 เปอร์เซ็นต์ ความชื้น (ฐานเปียก) จนเหลือความชื้น 8 เปอร์เซ็นต์ (ฐานเปียก)

4.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งในรูปแบบของสมการเอมพิริคัล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งในรูปแบบของสมการเอมพิริคัล เช่น แบบจำลองของ Newton, Page, Logarithmic และ Henderson and Pabis ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งของขมิ้นชันแผ่นในระหว่างการอบแห้งด้วยวิธีแบบต่าง ๆ ใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยที่ไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่า Chi-Square (χ^2) และค่า RMSE (Root Mean Square Error) เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ช่วยในการวิเคราะห์การเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแม่นยำในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้งแบบจำลองที่มีความแม่นยำและเหมาะสมในการทำนายจะให้ค่า R^2 สูง แสดงถึงคุณภาพของรูปแบบสมการที่มีความเหมาะสมในการทำนาย ในขณะที่ค่า χ^2 และค่า RMSE เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งควรจะมีค่าต่ำ ตาราง 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัย 55 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองการอบแห้งด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองของ Page มีความเหมาะสมสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของไขมันชั้นแผ่นในระหว่างการอบแห้งแบบลมร้อนได้ดีที่สุดโดยมีค่า R^2 ในช่วง 0.99892 - 0.99982 ซึ่งมีค่ามากกว่าแบบจำลองการอบแห้งของ Newton, Logarithmic และ Henderson and Pabis นอกจากนี้ค่า χ^2 และค่า $RMSE$ มีค่าระหว่าง 0.00003 - 0.00019 และ 0.00516 - 0.01323 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองการอบแห้งแบบต่างๆ ตาราง 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองของ Page มีความเหมาะสมสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของไขมันชั้นแผ่นในระหว่างการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดได้ดีที่สุดโดยมีค่า R^2 ในช่วง 0.99969 - 0.99986 ซึ่งมีค่ามากกว่าแบบจำลองการอบแห้งของ Newton, Logarithmic และ Henderson and Pabis นอกจากนี้ค่า χ^2 และค่า $RMSE$ มีค่าระหว่าง 0.00003 - 0.00007 และ 0.00525 - 0.00793 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองการอบแห้งแบบต่างๆ

ดังนั้นแบบจำลองของ Page เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับใช้ในการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของไขมันชั้นแผ่นในระหว่างการอบแห้ง ในการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยลมร้อน และ การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด เนื่องจากมีความแม่นยำในการทำนายสูง และค่าความผิดพลาดในการทำนายต่ำ

ตาราง 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และการวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองการอบแห้งด้วยลมร้อน ของไขมันชั้นแผ่น

แบบจำลองการอบแห้ง	อุณหภูมิ	ค่าคงที่แบบจำลองการอบแห้ง		พารามิเตอร์วิเคราะห์ทางสถิติ			
				R^2	$\chi^2 \times 10^{-4}$	$RMSE$	
Newton	50°C	k=0.0028		0.9925	18.53	0.0424	
	60°C	k=0.0040		0.9885	26.61	0.0506	
	70°C	k=0.0093		0.9939	11.24	0.0331	
	80°C	k=0.0111		0.9944	10.67	0.0321	
Page	50°C	k=0.0112	n=0.7683	0.9995	0.85	0.0090	
	60°C	k=0.0191	n=0.7272	0.9989	1.81	0.0130	
	70°C	k=0.0221	n=0.8218	0.9998	0.28	0.0052	
	80°C	k=0.0242	n=0.8337	0.9989	1.87	0.0132	
Henderson and Pabis	50°C	k=0.0024	a=0.8911	0.9960	6.96	0.0256	
	60°C	k=0.0035	a=0.8726	0.9933	10.91	0.0318	
	70°C	k=0.0085	a=0.9201	0.9966	5.09	0.0220	
	80°C	k=0.9417	a=0.0104	0.9954	7.70	0.0268	
Logarithmic	50°C	k=0.0030	a=0.8565	c=0.0682	0.9977	4.12	0.0194
	60°C	k=0.0044	a=0.8405	c=0.0663	0.9955	7.75	0.0262
	70°C	k=0.0099	a=0.8942	c=0.0502	0.9986	2.12	0.0140
	80°C	k=0.0129	a=0.9149	c=0.0631	0.9980	3.51	0.0178

หมายเหตุ เมื่อ k คือ อัตราการอบแห้ง, n คือ ค่าดัชนีการอบแห้ง, a และ c คือ ค่าคงที่การอบแห้ง

4.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งในรูปแบบของสมการกึ่งทฤษฎี

สมการกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical equation) ซึ่งจะมีรูปแบบความสัมพันธ์ในรูปกฎข้อที่สอง ของฟิค (Fick's second law) สามารถใช้ในการหาอัตราส่วนความชื้นดังแสดงในสมการที่ (Eq 4.3) สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นแผ่นระนาบที่มีความยาวมากๆ (Infinite slab) และมีความหนาครึ่งหนึ่งของตัวอย่างอาหารหรือวัสดุชีวภาพที่มีรูปร่างเป็นแผ่นระนาบ

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D_{eff} \cdot t}{4L^2}\right) \quad (\text{Eq 4.3})$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (ตารางเมตร/วินาที)

L คือ ความหนาของขม้นชั้นแผ่น (เมตร)

t คือ เวลาในการอบแห้ง (วินาที)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งขม้นชั้นแผ่นด้วยการอบแห้งแบบต่างๆ สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีจตุรแบบของสมการที่ (Eq 4.3) ในรูปของฟังก์ชันลอการิทึมซึ่งรูปแบบสมการจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ดังแสดงในสมการที่ (Eq 4.4)

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) + \left(-\pi^2 \frac{D_{eff} \cdot t}{4L^2}\right) \quad (\text{Eq 4.4})$$

สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของขม้นชั้นแผ่นจากค่าความชันของกราฟเส้นตรงซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ และเวลาในการอบแห้ง (t) เมื่อ L มีค่าเท่ากับ 1.1 ± 0.03 mm ดังแสดงในสมการที่ (Eq 4.5)

$$\text{Slope} = \frac{\pi^2 \cdot D_{eff}}{4L^2} \quad (\text{Eq 4.5})$$

ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของขม้นชั้นแผ่น ในระหว่างการอบแห้งด้วยอบแห้งด้วยลมร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตาราง 4.4

ตาราง 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของขม้นชั้นแผ่น ในระหว่างการอบแห้งแบบต่างๆ

วิธีการอบแห้ง	ระดับอุณหภูมิการอบแห้ง (องศาเซลเซียส)	ความชื้น	$D_{eff} \times 10^{-9}$ (ตารางเมตร/วินาที)	R^2
การอบแห้งด้วยลมร้อน	50°C	0.0022	0.89	0.9961
	60°C	0.0031	1.26	0.9951
	70°C	0.0072	2.91	0.9947
	80°C	0.0091	3.69	0.9942
การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด	50°C	0.0130	5.24	0.9990
	60°C	0.0190	7.71	0.9990
	70°C	0.0279	11.32	0.9999
	80°C	0.0464	18.82	0.9997

โดยที่มวลความชื้นสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกในช่วงเวลาเริ่มต้นและน้ำที่คงเหลืออยู่จะค่อยแพร่กระจายไปยังผิว ถึงแม้ศักยภาพของการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิซึ่งเป็นผลให้เกิดการถ่ายเทพลังงานไปยังภายในเนื้อเยื่อไขมันชั้นแผ่น จากผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งไขมันชั้นแผ่น มีค่า 0.89×10^{-9} , 1.26×10^{-9} , 2.91×10^{-9} และ 3.69×10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที โดยที่การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลต่อการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของไขมันชั้นแผ่น ที่อุณหภูมิสูงที่สุดจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงที่สุด เช่นเดียวกับการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่มีค่าเท่ากับ 5.24×10^{-9} , 7.71×10^{-9} , 11.32×10^{-9} และ 18.82×10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที ที่ระดับอุณหภูมิของคลื่นอินฟราเรดสูงจะส่งผลต่อการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของไขมันชั้นแผ่น เนื่องจากอุณหภูมิในการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด จะเป็นตัวเร่งอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าของไขมันชั้นแผ่น และมีค่าเท่ากับอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในโครงสร้างที่มาเติมเต็มบริเวณผิวหน้า ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทมวลสารในการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (surface diffusion) ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของไขมันชั้นแผ่น จะมากกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน ทั้งนี้เพราะการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด มีกลไกการเกิดความร้อนที่ผิวภายนอกอย่างรวดเร็วและมีผลไปถึงภายในเนื้อเยื่อของไขมันชั้นแผ่น ส่งผลต่อให้เกิดเป็นไออย่างรวดเร็วภายในวัสดุ โดยส่วนมากความชื้นเริ่มต้นสูงจะมีผลทำให้ความดันภายในเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วอันมีผลต่อเนื้อเยื่อของเหลวเคลื่อนที่ออกจากวัสดุภายใต้อิทธิพลของความแตกต่างของความดันรวม นอกจากนี้ กรณีที่วัสดุมีความชื้นเริ่มต้นที่สูงทำให้ความแตกต่างของความดันสูงขึ้นซึ่งมีผลอย่างมากต่อมวลความชื้นที่เคลื่อนที่ออกไปอย่างรวดเร็วกว่าปกติ ด้วยเหตุนี้จึงเรียกชนิดของปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์ปั๊มของเหลว (pumping effect) หรือการที่มีแรงซึ่งโดยปกติจะเป็นแรงดันไอกระทำ ทำให้ของเหลวเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวหน้าโดยตรงโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงสถานะ และปรากฏการณ์ดังกล่าวจะนำไปสู่การแห้งตัวอย่างรวดเร็วโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มการความร้อนเข้าไปอีก ผดุงศักดิ์, 2551 [38]

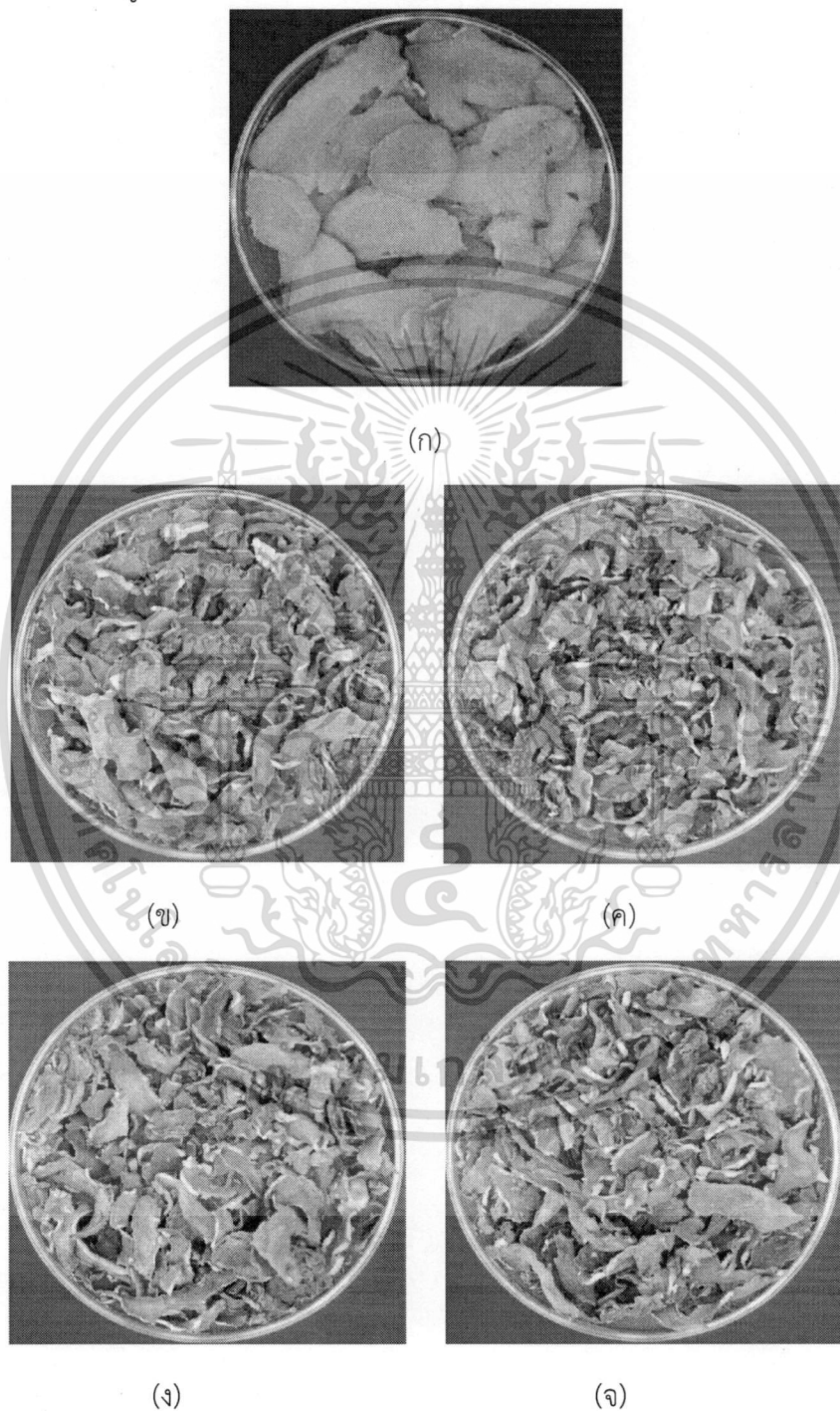
4.3 ผลการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีของไขมันชั้นแผ่นอบแห้ง

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีของไขมันชั้นแผ่นอบแห้งได้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ การเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีของไขมันชั้นแผ่นในระหว่างการอบแห้งแบบต่างๆ การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีของไขมันชั้นแผ่นในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน และการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีของไขมันชั้นแผ่นในระหว่างการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.3.1 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีของไขมันชั้นแผ่นในระหว่างการอบแห้งแบบต่างๆ

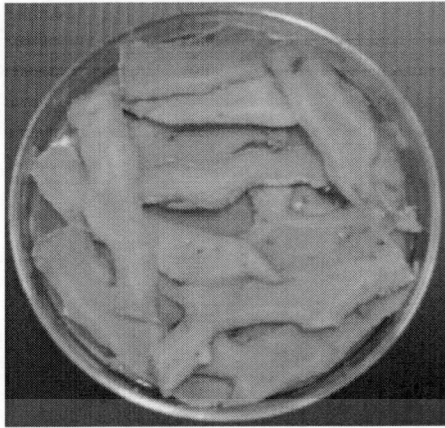
การศึกษาคุณภาพสีของไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยการวัดค่าสีด้วยวิธีระบบสี โดยผลการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ จากผลการศึกษาพบว่าการอบแห้งไขมันชั้นแผ่น จากค่าความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 81.52 ± 3.28 เปอร์เซ็นต์ความชื้น (ฐานเปียก) จนเหลือความสุดท้ายประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ความชื้น (ฐานเปียก) ด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อน ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่

ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส การศึกษาค่าสีของไขมันชั้นแผ่นอบแห้ง ด้วยวัดค่า L^* , a^* และ b^* ของไขมันชั้นแผ่นหลังผ่านการอบแห้งแบบวิธีต่าง ๆ วัดค่าสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer (ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น MiniScan XE PLUS) การเปรียบเทียบคุณภาพสีของไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อน ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ตามที่แสดงในรูปที่ 4.9 - 4.10



รูปที่ 4.9 แสดงสีไขมันชั้นแผ่นที่สภาวะต่าง ๆ (ก) ไขมันชั้นแผ่นสด (ข) ไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อน 50 องศาเซลเซียส (ค) ไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อน 60 องศาเซลเซียส (ง) ไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อน 70 องศาเซลเซียส (จ) ไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อน 80 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

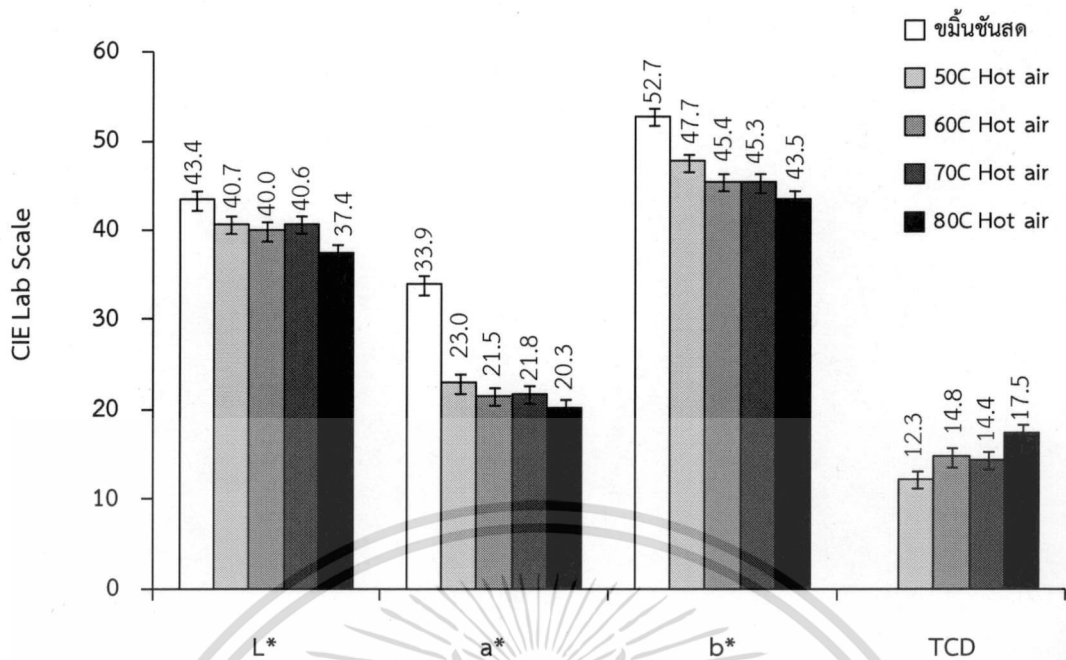
รูปที่ 4.10 แสดงสีขมิ้นชันแผ่นที่สภาวะต่าง ๆ (ก) ขมิ้นชันแผ่นสด (ข) ขมิ้นชันแผ่นอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 50 C (ค) ขมิ้นชันแผ่นอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 60 C (ง) ขมิ้นชันแผ่นอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 70 C (จ) ขมิ้นชันแผ่นอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 80 C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการตีพิมพ์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณภาพสีเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างมากต่อการยอมรับของผู้บริโภคต่อคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตรอบแห้งชนิดต่างๆ จากการวิจัยพบว่าร้อยละ 40 ของผู้บริโภคจะพิจารณาคุณภาพสีเป็นเกณฑ์หลักในการตัดสินใจซื้อ (Assawarachan, 2012) โดยสารให้สีในผลผลิตทางการเกษตรถูกเรียกว่า รงควัตถุ (pigment) ซึ่งสามารถจำแนกตามคุณสมบัติการละลายได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ละลายในไขมันและตัวทำละลายอินทรีย์ได้แก่ คลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ ซึ่งเป็นสารให้สีเขียวและสีเหลือง และกลุ่มที่ละลายได้ในน้ำ ได้แก่ แอนโทไซยานินและฟลาโวนอยด์ ซึ่งเป็นสารให้สีแดงและสีส้ม นอกจากนี้ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผลผลิตทางการเกษตร ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ทั้งในรูปแบบปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์และปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ ดังนั้นในการเปรียบเทียบคุณภาพสีของไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ จะเน้นการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง/มืด (L^*) ซึ่งเป็นผลกระทบโดยตรงของอัตราการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล และการเปลี่ยนแปลงของค่าสีแดง/เขียว (a^*) ซึ่งเป็นผลกระทบของการสูญเสียรงควัตถุในระหว่างการอบแห้ง นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีในระหว่างการอบแห้ง อยู่ในรูปของค่าความแตกต่างสีโดยรวม (TCD) เป็นค่าที่บอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยวิธีการและสภาวะต่างๆ โดยเปรียบเทียบกับค่าสีของไขมันชั้นแผ่นสด (Hunter, Richard Sewall, 1948) [39]

4.3.2 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีของไขมันชั้นแผ่นในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน

จากการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีของไขมันชั้นแผ่น จากรูปที่ 4.11 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบค่าสีไขมันชั้นแผ่นสด กับไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความสว่าง (L^*) ของไขมันชั้นแผ่นสด ไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่า 43.39, 40.72, 39.95, 40.63 และ 37.39 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าความสว่างของไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีค่าความสว่างมากที่สุดแต่ไม่เท่ากับค่าความสว่างของไขมันชั้นแผ่นสด ค่าความเป็นสีแดง/สีเขียว (a^*) ของไขมันชั้นแผ่นสด ไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่า 33.90, 22.96, 21.54, 21.81 และ 20.31 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าความเป็นสีแดงของไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นสีแดงมากที่สุดแต่ไม่เท่ากับค่าความเป็นสีแดงของไขมันชั้นแผ่นสด และค่าความเป็นสีเหลือง/สีน้ำเงิน (b^*) ของไขมันชั้นแผ่นสด ไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่า 52.68, 47.65, 45.37, 45.33 และ 43.50 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าความเป็นสีเหลืองของไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นสีเหลืองมากที่สุดแต่ไม่เท่ากับค่าความเป็นสีแดงของไขมันชั้นแผ่นสด ส่วนค่าความแตกต่างสีโดยรวม (TCD) ไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 12.34, 14.77, 14.42 และ 17.47 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าสีขมิ้นชันแผ่นสดกับขมิ้นชันแผ่นหลังการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส

ผลกระทบของอุณหภูมิจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีหลังการอบแห้งอย่างชัดเจน จะพบว่าค่าความสว่าง (L^*) ของขมิ้นชันแผ่นอบแห้งที่ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่าความสว่างลดลงต่ำกว่าขมิ้นชันแผ่นอบแห้งที่ 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากขมิ้นชันแผ่นอบแห้งที่ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียสจะสัมผัสอากาศร้อนอุณหภูมิต่ำกว่าจึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างลดลงต่ำกว่าเช่นกัน โดยปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาสารประกอบโมโนฟีนอลที่อยู่ในเซลล์พืชสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศและมีเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (PPO) ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชันได้เป็นออร์โท-ไดฟีนอล (o-diphenol) ถึงแม้ว่าขมิ้นชันแผ่นอบแห้งที่ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส จะใช้ตัวกลางอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แต่ทำให้ขมิ้นชันแผ่นสัมผัสกับออกซิเจนเป็นเวลานาน ส่งผลทำให้เร่งปฏิกิริยาสีน้ำตาลด้วยเอนไซม์ PPO กับกรดอะมิโนได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำตาล สอดคล้องกับงานวิจัยของ Therdthai และ Zhou (2009) [37] ซึ่งศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของใบสาระแหน่อบแห้ง พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างที่อุณหภูมิต่ำและใช้เวลานานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเช่นเดียวกัน รวมทั้งผลงานวิจัยของ ฤทธิชัย และคณะ (2554) ซึ่งศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกทับทิมอบแห้งด้วยลมร้อน ในขณะที่การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีค่าความสว่างลดลงสูงกว่า เนื่องจากขมิ้นชันแผ่นได้รับความร้อนมากเกินไปส่งผลทำให้มีการสูญเสียน้ำ มีการสลายตัว (degradation) และมีการรวมตัวกัน (condensation) ของหมู่อะมิโนกับสารประกอบรีดิวซิง พัฒนาการเป็นสารประกอบเชิงซ้อนมีสีเหลืองจนเป็นสีน้ำตาลแดง ดังนั้นสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมต่อการรักษาค่าความสว่างของใบโหระพาอบแห้งที่เหมาะสมควรอยู่ที่ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากในสารประกอบสี หรือ รงค์วัตถุ ในขมิ้นชันแผ่นมีองค์ประกอบของสารแอนโทไซยานิน ซึ่งให้สีปรากฏเป็นสีแดง และสารฟลาโวนอยด์ ซึ่งให้สีปรากฏเป็นสีส้ม ซึ่งทั้งสองมีโครงสร้างทางเคมี

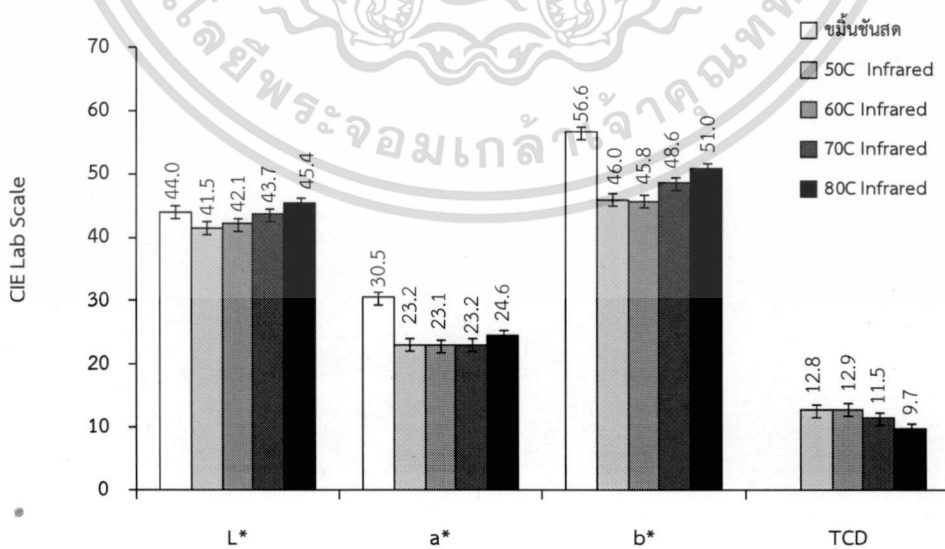
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คล้ายกัน และอยู่ในรูปของไกลโคไซด์ ค่า (a^*) ของไขมันชั้นแผ่นอบแห้งจะมีการเปลี่ยนแปลงที่รุนแรงกว่า ค่า (b^*) เนื่องจากรงควัตถุแอนโทไซยานินที่อยู่ไขมันชั้นแผ่นจะถูกทำลายได้ง่ายในระหว่างการอบแห้ง โดยผลของการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะเร่งอัตราการสลายตัวของรงควัตถุแอนโทไซยานิน ในขณะที่รงควัตถุฟลาโวนอยด์จะมีความสามารถในการทนต่อความร้อนได้ดีกว่า (นิธิยา, 2549) [40]

4.3.3 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีของไขมันชั้นแผ่นในระหว่างการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

จากการศึกษาผลกระทบผลของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีของไขมันชั้นแผ่น จากรูปที่ 4.12 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบค่าสีไขมันชั้นแผ่นสด กับไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความสว่าง (L^*) ของไขมันชั้นแผ่นสด ไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่า 44.02, 41.47, 42.14, 43.67 และ 45.40 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าความสว่างของไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีค่าความสว่างมากที่สุด ค่าความเป็นสีแดง/สีเขียว (a^*) ของไขมันชั้นแผ่นสด ไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่า 30.51, 23.17, 23.07, 23.20 และ 24.61 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าความเป็นสีแดงของไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นสีแดงมากที่สุดแต่ไม่เท่ากับค่าความเป็นสีแดงของไขมันชั้นแผ่นสด และค่าความเป็นสีเหลือง/สีน้ำเงิน (b^*) ของไขมันชั้นแผ่นสด ไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่า 56.60, 46.01, 45.78, 48.57 และ 50.96 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าความเป็นสีแดงของไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นสีเหลืองมากที่สุดแต่ไม่เท่ากับค่าความเป็นสีเหลืองของไขมันชั้นแผ่นสด ส่วนค่าความแตกต่างสีโดยรวม (TCD) ไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 12.78, 12.91, 11.47 และ 9.66 ตามลำดับ

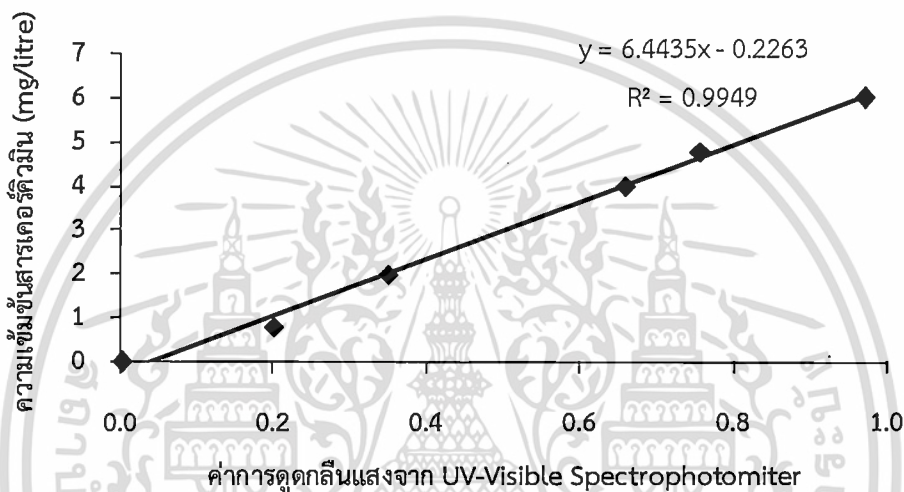


รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าสีไขมันชั้นแผ่นสดกับไขมันชั้นแผ่นหลังการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส

ผลกระทบของรังสีอินฟราเรดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีหลังการอบแห้ง พบว่าค่าความสว่าง (L^*) ของไขมันชั้นแผ่นอบแห้งที่ระดับอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าความสว่างไม่น้อยกว่าไขมันชั้นสด และที่ระดับอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีค่าความสว่างมากที่สุด เมื่อไขมันชั้นแผ่นได้รับความร้อนจากรังสีอินฟราเรดในระหว่างการอบแห้ง น้ำหรือความชื้นในไขมันชั้นแผ่นก็จะถูกเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอทั้งบริเวณผิวนอกและภายใน โครงสร้างเซลล์ของไขมันชั้นแผ่นอย่างรวดเร็วและมีปริมาณความร้อนสูงส่งผลให้เกิดการระเหยของน้ำที่บริเวณผิววัสดุ และภายในวัสดุเกิดการแพร่ความชื้นออกไปสู่ชั้นผิวอย่างรวดเร็ว เมื่อรังสีอินฟราเรดทำให้โมเลกุลของน้ำภายในไขมันชั้นแผ่นเกิดการระเหยเป็นไอน้ำอย่างรวดเร็ว ผลของการเปลี่ยนสถานะนี้ทำให้เกิดการเสียดสีของโมเลกุลของน้ำภายในโครงสร้างเซลล์ชั้นในของไขมันชั้นแผ่นเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอน้ำได้อย่างรวดเร็ว การเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะได้อย่างรวดเร็วนี้นี้จึงไม่มีผลกระทบเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ น้ำฝน และคณะ (2555) [41] ที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของสาหร่ายเตาอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างของสาหร่ายเตาอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงความสว่างมากนักเมื่อเทียบกับค่าความสว่างของสาหร่ายเตาสด ค่าความเป็นสีแดง/สีเขียว (a^*) จะเป็นค่าสีที่สามารถบ่งบอกถึงอัตราการสลายตัวของรงควัตถุ หรือปริมาณสารแอนโทไซยานิน (anthocyanins) ที่หลงเหลือของไขมันชั้นแผ่นอบแห้งในระหว่างการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด โดยไขมันชั้นแผ่นอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ระดับอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีค่า a^* เปลี่ยนแปลงลดลงน้อยที่สุด และค่าความเป็นสีเหลือง/สีน้ำเงิน (b^*) ที่มีองค์ประกอบของสารฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) ซึ่งให้สีปรากฏเป็นสีเหลือง ซึ่งพบว่าระดับอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นสีเหลืองเปลี่ยนแปลงลดลงน้อยที่สุดเช่นกัน โดยบ่งบอกถึงค่า a^* และ b^* มีอัตราการสูญเสียรงควัตถุ สารแอนโทไซยานินและสารฟลาโวนอยด์ ในระหว่างการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยรังสีอินฟราเรด ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส สูงกว่าที่ระดับอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาสารประกอบโมโนฟีนอลที่อยู่ในเซลล์พืชสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศและมีเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (PPO) ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชันได้เป็นออร์โท-ไดฟีนอล (o-diphenol) ถึงแม้ว่าไขมันชั้นแผ่นอบแห้งที่ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส จะใช้ตัวกลางอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แต่ทำให้ไขมันชั้นแผ่นสัมผัสกับออกซิเจนเป็นเวลานาน ส่งผลทำให้การสูญเสียของเหลวที่ประกอบไปด้วยสารอาหารและสารให้เม็ดสีต่างๆ ในไซโทพลาซึม ของรงควัตถุ สารแอนโทไซยานินและสารฟลาโวนอยด์ ดังนั้นสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมต่อการรักษาค่าความสว่างของไขมันชั้นแผ่นอบแห้งที่เหมาะสมควรอยู่ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ค่าความสว่างของไขมันชั้นแผ่นสูง ค่าความเป็นสีแดง/สีเขียว (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง/สีน้ำเงิน (b^*) โดยเป็นค่าสีที่สามารถบ่งบอกถึงอัตราการสลายตัวของรงควัตถุ หรือองค์ประกอบของสารแอนโทไซยานินและสารฟลาโวนอยด์ ซึ่งทั้งสองมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกัน และอยู่ในรูปของไกลโคไซด์ ที่หลงเหลือของไขมันชั้นแผ่นอบแห้งในระหว่างการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่ระดับอุณหภูมิสูงจะสูญเสียค่า L^* a^* และ b^* น้อยกว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่ระดับอุณหภูมิต่ำๆ

4.4 ผลการศึกษาปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมินของขมิ้นชัน

จากผลการศึกษาปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมินของขมิ้นชันแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้สารเมธาโนล เป็นตัวทำละลาย สำหรับการสกัดสารเคอร์คิวมิน หลังจากนั้นนำสารละลายที่สกัดได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารเคอร์คิวมิน โดยใช้หลักการการวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง ของสารที่สกัดได้ด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ โดยใช้ความยาวคลื่นแสง ที่ 420 นาโนเมตรแล้วนำค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสารที่สกัดได้ไปอ่านค่าความเข้มข้นจากเส้นมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (แกน x) กับค่าความเข้มข้นของสารละลายเคอร์คิวมิน (แกน y) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัม/ลิตร (รูปที่ 4.13) จะได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.13 เส้นมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (แกน x) กับค่าความเข้มข้นของสารละลายเคอร์คิวมิน (แกน y) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัม/ลิตร

4.4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมิน

ตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของระดับอุณหภูมิในการอบแห้งขมิ้นชันแผ่นด้วยลมร้อน และการอบแห้งขมิ้นชันแผ่นด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อความเข้มข้นของปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมิน พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน ที่ระดับอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีปริมาณความเข้มข้นของสารสกัดเคอร์คิวมินสูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 0.0707 มิลลิกรัม/มิลลิกรัมขมิ้นชันแห้ง และที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.0651, 0.0665 และ 0.0635 มิลลิกรัม/มิลลิกรัมขมิ้นชันแห้ง ตามลำดับ ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ในขณะที่การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด พบว่าที่ระดับอุณหภูมิของการอบแห้งเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส มีปริมาณความเข้มข้นของสารสกัดเคอร์คิวมินสูงที่สุดเช่นเดียวกับการอบแห้งขมิ้นชันแผ่นด้วยลมร้อน โดยมีปริมาณเคอร์คิวมินเท่ากับ 0.0953 มิลลิกรัม/มิลลิกรัมขมิ้นชันแห้ง และที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.0915, 0.0924 และ 0.0905 มิลลิกรัม/มิลลิกรัมขมิ้นชันแห้ง ตามลำดับ โดยไม่มีความแตกต่างกันมากนักเช่นกัน สาเหตุหนึ่งที่ทำให้ขมิ้นชันที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะอุณหภูมิสูงมีระดับของเคอร์คิวมินนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควิมินสูงนั้น น่าจะเกิดจากสาเหตุที่ว่าในผักและผลไม้ ซึ่งรวมไปถึงไขมันชั้นมีสารประกอบฟีนอล ซึ่งสารประกอบฟีนอลที่มีอยู่ในไขมันชั้นนั้นอยู่ในรูปของรงควัตถุ หรือองค์ประกอบของสารแอนโทไซยานิน ซึ่งให้สีปรากฏเป็นสีแดง และสารฟลาโวนอยด์ ซึ่งให้สีปรากฏเป็นสีเหลือง ซึ่งทั้งสองมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกัน และอยู่ในรูปของไกลโคไซด์ ทั้งนี้สารแอนโทไซยานินและสารฟลาโวนอยด์ ที่เป็นสารองค์ประกอบหลักในสารสกัดเคอร์คิวมินที่มีอยู่ในไขมันชั้น โดยสารประกอบฟีนอลจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา มีการสังเคราะห์ มีการเปลี่ยนแปลง และมีการสลายตัว เกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาสารประกอบโมโนฟีนอลที่อยู่ในเซลล์พืชสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศและมีเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (PPO) ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชันได้เป็นออร์โท-ไดฟีนอล (o-diphenol) ทำลายสารแอนโทไซยานินและสารฟลาโวนอยด์ที่อยู่ในรูปของสารองค์ประกอบหลักในสารสกัดเคอร์คิวมินในไขมันชั้น ถึงแม้ว่าไขมันชั้นแผ่นอบแห้งที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส จะใช้ตัวกลางอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าสภาวะที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แต่ทำให้ไขมันชั้นแผ่นสัมผัสกับออกซิเจนเป็นเวลานาน จึงส่งผลทำให้เร่งปฏิกิริยาการสลายตัวหรือเสื่อมสภาพของสารฟีนอล ซึ่งเป็นสารองค์ประกอบหลักในสารสกัดเคอร์คิวมินในไขมันชั้น ทำให้ปริมาณสารเคอร์คิวมินที่ได้รับมีค่าน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Therdthai and Zhou (2009) [37]

ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นของสารเคอร์คิวมินที่สกัดได้จากไขมันชั้นแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส

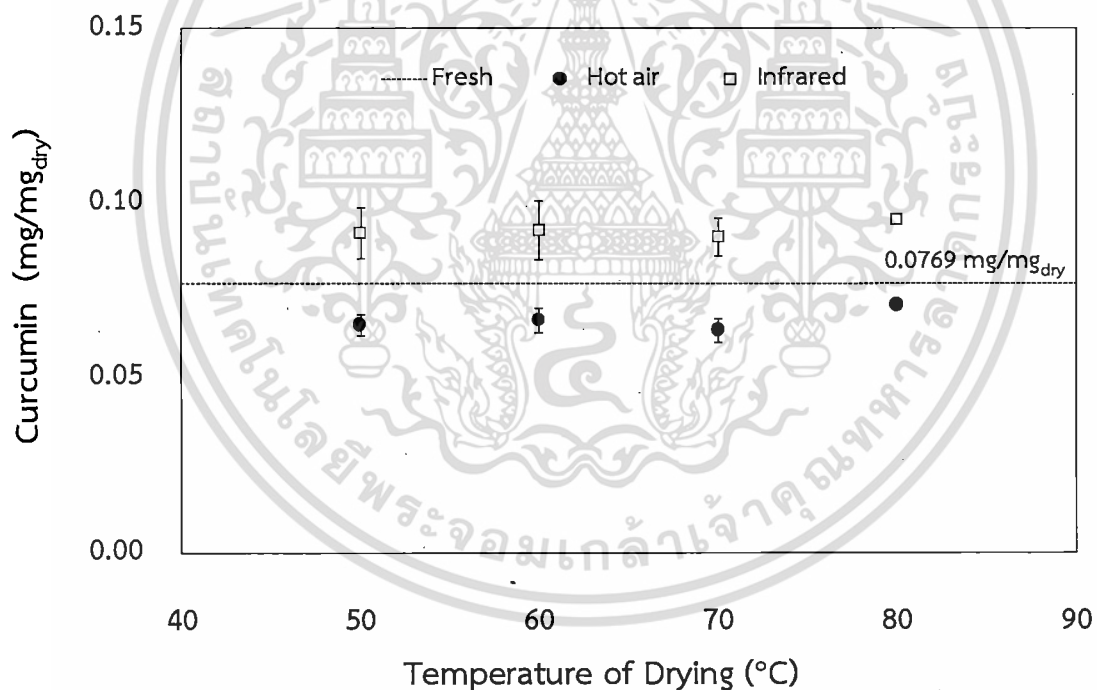
ระดับอุณหภูมิ การอบแห้ง (องศาเซลเซียส)	สารเคอร์คิวมิน (mg/mg dry)		
	การอบแห้งด้วยลมร้อน	การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด	ไขมันชั้นสด
50°C	0.0651	0.0915	0.0769
60°C	0.0665	0.0924	
70°C	0.0635	0.0905	
80°C	0.0707	0.0953	

หมายเหตุ : ปริมาณสารเคอร์คิวมินที่สกัดได้มีหน่วยเป็น (มิลลิกรัม/มิลลิกรัมไขมันชั้นแห้ง)

4.4.2 ผลกระทบของวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกันต่อปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมิน

ผลกระทบของวิธีการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมิน ระหว่างการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยลมร้อน และการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยรังสีอินฟราเรด ที่ระดับต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมินจากไขมันชั้นสดมีค่า 0.0769 มิลลิกรัม/มิลลิกรัมไขมันชั้นแห้ง สำหรับปริมาณของสารสกัดเคอร์คิวมิน จากการอบแห้งไขมันชั้นด้วยลมร้อน ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ

0.0769, 0.0651, 0.0665, 0.0635 และ 0.0707 มิลลิกรัม/มิลลิกรัมไขมันชั้นแห้ง ตามลำดับ สังเกตได้ว่าปริมาณของสารสกัดเคอร์คิวมินในไขมันชั้นสด ในขณะที่ปริมาณของสารสกัดเคอร์คิวมินจากไขมันชั้นที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.0915, 0.0924, 0.0905 และ 0.0953 มิลลิกรัม/มิลลิกรัมไขมันชั้นแห้ง ตามลำดับ สังเกตได้ว่าปริมาณของสารสกัดเคอร์คิวมินในไขมันชั้นแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ทุกระดับอุณหภูมิการทดลอง มีค่าปริมาณของสารสกัดเคอร์คิวมินที่สูงกว่าปริมาณของสารสกัดเคอร์คิวมินในไขมันชั้นสด สาเหตุของเหตุการณ์นี้ได้อธิบายโดยงานวิจัยของ (ผดุงศักดิ์, 2551) [38] ว่าการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยรังสีอินฟราเรดส่งผลกระทบต่อให้ โมเลกุลของน้ำที่ภายนอกไขมันชั้นแผ่นสามารถแลกเปลี่ยนความชื้นได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำภายในโครงสร้างชั้นในที่แพร่ออกมาแทนที่ในรูปของไอน้ำและของเหลวอย่างรวดเร็ว นั้น จะมีแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการแพร่ของโมเลกุลน้ำทำให้เกิดความเสียหายของโครงสร้างเซลล์ของไขมันชั้นจนฉีกขาด การฉีกขาดของผนังโครงสร้างเซลล์นั้น ทำให้เกิดการสูญเสียของเหลวที่ประกอบไปด้วยสารอาหารและสารให้เม็ดสีต่างๆ ในไซโทพลาซึม เช่น สารแอนโทไซยานินและสารฟลาโวนอยด์ เกิดการเคลื่อนย้ายออกมามากกว่าโครงสร้างเซลล์ จึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารสกัดเคอร์คิวมินในไขมันชั้นแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด โดยมีปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมินที่สูงกว่า ทั้งในไขมันชั้นแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน และในไขมันชั้นสด



รูปที่ 4.14 ผลกระทบของวิธีการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมิน

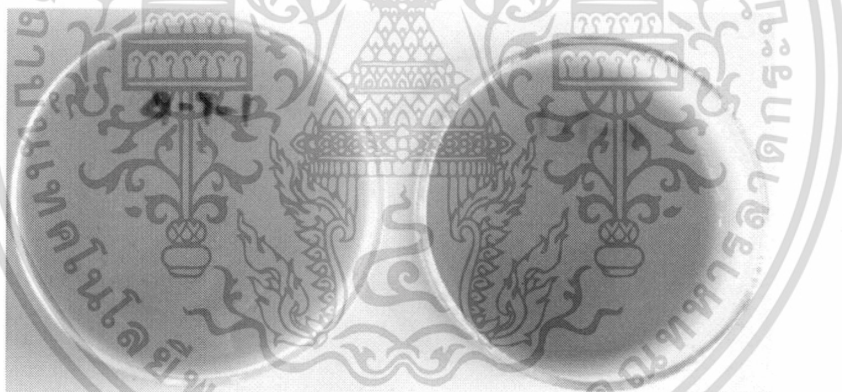
4.5 ผลการตรวจวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ไขมันชั้น

การทดสอบวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ไขมันชั้นได้ประยุกต์ใช้ตามวิธีของเภสัชตำรับของประเทศอังกฤษ ปี 2007 (BP2007) ในหัวข้อ Microbial Limit Test ซึ่งคือการหาจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด จำนวนยีสต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

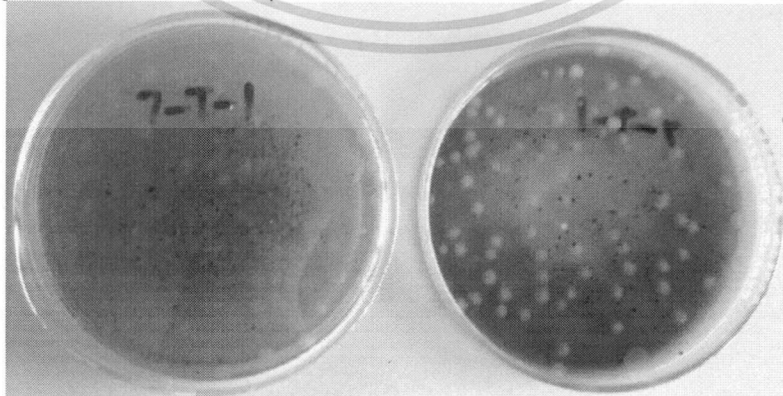
และเรา ใช้วิธี Pour Plate Method และการหาโคลิฟอร์ม ใช้วิธี Most-Probable-Number Method (MPN) โดยใช้ *Escherichia Coli* เป็น Positive Control

4.5.1 การหาจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด และจำนวนยีสต์และรา ใช้วิธี Pour plate method

จากการหาจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด จำนวนยีสต์ และรา โดยใช้วิธี Pour Plate Method ในนมมันชั้นแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด พบว่าจำนวนจุลินทรีย์ในนมมันชั้นแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 0 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม ขณะเดียวกันจำนวนยีสต์และรา ในนมมันชั้นแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 0 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม เช่นเดียวกัน แสดงในรูปที่ 4.15 ไม่พบจุดเชื้อจุลินทรีย์ ยีสต์และรา แต่การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกลับพบว่า จำนวนเชื้อจุลินทรีย์มีค่าสูงกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกำหนดไว้ โดยที่ระดับ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่าจุลินทรีย์เท่ากับ 3×10^2 , 1×10^3 , 8×10^2 และ 4×10^2 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม ตามลำดับ และจำนวนยีสต์และรา มีค่าสูงกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกำหนดไว้เช่นเดียวกัน โดยที่ระดับ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่ายีสต์และรา เท่ากับ 1×10^2 , 8×10^3 , 6×10^2 และ 6×10^2 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม แสดงในรูปที่ 4.16 พบจุดเชื้อจุลินทรีย์ ยีสต์และราเป็นจำนวนมาก แสดงในตาราง 4.6



รูปที่ 4.15 แสดงจำนวนจุลินทรีย์ ยีสต์และรา โดยการอบแห้งด้วยลมร้อน



รูปที่ 4.16 แสดงจำนวนจุลินทรีย์ ยีสต์และรา โดยการอบแห้งด้วยอินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการตีพิมพ์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 การหาโคลิฟอร์ม ใช้วิธี Most-probable-number method (MPN)

จากการหาจำนวนเชื้อโคลิฟอร์ม โดยใช้วิธี Most-probable-number method (MPN) ในนมมันชั้นแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด พบว่าจำนวนเชื้อโคลิฟอร์ม ในนมมันชั้นแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่าน้อยกว่า 3 ต่อตัวอย่าง 1 กรัม แสดงในรูปที่ 4.17 มีผลเป็นลบเนื่องจากไม่เกิดฟอง ซึ่งหมายถึงไม่พบเชื้อโคลิฟอร์ม แสดงให้เห็นว่านมมันชั้นที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน แต่การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกลับพบว่า จำนวนเชื้อโคลิฟอร์ม มีค่าสูงกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกำหนดไว้ โดยที่ระดับ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่าเชื้อโคลิฟอร์มเท่ากับ 1100, 1100, 1100 และ 1100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม ตามลำดับแสดงในรูปที่ 4.18 มีผลเป็นบวก ซึ่งหมายถึงพบเชื้อโคลิฟอร์ม แสดงในตาราง 4.6



รูปที่ 4.17 แสดงจำนวนโคลิฟอร์ม โดยการอบแห้งด้วยลมร้อน (ซ้าย) และโดยการอบด้วยอินฟราเรด (ขวา)

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการตรวจวัดจำนวนจุลินทรีย์ ยีสต์และรา โดยใช้วิธี Pour plate method และผลการตรวจวัดจำนวนโคลิฟอร์ม โดยใช้วิธี Most-probable-number method (MPN)

วิธีการอบแห้ง	ระดับอุณหภูมิ	จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด	จำนวนยีสต์และรา	จำนวนโคลิฟอร์ม	การผ่านเกณฑ์
ลมร้อน (Hot Air)	50°C	ตรวจไม่พบ	ตรวจไม่พบ	<3	ผ่าน
	60°C	ตรวจไม่พบ	ตรวจไม่พบ	<3	ผ่าน
	70°C	ตรวจไม่พบ	ตรวจไม่พบ	<3	ผ่าน
	80°C	ตรวจไม่พบ	ตรวจไม่พบ	<3	ผ่าน
รังสีอินฟราเรด (Infrared)	50°C	3×10^2	1×10^2	1100	ไม่ผ่าน
	60°C	1×10^3	8×10^3	1100	ไม่ผ่าน
	70°C	8×10^2	6×10^2	1100	ไม่ผ่าน
	80°C	4×10^2	6×10^2	1100	ไม่ผ่าน

สาเหตุที่ส่งผลทำให้การอบแห้งไขมันชั้นด้วยรังสีอินฟราเรดไม่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์น่าจะเกิดจากการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยลมร้อนใช้เวลานานกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยรังสีอินฟราเรด ทำให้การถ่ายเทมวลน้ำเป็นไปอย่างช้าๆ และไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างเซลล์ในไขมันชั้น แต่ในขณะเดียวกันการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยรังสีอินฟราเรด สามารถอบแห้งได้ในระยะเวลาสั้นกว่าการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยลมร้อน จึงส่งผลกระทบต่อโครงสร้างภายในของไขมันชั้น ทำให้เซลล์เกิดการฉีกขาด เนื่องจากมวลน้ำในไขมันชั้นแผ่นเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวกลายเป็นไออย่างรวดเร็ว โดยน้ำที่อยู่ในโครงสร้างภายในกลายเป็นไอล้วนดันออกมานอกเซลล์ จึงเกิดการฉีกขาดขึ้น ส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียของเหลวที่ประกอบไปด้วยสารอาหารและสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ ในไซโทพลาซึมแตกออก รวมถึงโปรไบโอติกที่อยู่ในไซโทพลาซึมนั้นออกมาแล้วตาย จึงทำให้โปรไบโอติกเหล่านี้ไม่สามารถควบคุมการโตของ เชื้อจุลินทรีย์ที่ไม่ดีได้ จึงส่งผลให้จำนวนยีสต์และรา และเชื้อโคลิฟอร์ม เจริญเติบโตได้ดีในไขมันชั้นแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรด เมื่อพิจารณาข้อมูลแล้วจะเห็นได้ว่าการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยลมร้อน สามารถนำไปใช้กับกลุ่มเกษตรกรที่ต้องการผลิตไขมันชั้นเพื่อนำไปประกอบอาหารตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ในขณะเดียวกันการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยรังสีอินฟราเรด สามารถตรวจวัดปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมินได้มากกว่าจึงควรนำไปผลิตเป็นยาต่อไป

4.6 ผลการศึกษาหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจากการอบแห้งไขมันชั้นในสภาวะการอบแห้งแบบต่างๆ

การศึกษาค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจากการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นโดยวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด โดยที่ลดความชื้นไขมันชั้นแผ่นจากค่าความชื้นเริ่มต้น 81.52 เปอร์เซ็นต์ความชื้น (ฐานเปียก) จนเหลือความชื้นสุดท้าย 8 เปอร์เซ็นต์ความชื้น(ฐานเปียก) ด้วยวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน ด้วยเครื่องอบแห้งด้วยถาด ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ที่ระดับความเร็วลมคงที่ 0.32 เมตรต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วินาที และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ค่าพลังงานไฟฟ้า ได้วัดด้วยเครื่องวัดพลังงาน (ยี่ห้อ Fluke รุ่น Clamp Meter 322)

ตารางที่ 4.6 แสดงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจากการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยลมร้อนและการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยรังสีอินฟราเรด

ระดับ อุณหภูมิ	จำนวน ยูนิต ที่ใช้ใน 1 วัน(6ชั่วโมง)		จำนวนรอบการใช้งาน ใน 1 วัน		ไขมันชั้นสดที่อบ ได้ต่อวัน		จำนวนที่ใช้ในการอบ ยูนิต/กรัมไขมัน	
					(300กรัม /ครั้ง)	(30กรัม /ครั้ง)		
	ลมร้อน	รังสี อินฟราเรด	ลมร้อน	รังสี อินฟราเรด	ลมร้อน	รังสี อินฟราเรด	ลมร้อน	รังสี อินฟราเรด
50°C	9.88	5.55	0.3	2.0	103	60	0.0960	0.0924
60°C	9.86	5.62	0.5	2.7	138	80	0.0712	0.0702
70°C	9.68	5.68	0.9	3.8	284	114	0.0341	0.0499
80°C	9.86	5.76	1.2	6.0	372	180	0.0265	0.0320

จากตารางที่ 4.6 ได้แสดงผลการทดลองและพบว่าเมื่ออัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเท่ากับ 0.960, 0.712, 0.341, และ 0.265 ยูนิตต่อกรัมไขมันชั้นสด ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งที่ต่ำและใช้เวลาในการอบแห้งนานที่สุด เนื่องจากอากาศที่อุณหภูมิต่ำ มีความชื้นในอากาศสูง ส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความชื้น หรือปริมาณน้ำที่ออกจากระบบได้ไม่ดีในระหว่างการอบแห้ง อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่า ที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งความสามารถในการนำไขมันชั้นสดเข้าไปอบแห้ง โดยระยะเวลาการทำงาน 1 วันต่อ 6 ชั่วโมงการทำงาน จะได้น้ำหนักเท่ากับ 103, 139, 284 และ 372 กรัมไขมันชั้นสด (การอบแห้งด้วยลมร้อนสามารถอบแห้งไขมันชั้นสดครั้งละ 300 กรัม) ในขณะที่การอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยรังสีอินฟราเรด พบว่ามีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้ง เท่ากับ 0.0924, 0.0702, 0.0499, และ 0.0320 ยูนิตต่อกรัมไขมันชั้นสด ที่ระดับอุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และพบว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งที่ต่ำและใช้เวลาในการอบแห้งนานที่สุดเช่นกัน ซึ่งความสามารถในการนำไขมันชั้นสดเข้าไปอบแห้ง โดยระยะเวลาการทำงาน 1 วันต่อ 6 ชั่วโมงการทำงาน จะได้น้ำหนักเท่ากับ 60, 80, 114 และ 180 กรัมไขมันชั้นสด (การอบแห้งด้วยอินฟราเรดสามารถอบแห้งไขมันชั้นสดครั้งละ 30 กรัม)

ดังนั้นวิธีการอบแห้งไขมันชั้นที่เหมาะสมที่สุด คือการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด เนื่องจากมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานใกล้เคียงกัน แต่ในการทดลองการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดนั้นสามารถนำไขมันชั้นสดเข้าไปอบได้ปริมาณต่ำกว่าการอบแห้งด้วยอินลมร้อน ซึ่งพื้นที่ของหลอดรังสีอินฟราเรดมีพื้นที่แคบ อีกทั้งการอบแห้งด้วย

รังสีอินฟราเรดยังเป็นระบบเปิด จึงไม่สามารถชะลอหรือกักเก็บความร้อนที่หลอดรังสีอินฟราเรดปล่อยออกมา มีผลให้เกิดการสูญเสียความร้อนบางส่วนไปกับอากาศแวดล้อม ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้ง แต่ระยะเวลาในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอยู่มาก โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุภวรรณ และคณะ (2555) ซึ่งได้ทำการอบแห้งขนุนด้วยรังสีอินฟราเรดเปรียบเทียบกับการอบแห้งขนุนด้วยลมร้อน พบว่าการอบแห้งด้วยการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว ที่อุณหภูมิอบแห้ง 59.3 องศาเซลเซียส กำลังของรังสีอินฟราเรดเท่ากับ 1,000 Watt ระยะเวลาในการอบแห้ง 115 นาที สามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการตีพิมพ์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาอิทธิพลของวิธีการอบแห้ง และสภาวะการอบแห้งแบบต่างๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางกายภาพของไขมันชั้นแผ่น ด้วยวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเร็วลมที่ระดับ 0.32 เมตร/วินาที โดยผลการทดลองทั้งหมดแบ่งออกเป็น 6 ส่วนด้วยกันคือ ผลการศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งทางกายภาพเบื้องต้นของไขมันชั้น, ผลการศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง, ผลการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีของไขมันชั้นแผ่นอบแห้ง, ผลการศึกษาปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมินของไขมันชั้น, ผลการตรวจวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ไขมันชั้น และผลการศึกษาหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจากการอบแห้งไขมันชั้นในสภาวะการอบแห้งแบบต่างๆ ดังนั้นในบทนี้ได้นำเสนอในส่วนสรุปผลการวิจัยใน 6 ส่วนที่กล่าวไปข้างต้น ทั้งนี้ ข้อเสนอแนะที่ควรเพิ่มเติมเพื่อให้งานทดลองสมบูรณ์มากขึ้นได้นำมาแนะนำเสนอในบทนี้เช่นกัน

5.1 สรุปผลการทดลอง

คุณลักษณะการอบแห้งเบื้องต้นของไขมันชั้นแผ่น มีความชื้นเริ่มต้นของไขมันชั้นแผ่นเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 81.52 ± 3.28 เปอร์เซ็นต์ความชื้น (ฐานเปียก) และความชื้นสมดุลของไขมันชั้นแผ่น อบแห้ง ด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่าความชื้นสมดุลเท่ากับ 6.41 ± 0.09 , 6.09 ± 0.02 , 5.82 ± 0.05 และ 5.57 ± 0.04 เปอร์เซ็นต์ความชื้น (ฐานเปียก) ตามลำดับ ในขณะที่การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเท่ากับ ศูนย์ สำหรับผลกระทบของวิธีการอบแห้งและสภาวะการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของไขมันชั้นแผ่นแห้ง ของการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดจนเหลือความชื้นสุดท้ายที่ประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ความชื้น (ฐานเปียก) พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นเร็วกว่าที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลา 290 นาที การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ใช้เวลาในการ อบแห้ง 60 นาที ซึ่งเร็วกว่าการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศา ดังนั้นในการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยรังสีอินฟราเรด ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการกึ่งพหุคูณ ที่สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมของการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นที่เหมาะสมที่สุดคือ แบบจำลองของ *Page* มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ระดับ 0.99 ซึ่ง เป็นช่วงที่ดีที่สุดจากแบบจำลองทั้งหมด ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของไขมันชั้นแผ่น ในการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยลมร้อน และการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยรังสีอินฟราเรด มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของไขมันชั้นแผ่น อยู่ในช่วง 0.89×10^{-9} – 3.69×10^{-9} และ 5.24×10^{-9} – 18.82×10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดส่งผลต่อการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของไขมันชั้นแผ่นมากที่สุด

สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าสีของไขมันชั้นแผ่นในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าเป็นสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมต่อการรักษาค่าความสว่าง ค่าสีแดงและค่าสีเหลืองของไขมันชั้นแผ่น โดยมีค่าความสว่างเท่ากับ 43.39, 22.96 และ 47.65 ตามลำดับ ส่วนค่าความสว่าง ค่าสีแดงและค่าสีเหลืองของไขมันชั้นแผ่นจะถูกทำลายสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การอบแห้งด้วยลมร้อนมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีมากที่สุด ในขณะที่ การเปลี่ยนแปลงสีของไขมันชั้นแผ่นในระหว่างการอบแห้งรังสีอินฟราเรด ที่ระดับอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมต่อการรักษาค่าความสว่าง ค่าสีแดงและค่าสีเหลือง โดยมีค่าเท่ากับ 45.40, 24.61 และ 50.96 ตามลำดับ จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งไขมันชั้นด้วยรังสีอินฟราเรด จากการศึกษาผลกระทบของการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงสีของไขมันชั้นแผ่น พบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดสามารถรักษาค่าสีได้ดีที่สุด ผลผลิตทางการเกษตรที่ใช้วิธีการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือก เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่คงคุณภาพสีได้ใกล้เคียงกับผลผลิตสด

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบแห้งไขมันชั้นแผ่นไม่มีผลต่อปริมาณสารเคอร์คิวมินที่สกัดได้ในแต่ละวิธีการอบแห้ง แต่การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดสามารถเพิ่มปริมาณสารสกัดเคอร์คิวมินให้มากกว่าปริมาณสารเคอร์คิวมินที่สกัดได้ในไขมันชั้นสด และที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน

การอบแห้งไขมันชั้นแผ่นด้วยลมร้อน มีผลให้การตรวจหาเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และจำนวนยีสต์และรา ในไขมันชั้นอบแห้งด้วยลมร้อน ตรวจไม่พบจุลินทรีย์ทั้งหมด และจำนวนยีสต์และรา แต่ในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ตรวจพบว่ามีจุลินทรีย์ทั้งหมด และจำนวนยีสต์และรา เมื่อนำไปหาจำนวนโคลิฟอร์ม พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนตรวจพบจำนวนโคลิฟอร์มน้อย แต่การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดตรวจพบโคลิฟอร์มสูง

เมื่อวิเคราะห์ค่าพลังงานสำหรับการอบแห้ง พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนมีอัตราการใช้พลังงานมากที่สุดเท่ากับ 0.0960 ยูนิตต่อกรัมไขมันชั้นสด และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด มีอัตราการใช้พลังงานมากที่สุดเท่ากับ 0.0924 ยูนิตต่อกรัมไขมันชั้นสด ดังนั้นวิธีการอบแห้งไขมันชั้นที่เหมาะสมที่สุด คือการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

จากที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าการอบแห้งไขมันชั้นด้วยลมร้อนสามารถนำผลิตภัณฑ์ไปใช้ประโยชน์เป็นยาสมุนไพร หรือใช้ประโยชน์ได้โดยตรงไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อใดๆเพิ่มเติม แต่ถ้ามีความประสงค์จะนำไขมันชั้นไปใช้เพื่อเป็นวัตถุดิบสำหรับการสกัดสารเคอร์คิวมิน การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดทำให้มีผลผลิตที่มีปริมาณเคอร์คิวมินสูงกว่าแต่อย่างไรก็ตาม ต้องพิจารณาถึงการเก็บรักษาด้วยเนื่องจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีแนวโน้มที่เป็นแหล่งเพาะเชื้อจุลินทรีย์ได้ง่ายกว่าไขมันชั้นที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1.ควรมีการศึกษาเพิ่มเติม เกี่ยวกับผลกระทบของสภาวะการอบแห้งด้วยวิธีต่างๆ ต่ออัตราการสลายตัวของสารออกฤทธิ์สำคัญ สารที่มีคุณค่าทางเภสัชวิทยา สารอาหารที่สำคัญต่างๆ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ รวมทั้งการนำไขมันชั้นอบแห้งไปทดสอบการต้านฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น การนำไปผสมในอาหารเพื่อศึกษาผลของการต้านการออกซิเดชันในอาหาร

2.ควรศึกษาเพิ่มเติมในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มปริมาณสารสกัดออกฤทธิ์สำคัญ สารที่มีคุณค่าทางเภสัชวิทยา และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของขมิ้นชันอบแห้ง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเสริมและอาหารสำเร็จต่างๆ

3.ควรศึกษาเพิ่มเติมในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งขมิ้นชันต่อปริมาณการสกัดน้ำมันหอมระเหยในขมิ้นชัน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเสริมและอาหารสำเร็จต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการตีพิมพ์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] วุฒิ วุฒิชัยธรรมเวช. 2540. สารานุกรมสมุนไพร. กรุงเทพฯ : โอ.เอส.พรีนติ้งเฮาส์, กรุงเทพฯ
- [2] พเยาว์ เหมือนวงษ์ญาติ. 2539. ขมิ้นชนิดต่าง ๆ. ฉลาดบริโภค 21 (ฉบับกาญจนาภิเษก) : 69-76.
- [3] จเร สดากร. 2526. ขมิ้น (Turmeric). หนังสือพิมพ์กสิกร 56 (6) : 260 – 264.
- [4] นิจศิริ เรืองรังษี และ พะยอม ตันติวัดน์. 2542. พืชสมุนไพร. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.
- [5] พิทยา สรวมศิริ. 2529. พืชเครื่องเทศ (SPICES). มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- [6] Pfeiffer E., Hohle S., Solyom A.M. and Metzler M. 2003. Studies on the stability of turmeric constituents. J. Food Eng. 56 : 257-259.
- [7] พะยอม ตันติวัดน์. ม.ป.ป. เครื่องเทศ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- [8] กองวิจัยและพัฒนาสมุนไพร. 2549. สมุนไพรพื้นฐาน (ฉบับรวม). กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข. (กรุงเทพฯธุรกิจ, 2547)
- [9] Jayaprakasha G.K., Rao L.J.M. Sakariah K.K. (2005) Chemistry and biological activities of C. longa. Trends in Food Science & Technology, 16(12): 533-548.
- [10] บัญญัติ สุขศรีงาม. 2543. ขมิ้น. [ออนไลน์] [อ้างถึงเมื่อ 4 มกราคม 2548] เข้าถึงได้จาก: http://www.elib-online.com/docyors/herb_curcuma01.html
- [11] สำนักงานข้อมูลสมุนไพร คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2543. สมุนไพรไทยที่ใช้ในงานสาธารณสุขมูลฐาน : ขมิ้น. [ออนไลน์] [อ้างถึงเมื่อ 15 ธันวาคม 2547] เข้าถึงได้จาก : <http://www.medplant.mahidol.ac.th/pubhealth/curcuma.html>
- [12] สมชาติ โสภณรัตนฤทธิ์ (2540). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท, กรุงเทพฯ: โครงการส่งเสริมการสร้างตำรา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [13] สุคนธ์ชื่น ศรีงาม. (2549). วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [14] สุเนตร สืบคำ และฤทธิชัย อัครราชันย์. 2554. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวัสดุพรุณ. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 17(1): 59-66
- [15] Kaleemullah, S. and Kailappan, R. 2005. Modelling of thinlayer drying kinetics of red chillies. Journal of Food Engineering 76: 531-537.
- [16] Waewsak, J., Chindaruksa, S. and Punlek, C. 2006. A mathematical modeling study of hot air drying for some agricultural products. Journal of Science and Technology. 11(1): 14-20.
- [17] Dadali, G., Apar, D.K. and Özbek, B. 2007. Microwave drying kinetics of okra. Drying Technology. 25(5): 917-924.
- [18] McMinn, W.A.M. 2006. Thin-layer modeling of the convective, microwave, microwave-convective and microwave vacuum drying of lactose powder. Journal of Food Engineering. 72: 113-123.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [19] Kingsly, A.R.P. and Singh, D.B. 2007. Drying kinetics of pomegranate arils. *Journal of Food Engineering* 79: 741-744.
- [20] Vega, A., Fito, P., Andrés, A. and Lemus, R. 2007. Mathematical modeling of hot-air drying kinetics of red bell pepper (var. Lamuyo). *Journal of Food Engineering*. 79: 1460-1466.
- [21] Assawarachan, R., Nookong, M., Chailungka N and Amornlerdpison, D. 2013. Effects of microwave power on the drying characteristics, color and phenolic content of *Spirogyra* sp. *Journal of Food, Agriculture & Environment*. 11(1): 15-18.
- [22] Wu, J. and Hu, X. 2007. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research International*. 40: 39-44.
- [23] Lin, T.M. Durance, T.D and Scaman, C.H. 1998. Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices. *Food research International*. 31: 111-117.
- [24] Maskan, M., 2000. Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering* 44: 71-78.
- [25] Hu, Q., M. Zhang, Mujumdar, S., Xiao, G and Sun, J. 2005. Drying of edamames by air and vacuum microwave combination. *Journal of Food Engineering*. 77: 977-982.
- [26] Doymaz, I. 2006. Thin-layer drying behavior of mint leaves. *Journal of Food Engineering* 74: 370- 375.
- [27] Sakai, N. and Hanzawa, T. 1994. "Applications and advances in far-infrared heating in Japan". *Trends in Food Science & Technology*. 5: 357-362.
- [28] Cihan, A., Kahveci, K., Hacıhafizoglu, O., 2007a. Modeling of intermittent drying of thin layer rough rice. *Journal of Food Engineering* 79, 293-298.
- [29] Wu, J. and Hu, X. 2007. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research International*. 40: 39-44.
- [30] Abe, T. and Afzal, T. M., 1997, Thin-Layer Infrared Radiation Drying of Rough Rice, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 67: 289-297
- [31] กิตติศักดิ์ วิจิรัตน์กิตติ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และอดิศักดิ์ นาถกรณกุล. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4 ประจำปี 2546, วิศวกรรมเกษตรและเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน วันที่ 13-14 มีนาคม 2546. ณ ศูนย์ โสม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ. เลขหน้า 230. (666 หน้า) 2546
- [32] ศรีมา แจ้คา สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และอดิศักดิ์ นาถกรณกุล, 2546, การอบแห้งผลไม้และสมุนไพรโดยใช้ป้อนความร้อนร่วมกับอินฟราเรดไกล, การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5, 26-27 เมษายน 2546, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, หน้า 22-28.
- [33] AOAC. 2005. *Official Methods of Analysis*. 18th Edn., Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC., USA.

- [34] โฆษิต ประเสริฐสุด. 2547. อิทธิพลของระดับความสูงของพื้นที่และอายุการเก็บเกี่ยวต่อผลผลิต ปริมาณ น้ำมันหอมระเหยและสารเคอร์คูมินในขมิ้นชัน.วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตศึกษา คณะ เกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [35] อภิญญา จันทรวัดนะ. เทคนิคพื้นฐานทางจุลชีววิทยา (521302 Agro-Industry Microbiology Laboratory)
- [36] Özbek, B. and Dadali, G. 2007. Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment, *Journal of Food Engineering*. 83: 541-549.
- [37] Therdthai, N and Zhou, W. 2009. Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen). *Journal of Food Engineering*. 91: 482-489
- [38] ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2551. พื้นฐานการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [39] Hunter, Richard Sewall (July 1948). "Photoelectric Color-Difference Meter". *JOSA* 38 (7): 661. (Proceedings of the Winter Meeting of the Optical Society of America)
- [40] นิธิยา รัตนานนท์ (2549). เคมีอาหาร, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ โอ เอส พรินต์ติ้ง เฮาส์
- [41] น้ำฝน ไชยลังกา, รัตนาภรณ์ จันทร์ทิพย์, ดวงพร อมรเลิศพิศาล และ ฤทธิชัย อัครวราชันย์. 2555. ผลกระทบของระดับพลังงานไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของสาหร่ายเตา อบแห้ง. การประชุมวิชาการ ประมง ครั้งที่ 7. มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่.
- [42] สุภวรรณ ภูริระวณิชกุล, สากีนา ลาแมปะ และ ยุพธนา ภูริระวณิชกุล. 2555. การอบแห้งขนุนด้วยพลังงานความร้อนร่วมของรังสีอินฟราเรด/ไมโครเวฟ และลมร้อน : จลนพลศาสตร์คุณภาพและการทดสอบประสาทสัมผัส. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 17: 117-129