

การศึกษาการใช้รังสีอินฟราเรดคลื่นยาวเพื่อเพิ่มสารต้านอนุมูลอิสระ
ในใบหม่อนแห้งขงติ่ม



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2563

การศึกษาการใช้รังสีอินฟราเรดคลื่นยาวเพื่อเพิ่มสารต้านอนุมูลอิสระ
ในใบหม่อนแห้งขงติ่ม



สุทธิดา กัษณะนา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

สำนักบริหารและพัฒนาระบบราชการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การศึกษาการใช้รังสีอินฟราเรดคลื่นยาวเพื่อเพิ่มสารต้านอนุมูลอิสระ
ในใบหม่อนแห้งขงติ่ม

สุทธิดา กัณณะนา

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หยาดฝน ทนงการกิจ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวัฒน์ นิต์ศน์วิจิตร)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(รองศาสตราจารย์ ดร.จตุรภัทร วาฤทธิ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รักษาการแทนรองอธิการบดี ปฏิบัติการแทน

อธิการบดีมหาวิทยาลัยแม่โจ้

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การศึกษาการใช้รังสีอินฟราเรดคลื่นยาวเพื่อเพิ่มสารต้านอนุมูลอิสระ ใน ไบหม่อนแห้งขงตี๋ม
ชื่อผู้เขียน	นางสาวสุทธิดา กันวะนา
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หยาดฝน ทนงการกิจ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการผลิตไบหม่อนแห้งขงตี๋มที่เหมาะสม โดยได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนคือ ในส่วนแรกทำการศึกษาผลของการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C ต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่เหมาะสมและอุณหภูมิการอบแห้งที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากสมบัติทางกายภาพได้แก่ ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้และสี และสมบัติทางเคมีได้แก่ สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระที่ใกล้เคียงกับไบหม่อนสดมากที่สุด ในส่วนที่สองทำการศึกษาผลของของการอบแห้งไบหม่อนด้วยอินฟราเรดที่กำลัง 250 500 และ 750 W ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิที่เหมาะสมซึ่งได้จากผลการศึกษาในส่วนแรก ต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่เหมาะสมและสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากสมบัติทางกายภาพได้แก่ ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้และสี และสมบัติทางเคมีได้แก่ สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระที่ใกล้เคียงกับไบหม่อนสดมากที่สุด จากนั้นในส่วนที่สามทำการศึกษาความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ โดยผลการศึกษาพบว่าเวลาที่ใช้ในการอบไบหม่อนด้วยลมร้อน ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 75-85% ฐานเปียกจนเหลือความชื้นต่ำกว่า 10% ฐานเปียก ที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C เท่ากับ 213 135 และ 105 นาที ตามลำดับ โดยที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Logarithmic สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งไบหม่อนด้วยลมร้อนได้เหมาะสมที่สุด เมื่อพิจารณาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไบหม่อนหลังการอบแห้งพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C มีค่าใกล้เคียงกับไบหม่อนสดมากที่สุด ดังนั้นในการศึกษาส่วนที่สองคือการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมลมร้อนจะทำการควบคุมอุณหภูมิลมร้อนไว้ที่ 50 °C โดยผลการศึกษาพบว่า เวลาการอบแห้งด้วยอินฟราเรดที่กำลัง 250 500 และ 750 W ร่วมลมร้อนที่ 50 °C เท่ากับ 128 123 และ 106 นาที ตามลำดับ โดยที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified Page สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งไบหม่อนด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนได้เหมาะสมที่สุด เมื่อพิจารณาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไบหม่อนหลังการอบแห้งพบว่า การอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด

750 W ร่วมลมร้อน 50°C ส่งผลให้มีค่าใกล้เคียงกับไบหม่อนสดมากกว่าการอบแห้งไบหม่อนด้วยอินฟราเรด 250 และ 500 W ร่วมลมร้อน 50°C และการใช้ลมร้อน 50°C เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ผลการทดลองในส่วนที่สามพบว่า การอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ถึง 39.91-50.95% ดังนั้นพิจารณาจากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าการอบแห้งด้วยอินฟราเรดที่กำลัง 750 W ร่วมลมร้อน 50 °C เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบหม่อนแห้งขงติ่ม

คำสำคัญ : จลนศาสตร์, สารต้านอนุมูลอิสระ, การอบแห้ง, อินฟราเรด



Title	Investigation of far infrared application for enhancing antioxidants in dried mulberry for infusion
Author	Miss Suttida Kunvana
Degree	Master of Engineering in Food Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Yardfon Tanongkankit

ABSTRACT

The objective of this research is to study the production process of the dried mulberry for infusion. The study is divided into three parts. In the first part the effects of hot air drying at 50, 60 and 70 °C as drying kinetics the suitable drying mathematical model and optimum drying temperature, were studied as well as determination of physical properties, including water activity and color and chemical properties, including phenolic content, flavonoid content and antioxidant activity closer to the fresh mulberry. In the second part the effects of the drying of the mulberry leaves with infrared at 250, 500 and 750 W combined with hot air at the optimum temperature, which was obtained from the results of the first part, to drying kinetics the suitable drying mathematical model and optimum drying temperature, determination of physical properties including water activity and color and chemical properties including phenolic content, flavonoid content and antioxidant activity closer to the fresh mulberry were studied. Therefrom, in the third part the study centered on the specific energy consumption used for drying at various conditions. The results of the study showed the time in drying the mulberry leaves with hot air drying which had initial moisture content of 75-85% wet-base until the moisture content is lower than 10% wet-base at temperatures of 50, 60 and 70 °C took 213 135 and 105 minutes respectively. The Logarithmic mathematical model was the best and most suitable in describing the behavior of the mulberry leaves with hot air drying. For physical and chemical properties of the dried mulberry leaves, it was found that dried mulberry leaves at 50°C exhibited the highest color value, phenolic content, flavonoid content

and antioxidant activity. Therefore, in the second part of the study, the combined infrared and hot air drying controlled the hot air temperature at 50 °C. The infrared drying time at 250, 500 and 750 W combined with hot air at 50 °C took 128, 123 and 106 minutes respectively. The Modified Page mathematical model being the best describing the behavior of the mulberry leaves with combined infrared and hot air drying was most suitable. When considering physical and chemical properties of the dried mulberry leaves, it was found that drying at the infrared power of 750 W combined with hot air 50°C the effect was similar to that of fresh mulberry leaves more than the mulberry drying by infrared 250 and 500 W combined with 50°C hot air and 50°C hot air drying. Moreover, the results of the experiment in the third part show that combined infrared and hot air drying has a specific energy consumption of 39.91-50.95% which lower than that of hot air drying. Therefore, considering all the results, it can be concluded that the infrared drying at 750 W with 50 °C of hot air is the most suitable condition for dried mulberry for infusion.

Keywords : Kinetic, Antioxidants, Drying, Infrared

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทยาดฝน ทนงการกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางในการศึกษา ค้นคว้าและงานวิจัย ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชนวัฒน์ นิต์ศน์ วิจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่อบรมสั่งสอนให้ความรู้ แนะนำแนวทางในการทำวิจัยและตรวจสอบความบกพร่องในการเขียนวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภัทวรา ปฐมรังษิยังกุล ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม ที่ค่อยสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำงานวิจัย และขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อเสาร์แก้ว กัณณะนา และคุณแม่จรรยา กัณณะนา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษา และค่าใช้จ่ายต่างๆ รวมถึงพี่ๆ เพื่อนๆ และผู้เกี่ยวข้องทุกคนที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำวิจัยจนทำให้โครงการงานวิจัยนี้สำเร็จ ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

สุทธิดา กัณณะนา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
สารบัญภาพผนวก.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการตรวจเอกสาร.....	4
ใบหม่อน.....	4
การอบแห้ง.....	5
การอบแห้งลมร้อน.....	10
อินฟราเรด.....	11
การอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน.....	15
แบบจำลองการอบแห้ง.....	17
สารต้านอนุมูลอิสระ.....	18
ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้.....	21

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	34
วัตถุประสงค์	34
อุปกรณ์และเครื่องมือ	34
สารเคมี.....	35
วิธีดำเนินการวิจัย	36
การศึกษาการอบใบหม่อน	37
การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	43
สถานที่ดำเนินการวิจัย.....	43
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์	44
การศึกษาการอบใบหม่อนด้วยลมร้อน	44
การศึกษาการอบแห้งใบหม่อนด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน	53
การศึกษาความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและการ อบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน	60
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	62
สรุปผลการศึกษา.....	62
ข้อเสนอแนะ.....	63
บรรณานุกรม.....	64
ภาคผนวก.....	68
ภาคผนวก ก ใบหม่อน เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการหาความชื้น และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	69
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	76
ภาคผนวก ค บทความวิชาการที่ได้นำเสนอและตีพิมพ์เผยแพร่.....	88
ประวัติผู้วิจัย.....	97

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของวิธีการอบแห้งต่าง ๆ	16
ตารางที่ 2 รูปแบบสมการของแบบจำลองการอบแห้งแบบต่าง ๆ.....	17
ตารางที่ 3 สรุปรงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
ตารางที่ 4 อัตราการอบแห้งเฉลี่ย ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล เวลาอบแห้งและ ความชื้นสุดท้ายของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน.....	45
ตารางที่ 5 ค่าคงที่ของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน	47
ตารางที่ 6 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของ ใบหม่อนสด และใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน . ที่อุณหภูมิต่างๆ	50
ตารางที่ 7 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีของใบหม่อนสด ใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ	52
ตารางที่ 8 อัตราการอบแห้งเฉลี่ย ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล เวลาการอบแห้งและ .. ความชื้นสุดท้ายของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน	54
ตารางที่ 9 ค่าคงที่ของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน	55
ตารางที่ 10 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลม ร้อน.....	58
ตารางที่ 11 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน..	59
ตารางที่ 12 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและการ อบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน	61

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ลักษณะใบหม่อน	5
ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง	8
ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับอัตราการอบแห้ง	9
ภาพที่ 4 กลไกการอบแห้งด้วยลมร้อน	10
ภาพที่ 5 ความเข้มของการแผ่รังสีอินฟราเรดของหลอดอินฟราเรดช่วงไกลและหลอดอินฟราเรดช่วงใกล้ (μm).....	12
ภาพที่ 6 ฮีตเตอร์แบบแผ่น	13
ภาพที่ 7 ฮีตเตอร์แบบแท่ง	14
ภาพที่ 8 ฮีตเตอร์แบบหลอด	14
ภาพที่ 9 กลไกการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมลมร้อน	16
ภาพที่ 10 ตัวอย่างโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิก	20
ภาพที่ 11 ตัวอย่างโครงสร้างของฟลาโวนอยด์	21
ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในอาหารและค่าแอกติวิตีของน้ำในอาหารทั่วไป	22
ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอกติวิตีของน้ำในอาหารและปริมาณความชื้นในอาหารที่มีความชื้นต่ำ.....	23
ภาพที่ 14 แผนภาพสีแดง Hue Value และ Chroma	24
ภาพที่ 15 CIE Lab แสดง L^* , a^* , b^* Color space.....	25
ภาพที่ 16 แผนผังการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด	37
ภาพที่ 17 เครื่องอบแห้ง.....	38
ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน 45	
ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งด้วยลมร้อนเทียบกับแบบจำลอง Logarithmic	49

ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนโดยใช้ลมร้อนที่ 50 °C..... 54

ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนโดยใช้ลมร้อนที่ 50 °C เทียบกับแบบจำลอง Modified Page..... 57



สารบัญภาพผนวก

	หน้า
ภาพผนวกที่ 1 ใบหม่อนที่ใช้ในการทดลอง.....	70
ภาพผนวกที่ 2 เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการหาความชื้น.....	70
ภาพผนวกที่ 3 เครื่องวัดวอเตอร์แอกติวิตี.....	71
ภาพผนวกที่ 4 เครื่องวัดค่าสี.....	71
ภาพผนวกที่ 5 ใบหม่อนหลังการอบแห้ง.....	72
ภาพผนวกที่ 6 สกัดตัวอย่างใบหม่อน.....	72
ภาพผนวกที่ 7 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด.....	73
ภาพผนวกที่ 8 การวิเคราะห์สารประกอบฟลาโวนอยด์ทั้งหมด.....	73
ภาพผนวกที่ 9 การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH.....	74
ภาพผนวกที่ 10 การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ FRAP.....	74
ภาพผนวกที่ 11 เครื่องวัดค่าพลังงาน.....	75
ภาพผนวกที่ 12 การใส่ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง.....	77
ภาพผนวกที่ 13 การเลือกวิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น.....	78
ภาพผนวกที่ 14 การใส่สมการในการวิเคราะห์และหาค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ k.....	79
ภาพผนวกที่ 15 ผลการวิเคราะห์ค่า k.....	79
ภาพผนวกที่ 16 การเลือกวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	80
ภาพผนวกที่ 17 วิธีการเลือกเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT).....	80
ภาพผนวกที่ 18 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของอัตราการอบแห้งเฉลี่ย ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพ เวลาอบแห้งและความชื้นสุดท้ายของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน.....	81
ภาพผนวกที่ 19 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของสมบัติทางกายภาพของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน.....	82

ภาพผนวกที่ 20 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของสมบัติทางเคมีของไบโหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน.....	83
ภาพผนวกที่ 21 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของอัตราการอบแห้งเฉลี่ย ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพ เวลาอบแห้งและความชื้นสุดท้ายของไบโหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน	84
ภาพผนวกที่ 22 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของสมบัติทางกายภาพของไบโหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน.....	85
ภาพผนวกที่ 23 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของสมบัติทางเคมีของไบโหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน.....	86
ภาพผนวกที่ 24 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าพลังงานจำเพาะของไบโหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน.....	87



บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

หม่อน หรือ มัลเบอร์รี่ (Mulberry) เป็นไม้ยืนต้น มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Morus alba* L. เป็นพืชเศรษฐกิจที่ปลูกกันมากในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ในอดีตใบหม่อนจะถูกนำไปใช้ในการเลี้ยงไหมเป็นหลัก แต่ในปัจจุบันนี้มีการนำใบหม่อนมาใช้ทำประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหารเสริมมากขึ้น เช่น นำใบหม่อนมาทำเป็นเครื่องดื่มสมุนไพรในรูปแบบของใบหม่อนแห้ง เนื่องจากใบหม่อนมีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยประกอบไปด้วยโปรตีน คาร์โบไฮเดรต โปแตสเซียม แคลเซียม วิตามิน และสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น สารประกอบฟีนอลิกและสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ ซึ่งสามารถช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็ง โรคภูมิแพ้ โรคความดันโลหิต โรคเหงือก โรคเกี่ยวกับสายตา ความผิดปกติของปอดและระบบประสาท โรคเกี่ยวกับทางเดินหายใจ โรคเกี่ยวกับความผิดปกติของผิวหนัง และโรคลำไส้อักเสบ (วิจิตรา และคณะ, 2561) ในการผลิตใบหม่อนแห้งซึ่งมีกระบวนการผลิตที่สำคัญคือการอบแห้ง

การอบแห้งจะเป็นกระบวนการลดความชื้น ทำให้จุลินทรีย์ที่อยู่ในผลิตภัณฑ์มีอัตราการเจริญเติบโตช้า ช่วยให้ผลิตภัณฑ์ไม่เน่าเสียง่าย (สุภวรรณ และคณะ, 2555) และสามารถยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ได้ โดยทั่วไปจะนิยมใช้วิธีการตากแดดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรืออบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือที่อุณหภูมิ 75°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (วรารณ, 2554) ซึ่งกระบวนการอบแห้งจะใช้เวลาในการอบแห้งนาน ส่งผลเสียต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และการใช้พลังงานในการอบแห้ง โดยปัจจุบันมีการนำเอาเทคโนโลยีการอบแห้งโดยใช้อินฟราเรดมาใช้เพื่อแก้ไขปัญหาการอบแห้ง

เนื่องจากการอบแห้งด้วยอินฟราเรดคลื่นยาว สามารถแผ่ทะลุเข้าไปเนื้อวัสดุ ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุสั่นและเกิดความร้อน ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิในเนื้อวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว ส่งผลให้ผิวภายนอกของวัสดุอบแห้งไม่เหี่ยวแห้ง และยังคงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกับวัตถุดิบที่นำมาอบแห้ง นอกจากนี้ อินฟราเรดยังให้ความร้อนสม่ำเสมอ ติดตั้งง่าย ช่วยในการประหยัดพลังงาน และลดระยะเวลาในการอบแห้ง (อำไพศักดิ์ และศักดิ์ชัย, 2553) จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการใช้รังสีอินฟราเรดคลื่นยาวที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 10 นาที ช่วยในการอบแห้งใบชาทำให้ปริมาณสารฟีนอลิกและสารฟลาโวนอยด์เพิ่มสูงขึ้น 50.59% และ 47.19% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ไม่ใช้รังสีอินฟราเรดคลื่นยาว (Lee et al., 2006b) และศึกษาการใช้รังสีอินฟราเรด คลื่น

ยาวที่ความเข้ม 5 kW/m^2 ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 40°C ในการอบแห้งใบหม่อน พบว่าหลังการอบแห้ง 60 นาที ใบหม่อนมีความชื้น 7% และมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมและฟลาโวนอยด์รวมสูงกว่าใบหม่อนสด 20% และ 40% ตามลำดับ (Wanyo et al., 2011) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำอินฟราเรดคลื่นยาวมาประยุกต์ใช้ในการทำใบหม่อนแห้งขงดื่มเพื่อเพิ่มสารฟีนอลิกทั้งหมดและสาร ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด รวมทั้งเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อเปรียบเทียบผลของวิธีการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสี ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของใบหม่อน
2. เพื่อศึกษาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งใบหม่อนด้วยวิธีการอบแห้งลมร้อนและการอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

ขอบเขตของงานวิจัย

1. การทดลองใช้ใบหม่อน พันธุ์บุรีรัมย์ 60 จากศูนย์หม่อนไหมเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์ พระบรมราชินีนาถ เชียงใหม่
2. ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบหม่อนระหว่างการอบแห้งลมร้อน และการอบแห้งด้วยการอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน
3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสี ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของใบหม่อน ระหว่างการอบแห้งลมร้อน และการอบแห้งด้วยการอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน
4. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งใบหม่อนโดยพิจารณา คุณภาพสี ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์รวม ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของใบหม่อน และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการอบใบหม่อน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบวิธีการอบแห้งและสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งใบหม่อนให้ได้คุณภาพ
2. สามารถเปรียบเทียบผลการทดลอง ระหว่างเทคนิคการอบแห้งด้วยลมร้อน และอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการตรวจเอกสาร

ใบหม่อน

หม่อนที่รู้จักกันทั่วไปมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด ได้แก่ หม่อนที่ปลูกเพื่อรับประทานผล (ชื่อสามัญ Black Mulberry, ชื่อวิทยาศาสตร์ *Morus nigra* L.) ชนิดนี้ผลจะโตเป็นช่อ เมื่อสุกผลจะเป็นสีดำ มีรสเปรี้ยวอมหวาน นิยมนำมารับประทาน ทำแยม หรือนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ส่วนอีกชนิดนั้นก็คือ หม่อนที่ใช้ปลูกเพื่อการเลี้ยงไหมเป็นหลัก (ชื่อสามัญ White Mulberry, ชื่อวิทยาศาสตร์ *Morus alba* L.)

1. ถิ่นกำเนิด

หม่อนเป็นพืชดั้งเดิมของจีนและปลูกมากในที่ราบของอินเดียและบริเวณเทือกเขาหิมาลัยที่สูงตั้งแต่ 3,300 m ขึ้นไป ในประเทศไทยมีการปลูกมากในพื้นที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

2. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ต้น มีลักษณะทั่วไปเป็นไม้พุ่มขนาดย่อม ใบเดี่ยวออกสลับสีเขียวเข้ม ขอบใบยกเป็นฟันเลื่อย ผิวใบสากคาย ดอกเป็นดอกช่อลักษณะเป็นแท่ง ดอกตัวผู้และตัวเมียแยกกัน ดอกย่อยมี 4 กลีบ ออกตามซอกใบที่ปลายกิ่ง

ใบ มีลักษณะใบเป็นใบเดี่ยว ออกเรียงสลับ ลักษณะของใบเป็นรูปไข่ หรือรูปไข่กว้าง ปลายใบแหลมยาว โคนใบเว้าเป็นรูปหัวใจหรือค่อนข้างตัด ขอบใบเรียบหรือหยักเว้าเป็นพู (ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ที่ปลูก) ใบอ่อนขอบใบจักเป็นพูสองข้างไม่เท่ากัน ขอบพู่จักเป็นซี่ฟัน ใบมีขนาดกว้างประมาณ 8-14 เซนติเมตร และยาวประมาณ 12-16 เซนติเมตร แผ่นใบเป็นสีเขียวเข้มเรียบเงา ท้องใบเป็นสีเขียวอ่อน ใบค่อนข้างหนา หลังใบสากคายมือ เส้นใบมี 3 เส้น ออกจากโคนยาวไปถึงกลางใบ และเส้นใบออกจากเส้นกลางใบอีก 4 คู่ เส้นร่างแหเห็นได้ชัดเจนจากด้านล่าง ก้านใบเรียวยาวเล็ก ยาวประมาณ 1-1.5 เซนติเมตร มีหูใบเป็นรูปแถบแคบปลายแหลม ยาวได้ประมาณ 0.2-0.5 เซนติเมตร (แสดงดังภาพที่ 1)

ผล มีลักษณะเป็นผลรวม ออกเป็นพวงกลมเล็ก เมื่อสุกมีสีม่วงแดงถึงดำ

3. การใช้ประโยชน์

ใบอ่อนและใบแก่สามารถนำมาทำเป็นชาเขียว ชาจีน หรือชาฝรั่ง ซึ่งในปัจจุบันได้มีการแปรรูปใบหม่อนเป็นผลิตภัณฑ์ชา ทั้งชาเขียวและชาดำ ที่ใช้ขิงต้มแช่และเย็น (จุไรรัตน์ เกิดดอนแฝก, 2556) และยอดอ่อนของใบหม่อนสามารถนำมาปรุงอาหารแทนการใช้ผงชูรสได้ด้วย นอกจากนี้ใบ

หม่อนยังเป็นอาหารสำหรับตัวไหม หนอนไหมที่เจริญเติบโตเต็มที่ซึ่งนำโปรตีนที่ได้จากใบหม่อนไปสร้างเป็นโปรตีนแล้วผลิตเป็นเส้นไหม ซึ่งเส้นไหม จะเป็นวัตถุดิบในการผลิตผ้าไหมที่มีความสวยงามได้อีกต่อหนึ่ง โดยใบหม่อนประมาณ 108-120 กิโลกรัม สามารถเปลี่ยนเป็นรังไหมพันธุ์ไทยพื้นบ้านได้ประมาณ 10-12 กิโลกรัม

4. คุณค่าทางโภชนาการ

ใบหม่อนมีคุณค่าทางโภชนาการที่สูง โดยมีปริมาณโปรตีน 22.60% คาร์โบไฮเดรต 42.25% ไขมัน 4.57% ความชื้น 6.55% เส้นใยและเถ้า 24.03% นอกจากนี้ยังมีสารต้านอนุมูลอิสระที่ช่วยลดความดันโลหิต ลดระดับคลอเรสเตอรอล ลดน้ำตาลในเลือด แก้ไข้ และมะเร็ง ได้แก่ สารในกลุ่มฟีนอลิก สารในกลุ่ม ฟลาโวนอยด์ วิตามินเอ วิตามินบี2 วิตามินซี แร่ธาตุ แคลเซียม และแทนนิน เป็นต้น นอกจากนี้การดื่มใบหม่อนแห้งยังช่วยลดระดับน้ำตาลในเลือด ลดไขมันในเส้นเลือด และช่วยรักษาโรคเบาหวานได้อีกด้วย



ภาพที่ 1 ลักษณะใบหม่อน

การอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้นซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ขึ้นเพื่อไล่ความชื้นออกด้วยการระเหยโดยของเหลวที่อยู่ภายในวัสดุจะเคลื่อนที่ออกมายังผิว ส่วนไอน้ำในวัสดุจะเคลื่อนที่เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นความชื้น (Vapor diffusion) และความดันไอ (Vapor pressure) ที่แตกต่างกันระหว่างไอน้ำในวัสดุกับอากาศร้อน ช่วงแรกของการอบแห้งเป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนระหว่างมวลกับวัสดุกับอากาศจะเกิดขึ้นรอบ ๆ ผิววัสดุเท่านั้น ความร้อนกับอากาศร้อนจะถ่ายเทไปยังผิวของวัสดุ โดยการนำความร้อนผ่านชั้นฟิล์มของก๊าซ

ไปยังผิวของวัสดุและเมื่อผิวของวัสดุมีปริมาณน้ำลดลงมาก การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารจะเกิดขึ้นภายในโมเลกุลด้วย โดยน้ำภายในวัสดุจะเคลื่อนที่มายังผิววัสดุในรูปของเหลวหรือไอน้ำ แล้วระเหยเมื่อได้รับความร้อนจากอากาศ การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวจะช้ากว่าการพาความชื้นจากผิวไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศคงที่ ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำ ลงจนถึงจุดหนึ่งซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลง ที่จุดความดันไอน้ำของน้ำ วัสดุมีค่าเท่ากับความดันไอที่อยู่กับอากาศรอบ ๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ทำให้น้ำไม่สามารถระเหยออกจากวัสดุได้ เรียกความชื้นในขณะนั้นว่าความชื้นสมดุลความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ (ชฎานิศ, 2561)

1. กราฟการอบแห้ง (Drying curve)

กราฟการอบแห้ง คือ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งกับความชื้นค่าความชื้น (Moisture content, MC) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเทียบกับมวลของวัสดุตามมาตรฐาน AOAC ความชื้นในวัสดุสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (Moisture content wet basis, w.b.) และความชื้นมาตรฐานแห้ง (Moisture content dry basis, d.b.) ซึ่งคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$M_{w.b.} = \frac{w-d}{w} \times 100 \quad (1)$$

$$M_{d.b.} = \frac{w-d}{d} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ	$M_{w.b.}$	คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (%w.b.)
	$M_{d.b.}$	คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%d.b.)
	w	คือ มวลเปียกของวัสดุ (g)
	d	คือ มวลแห้งของวัสดุ (g)

การวิเคราะห์การอบแห้งนอกจากค่าความชื้น ยังมีค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำภายในวัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้น เมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินไปเป็นเวลาใด ๆ คือ อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) โดยอัตราส่วนความชื้นสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (3)$$

เมื่อ	MR	คือ อัตราส่วนความชื้น
	M_t	คือ ความชื้นฐานแห้งที่เวลาใดๆ (%d.b)
	M_{in}	คือ ความชื้นฐานแห้งที่เวลาเริ่มต้น (%d.b)
	M_{eq}	คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ (%d.b)

การคำนวณอัตราส่วนความชื้น เป็นการคำนวณค่าโดยประมาณ คือ ไม่คิดค่าความชื้นสมดุล โดยตั้งสมมติฐานว่า ความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น

2. กราฟอัตราการอบแห้ง

กราฟอัตราการอบแห้ง (Drying rate curve) คือ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะเวลาการอบแห้งกับอัตราการอบแห้ง ทั้งนี้อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) คือ มวลของเหลวที่ระเหยต่อพื้นที่ที่เกิดการระเหยต่อเวลา จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ และขนาดวัสดุที่ต้องการอบแห้ง ซึ่งมีผลอย่างมากต่อการอบแห้ง โดยเฉพาะในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยสามารถคำนวณหาอัตราการอบแห้ง (DR) จากสมการ (4) เพื่อนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาที่ใช้

$$DR = \frac{M_0 - M_T}{T} \quad (4)$$

เมื่อ	DR	คือ อัตราการอบแห้ง ($g_{water}/g_{dry\ mass} \cdot min.$)
	M_0	คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (%d.b.)
	M_T	คือ ปริมาณความชื้นที่เวลา T (%d.b.)
	T	คือ เวลาในการอบแห้ง (min)

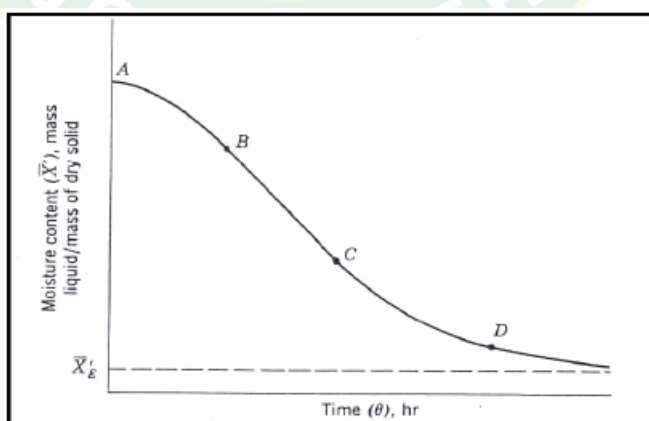
การอบแห้งหรือการตากแห้ง คือ การลดปริมาณความชื้น (Moisture content) ของผลิตภัณฑ์เพื่อป้องกันการเน่าเสียในช่วงเวลาหนึ่ง กระบวนการอบแห้งประกอบด้วย 2 กระบวนการสำคัญ คือ การถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนสู่ผลิตภัณฑ์ และถ่ายเทความชื้นออกจากภายใน

ผลิตภัณฑ์มาที่ผิว และออกสู่อากาศภายนอกวัสดุนั้น ๆ และวัสดุอบแห้งดังกล่าวจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความชื้นจะระเหยกลายเป็นไอออกจากวัสดุสู่บรรยากาศรอบข้าง กำหนดให้อุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่ไหลผ่านวัสดุอบแห้งมีค่าคงที่ และอากาศที่ถ่ายเทความร้อนให้แก่วัสดุเป็นแบบพาความร้อน ขั้นตอนการลดความชื้นสามารถแบ่งได้ 3 ช่วง คือ

ช่วงที่ 1 คือ ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial adjustment period –AB) เป็นช่วงเริ่มต้นที่อาหารที่ใช้ในการอบแห้ง มีความชื้นเริ่มต้น (A) ของอาหารยังสูงอยู่ผิวของอาหารจะมีลักษณะเปียกชื้นมาก เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางลมร้อนกับอาหาร ทำให้อุณหภูมิพื้นผิวอาหาร มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature) ของกระแสลมร้อนที่ใช้เป็นตัวกลาง อัตราการทำแห้งค่อยๆเพิ่มขึ้น จนถึงช่วงอัตราทำแห้งคงที่ (Constant rate)

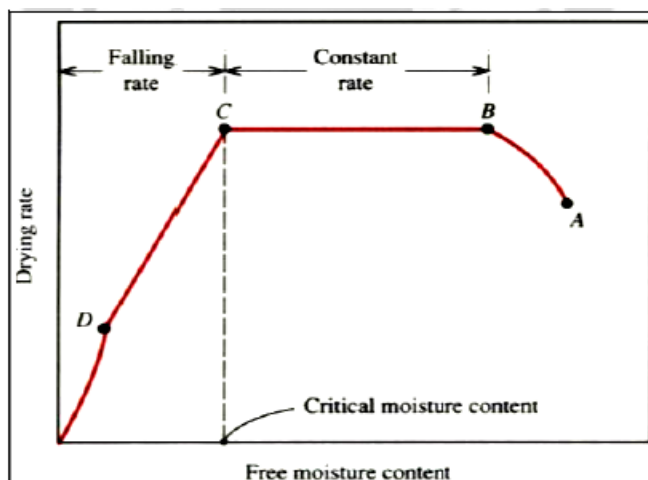
ช่วงที่ 2 คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period-BC) เป็นช่วงที่น้ำภายในวัสดุเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้า พลังงานความร้อนที่วัสดุได้รับจะใช้ในการระเหยน้ำออกจากของวัสดุอย่างต่อเนื่อง ความชื้นเฉลี่ยของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในการอบแห้ง จุดสุดท้ายของช่วงการอบแห้งความเร็วคงที่ อัตราเร็วในการอบแห้งจะเริ่มลดลง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

ช่วงที่ 3 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period CD และ DE) เป็นช่วงที่ความชื้นในอาหารเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารอย่างไม่ต่อเนื่อง ผิวหน้าอาหารเริ่มแห้งทำให้อุณหภูมิที่ผิวของอาหารสูงขึ้นเรื่อย ๆ อัตราการอบแห้งลดลงความชื้นจะลดลงเรื่อย ๆ จนถึงค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, XE) ซึ่งเป็นค่าความชื้นที่ต่ำสุด ภายใต้สภาวะที่ใช้อยู่ขณะนั้น ที่ความชื้นนี้มีอัตราการทำแห้งเป็นศูนย์ น้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง

ที่มา: (อิสเรศ วรรณทร, 2554)



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับอัตราการอบแห้ง
ที่มา: (อิศเรศ วรรณทร, 2554)

3. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้ง

1. ลักษณะธรรมชาติของอาหาร อาหารที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีความพรุน (Porosity) มาก จะมีอัตราการอบแห้งเร็วเนื่องจากน้ำในอาหารสามารถเคลื่อนจากภายในออกมาภายนอกได้ง่าย นอกจากนี้อาหารที่มีพื้นที่ผิวมากอัตราการอบแห้งสามารถเกิดได้เร็วเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่การระเหยของน้ำในวัสดุเพิ่มขึ้นนั่นเอง

2. ขนาด รูปร่าง ปริมาตร และพื้นที่ผิวของอาหาร เป็นสมบัติทางกายภาพของอาหาร ที่มีผลต่อการทำแห้ง อาหารที่มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก จะมีพื้นที่ระเหยน้ำมาก จะมีอัตราการทำแห้งเร็วขึ้น ดังนั้นหากอาหารที่มีความหนามากอัตราการอบแห้งจะช้ากว่าอาหารที่มีความหนาน้อยกว่าเนื่องจากอัตราการทำแห้งจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของอาหาร

3. ปริมาณของอาหารที่นำมาอบแห้ง อาหารที่นำมาอบแห้งในปริมาณมาก ๆ จะมีอัตราการอบแห้งที่ช้าเนื่องจากอากาศร้อนไม่สามารถสัมผัสกับอาหารที่นำมาอบแห้งได้อย่างทั่วถึง จึงไม่สามารถถ่ายเทความร้อนให้กับอาหารได้ จึงทำให้อัตราการอบแห้งช้าลง

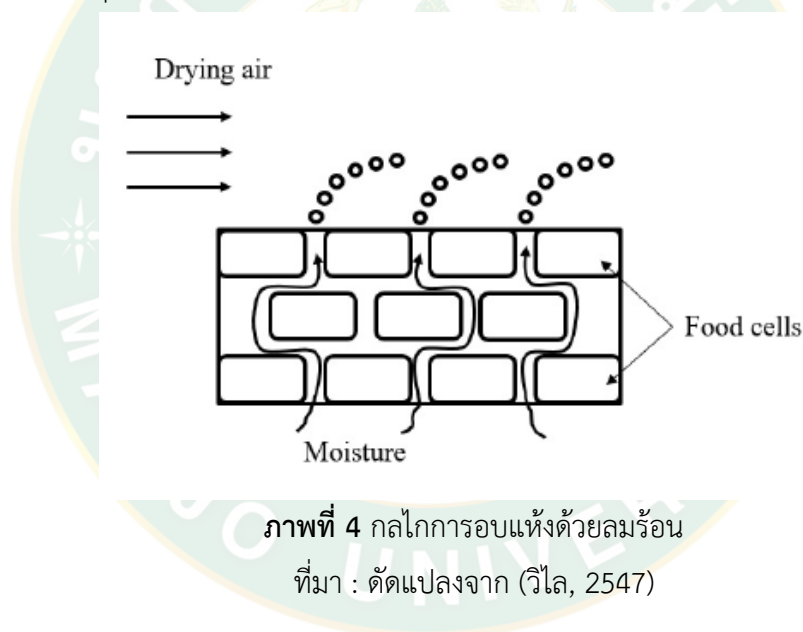
4. ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความชื้นจำเพาะ (Specific humidity) ของอากาศเป็นสิ่งสำคัญมาก การระเหยน้ำออกจะทำได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับความชื้นของอากาศและความเร็วลม

5. ความดัน เกี่ยวเนื่องกับการระเหยของน้ำ เนื่องจากในที่มีความดันต่ำ ๆ ลงมา น้ำจะเดือดได้ที่อุณหภูมิต่ำลง ดังนั้นการทำแห้งภายใต้ความดันจะทำให้อัตราการทำแห้งเร็วขึ้น

การอบแห้งลมร้อน

การอบแห้งลมร้อนนี้เป็นวิธีการอบแห้งที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากมีความสะดวกต่อการปฏิบัติ และง่ายต่อการควบคุม โดยจะทำการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์อาหารและวอเตอร์แอกทีวิตี (Water activity : a_w) เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ส่งผลให้อาหารเสื่อมเสีย ทำให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลผลิตให้ยาวนานขึ้น

ภาพที่ 4 แสดงกลไกการถ่ายเทมวลของการอบแห้งด้วยลมร้อนจะเริ่มจากการถ่ายเทพลังงานจากลมร้อนไปสู่อาหารโดยการพาความร้อน ส่งผลทำให้ความชื้นที่ผิวหน้าเข้าสู่อุณหภูมิระเหย ส่วนความชื้นที่อยู่ภายในจะค่อย ๆ แพร่กระจายมายังผิวโดยอัตราการแพร่กระจายความชื้นจะขึ้นอยู่กับศักยภาพของการถ่ายเทความร้อนและความแตกต่างของอุณหภูมิ เมื่อความชื้นลดลงจนเข้าสู่ค่าความชื้นวิกฤติ และชั้นความแห้งเกิดขึ้นประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงานลดต่ำลงอย่างมาก



ภาพที่ 4 กลไกการอบแห้งด้วยลมร้อน

ที่มา : ดัดแปลงจาก (วิไล, 2547)

แต่เนื่องจากการอบแห้งด้วยลมร้อนต้องมีตัวกลางทางความร้อนเพื่อถ่ายเทพลังงานไปสู่ความชื้นภายในผลผลิต ทำให้ต้องใช้เวลายาวนานในการระเหยความชื้นจากชั้นในโครงสร้างเซลล์ และยังส่งผลต่อคุณภาพอาหารในด้านต่าง ๆ เช่น อาหารเกิดการหดตัว การเกิดเปลือกแข็ง การสูญเสียคุณค่าทางอาหาร สารระเหย การเปลี่ยนแปลงสี และการเกิดสีน้ำตาล เป็นต้น

อินฟราเรด

1. หลักการของอินฟราเรด

การให้ความร้อนโดยใช้อินฟราเรด เป็นการให้ความร้อนในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยอยู่ในช่วงความยาวคลื่นของอินฟราเรด ($0.76 \mu\text{m} - 1\text{mm}$) ซึ่งอยู่ในช่วงของแสงที่มองเห็นได้ ช่วงอินฟราเรดสามารถแบ่งได้เป็นกลุ่ม 3 กลุ่ม คือ คลื่นสั้น คลื่นปานกลาง และคลื่นยาว การดูดซับอินฟราเรดจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของอินฟราเรด ส่วนประกอบของวัตถุ ลักษณะพื้นผิวของวัตถุมุมตกกระทบ และสีของวัตถุ วัตถุที่เป็นของแข็งส่วนใหญ่จะดูดซับอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 2 m ได้ดี ยกเว้นโลหะที่ขัดเงา เช่น ทอง เงิน เป็นต้น การใช้งานอินฟราเรดจะต้องมีตัวปล่อยคลื่น (IR emitter) ซึ่งประกอบด้วย ตัวปล่อยคลื่นสั้น (Short wave) ตัวปล่อยคลื่นปานกลาง (Medium wave) และตัวปล่อยคลื่นยาว (Long wave) เป็นแหล่งให้ความร้อน (ศุภชัย, 2559)

ในระหว่างกระบวนการอบแห้งนั้น จะมีการรับและถ่ายเทพลังงาน ลักษณะการเปลี่ยนสภาพดังกล่าวนี้เป็นการเปลี่ยนเฟสของสาร ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมี อุณหภูมิยิ่งสูงการเปลี่ยนสภาพก็เร็วขึ้น

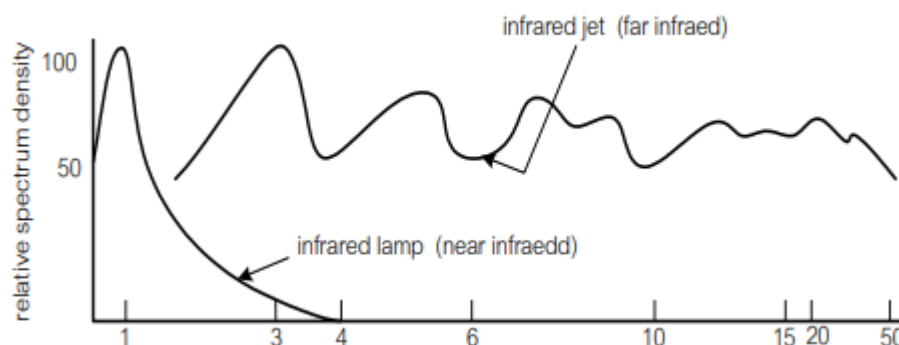
การส่งถ่ายความร้อน (Heat transfer) เข้าสู่วัตถุนั้น ทำได้ 3 แบบ คือ การนำความร้อน (Heat conduction) การพาความร้อน (Heat convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Heat Radiation) วิธีการอบแห้งแบบเป่าร้อนลมที่ใช้กันมานานนั้น เป็นการนำและการพาความร้อนในการส่งพลังงานให้วัตถุ ซึ่งความเร็วในการนำความร้อนได้อย่างรวดเร็วจึงได้ถูกนำมาใช้ในการอบแห้งด้วยรังสีต่าง ๆ ที่ใช้อยู่ก็มีรังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งมีความยาวคลื่นและพลังงานสูงรังสีนี้จะสามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี คือ การรวมและแยกตัวของโมเลกุลได้รังสีอีกชนิดหนึ่ง คือ อินฟราเรดได้ถูกนำมาใช้ในการอบแห้งปัจจุบันที่มีใช้อย่างกว้างขวางในงานทางภาคอุตสาหกรรมโดยแหล่งกำเนิดอินฟราเรดที่ใช้กันมากเป็นการใช้หลอดอินฟราเรดซึ่งให้ความยาวคลื่นที่สั้นที่ทำให้ประสิทธิภาพของการดูดกลืนความร้อนและรังสีของวัตถุต่ำ หลอดอินฟราเรดยังให้แสงที่ตาไม่สามารถเห็นได้ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดกลืนความร้อนขึ้นอยู่กับวัตถุ

การวิเคราะห์ส่วนประกอบของสสารโดยใช้รังสี (Spectrochemical analysis) ที่ใช้อินฟราเรดนั้นก็อาศัยปรากฏการณ์การดูดกลืนรังสีดังกล่าวนี้ ในการวิเคราะห์ส่วนประกอบของสสารโดยอาศัยหลักการที่ว่าสสารที่มีการจับตัวทางเคมีที่เหมือนกันจะมีรูปแบบเหมือนกัน เมื่อส่องรังสีอินฟราเรดไปที่ชั้นผิวของวัตถุ รังสีที่มีความยาวคลื่นตรงกับในวัตถุ จะดูดกลืนเข้าไปแล้วทำการสั่นสะเทือนของโมเลกุล ซึ่งจะก่อให้เกิดเป็นความร้อนขึ้นมา จากที่กล่าวมานี้ก็เป็นการแสดงให้เห็นว่ารังสีอินฟราเรดนั้นสามารถจะถ่ายเทความร้อนไปยังชั้นของวัตถุได้อย่างรวดเร็ว

2. ลักษณะคุณสมบัติของอินฟราเรดช่วงไกล

การดูดกลืน (Absorption) โดยทั่วไปจำพวกอาหาร น้ำมัน จะดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้ดี ในช่วงความยาวคลื่น 4-50 μm ซึ่งตรงกับช่วงฮีเตอร์อินฟราเรดช่วงไกลให้รังสีออกมา ถ้าพิจารณา ด้านปฏิกิริยาเคมีจะมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบที่ใช้ความร้อนทำให้ตัวทำละลายระเหยออกไป กับแบบที่ใช้แสงทำให้เกิดการโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization) จากความจุความร้อนของวัตถุและส่วนที่เป็น ชั้นของวัตถุ อุณหภูมิของชั้นวัตถุจะเพิ่มขึ้นได้มากเท่าใดนั้น ก็จะเท่ากับความเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิ ของวัตถุที่ทำให้เกิดความร้อน

วิธีการให้ความร้อนแบบใช้อินฟราเรดนั้นจะเป็นการให้ความร้อน โดยการฉายรังสีอินฟราเรด ไปยังวัตถุ วัตถุจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงความถี่ต่าง ๆ กัน ซึ่งทำให้โมเลกุลของวัตถุเกิดการ สั่นสะเทือนส่งผลทำให้วัตถุนั้นเกิดความร้อนขึ้นในชั้นวัตถุอย่างสม่ำเสมอในช่วงเวลาอันสั้น โดยทั่วไป ถ้าเป็นรังสีอินฟราเรดช่วงไกลนั้นพลังงานบางส่วนจะถูกดูดกลืนในชั้นของวัตถุเพียงประมาณ 10% และจะสะท้อนกลับมา 30% ที่เหลือจะส่งผ่านชั้นของวัตถุแต่ถ้าเป็นรังสีอินฟราเรดช่วงไกลพลังงาน บางส่วนจะถูกดูดกลืนในชั้นของวัตถุประมาณ 50%



ภาพที่ 5 ความเข้มของการแผ่รังสีอินฟราเรดของหลอดอินฟราเรดช่วงไกลและหลอดอินฟราเรดช่วง ไกล (μm)

ที่มา: (พงษ์ชัย ไกลถิ่น และ อิศระ ยศวิศ, 2552)

การสะท้อน (Reflection) รังสีอินฟราเรดเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเพราะฉะนั้นจะสามารถอาศัย หลักการการสะท้อนของแสงมารวมรังสีเข้าสู่วัตถุที่ต้องการได้ง่าย โดยถ้าออกแบบแผ่นสะท้อนให้เป็น แบบพาราโบลา รังสีที่สะท้อนออกไปก็จะเป็นลำแสงขนาน

การใช้รังสีอินฟราเรดช่วงไกลเป็นการให้ความร้อนที่ได้จากการแผ่รังสี เพราะฉะนั้นจะไม่ เกี่ยวข้องกับอากาศที่อยู่ระหว่างกลาง โดยรังสีจะเคลื่อนตรงไปกระทบวัตถุแล้วทำให้เกิดความร้อนใน วัตถุนั้น เพราะฉะนั้น เตาที่ใช้จึงไม่จำเป็นต้องปิดอย่างมิดชิด แล้วยังไม่ทำให้อากาศที่อยู่บริเวณ

รอบ ๆ ร้อนตามไปด้วย ซึ่งนับว่าเป็นข้อดีของวิธีนี้ ในทางตรงกันข้ามผิววัตถุส่วนที่ไม่ถูกฉายรังสีก็จะไม่ร้อนเพราะฉะนั้นถ้าเป็นวัตถุแบบ 3 มิติ ก็จำเป็นต้องออกแบบวางตำแหน่งฮีตเตอร์ให้เหมาะสม เพื่อให้ความร้อนทั่วถึง

3. ลักษณะพิเศษของฮีตเตอร์อินฟราเรดช่วงไกล

ฮีตเตอร์อินฟราเรดช่วงไกลใช้ออกไซด์ของเรียวเมทอล เคลือบบนผิวโลหะชนิดพิเศษซึ่งใช้เป็นตัวกำเนิดความร้อน เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้า ความร้อนที่ออกจากตัวกำเนิดความร้อนจะถูกออกไซด์ดังกล่าวซึ่งทำหน้าที่เป็นคอนเวอร์เตอร์เปลี่ยนให้เป็นรังสีอินฟราเรดในช่วงไกล เนื่องจากรังสีอินฟราเรดช่วงไกลมีความถี่ตรงกับการสั่น โมเลกุลของสารทำละลายยรงควัตถุ (Pigment) และ โพลลิเมอร์ (Polymer) ซึ่งเป็นสารประกอบของสีในพืชรหรือวัสดุซึ่งทำให้เกิดการสั่นแบบ เรโซแนนท์ (Resonant) ที่รุนแรง ทำให้ได้ผลดีอย่างที่ยินฟราเรดใกล้ไม่สามารถทำได้

3.1 ตัวอย่างของฮีตเตอร์อินฟราเรดไกล

ฮีตเตอร์แบบแผ่น โครงสร้างแบบนี้ไม่ได้ใช้แผ่นสะท้อน เพราะฉะนั้นจึงไม่มีการตกต่ำของประสิทธิภาพเนื่องจากมีฝุ่นละอองจับ สามารถยึดติดกับเหล็กฉากโดยตรงทำเป็นเตาได้ง่าย



ภาพที่ 6 ฮีตเตอร์แบบแผ่น

ที่มา: (พงษ์ชัย ไกลถิ่น และ อิศระ ยศวิศ, 2552)

ฮีตเตอร์แบบแท่ง แบบนี้เหมาะสำหรับการให้ความร้อนแก่วัตถุที่เป็นแผ่นเพื่อให้ได้รังสีสม่ำเสมอ



ภาพที่ 7 ฮีตเตอร์แบบแท่ง

ที่มา: (พงษ์ชัย ไกลถิ่น และ อิศระ ยศวิศ, 2552)

ฮีตเตอร์แบบหลอด ฮีตเตอร์แบบนี้เหมาะสำหรับการอบแห้งของวัตถุ 3 มิติ



ภาพที่ 8 ฮีตเตอร์แบบหลอด

ที่มา: (พงษ์ชัย ไกลถิ่น และ อิศระ ยศวิศ, 2552)

4. ประโยชน์ของอินฟราเรด

4.1 ให้ความร้อนและลดความร้อนได้รวดเร็ว โดยส่วนใหญ่เตาอบไฟฟ้าที่ใช้อินฟราเรดสามารถทำความร้อนให้ผลิตภัณฑ์ได้ในเวลาไม่กี่วินาที

4.2 เนื่องจากการให้ความร้อนที่รวดเร็ว ทำให้ต้องการพื้นที่ว่างในเตาอบน้อยลง และเป็นเตาที่สะอาด ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

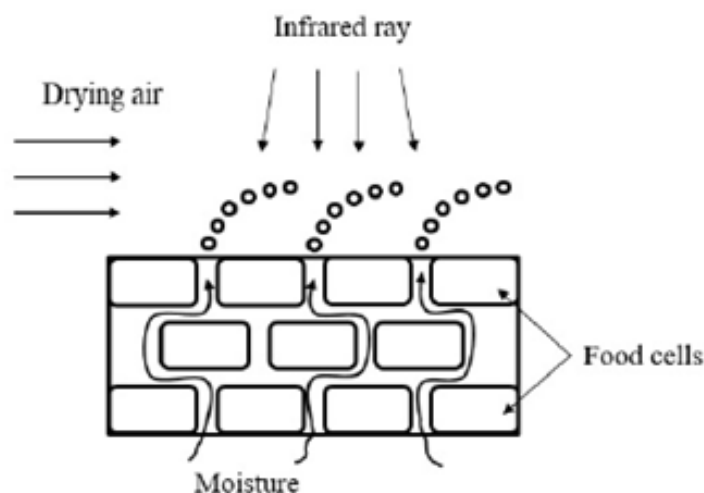
4.3 มีการควบคุมที่แม่นยำ มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ต้นทุนเริ่มแรกและค่าบำรุงรักษาต่ำ

5. การประยุกต์ใช้อินฟราเรด

สภาพที่เหมาะสมในการใช้งาน การประยุกต์ใช้งานการให้ความร้อนโดยใช้อินฟราเรดจะขึ้นอยู่กับความยาวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ลักษณะการใช้งานโดยมีตัวอย่างการใช้งานที่หลากหลาย ได้แก่ การอบสี การอบผลิตภัณฑ์แป้ง การเคลือบภาชนะในการทำอาหาร การเคลือบสาร PVC บนผนัง การอบแห้ง สารแม่เหล็กบนเทปคาสเส็ต การอบแห้งผลิตภัณฑ์กระจกนิรภัย การอบหนัง การอบแห้งกระดาษ การอบสี เป็นต้น

การอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

การอบแห้งเป็นกระบวนการไล่ความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ อาศัยหลักการการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างผลิตภัณฑ์กับของไหล การอบแห้งผลิตภัณฑ์มีหลักการเกิดความร้อนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดหรือแหล่งกำเนิดความร้อน การอบแห้งด้วยลมร้อนจะอาศัยหลักการถ่ายเทมวลและความร้อนระหว่างผลิตภัณฑ์กับอากาศตั้ง ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งการอบแห้งลักษณะนี้ใช้เวลาในการอบแห้งที่ยาวนาน เนื่องจากเมื่อผิวผลิตภัณฑ์เริ่มแห้งจะเกิดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ จึงทำให้น้ำหรือความชื้นเคลื่อนที่ออกจากผลิตภัณฑ์สู่ภายนอกได้ยาก การอบแห้งด้วยอากาศร้อนใช้เวลาที่ยาวนานและสิ้นเปลืองพลังงาน ดังนั้นจึงมีการนำคลื่นรังสีอินฟราเรดมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งคุณสมบัติเด่นของการอบแห้งด้วยคลื่นรังสีอินฟราเรด คือ พลังงานจากรังสีอินฟราเรดจะถูกแผ่ไปยังผลิตภัณฑ์ ทำให้โมเลกุลของน้ำภายในผลิตภัณฑ์เกิดการสั่นและเกิดเป็นความร้อนขึ้นภายในผลิตภัณฑ์ ซึ่งอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์สูงกว่าอุณหภูมิที่ผิวผลิตภัณฑ์จึงส่งผลให้ผิวนอกผลิตภัณฑ์ไม่เหี่ยวหรือเกิดการหดตัวมากนัก ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลได้ง่าย ดังนั้นจึงมีการนำรังสีอินฟราเรดมาใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ร่วมกับลมร้อนหรืออากาศร้อน ซึ่งหลักการการอบแห้งด้วยเทคนิคดังกล่าวแสดงในภาพที่ 9 คือการนำหลักการอบแห้งด้วยอากาศร้อนมารวมกับการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด โดยผลิตภัณฑ์จะแห้งจากผิวด้านนอกเข้าสู่เนื้อภายในผลิตภัณฑ์ซึ่งเกิดจากอิทธิพลจากการอบแห้งด้วยอากาศร้อน พร้อมกับผลิตภัณฑ์จะแห้งจากเนื้อภายในมายังผิวน้ำผลิตภัณฑ์จากอิทธิพลของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ซึ่งการอบแห้งด้วยวิธีนี้ช่วยลดเวลาในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ จึงทำให้พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งลดลงด้วย และยังช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งได้อีกด้วย



ภาพที่ 9 กลไกการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมลมร้อน

ที่มา : ดัดแปลงจาก (วิไล, 2547)

จากการศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน สามารถสรุปข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของการอบแห้งแบบต่าง ๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของวิธีการอบแห้งต่าง ๆ

วิธีการอบแห้ง	ข้อได้เปรียบ	ข้อจำกัด
การอบแห้งด้วยลมร้อน (Hot air drying)	มีวิธีและขั้นตอนการทำงานที่ง่ายต่อการควบคุมกระบวนการ และมีต้นทุนการอบแห้งต่ำ	ใช้เวลาในการอบแห้งยาวนาน
การอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน (Infrared combine hot air drying)	มีอัตราการอบแห้งที่รวดเร็ว เนื่องจากผลึกกัมมันต์เกิดความร้อนทั้งภายในและผิวหน้าผลึกกัมมันต์	มีค่าใช้จ่ายด้านการลงทุนและการใช้งานของเครื่องมือค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน

แบบจำลองการอบแห้ง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ของการออกแบบวิธีการอบแห้งให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีความเกี่ยวข้อง ทั้งในตัวนวิธีการอบแห้ง แหล่งพลังงานที่ใช้ ผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการทดลองเพื่อหาสภาวะอบแห้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบระบบการอบแห้งแบบต่าง ๆ เนื่องจากสามารถบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลสารและความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งตลอดจนการหาสภาวะอบแห้งที่เหมาะสมของกระบวนการอบแห้งแบบต่าง ๆ ได้ดี ปัจจุบันแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งจะถูกนำไปใช้ในการจำลองสภาวะการอบแห้งและการศึกษาผลกระทบของปัจจัยด้านต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งตลอดจนการทดสอบและเปรียบเทียบเงื่อนไขการอบแห้งแบบต่าง ๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งแทนการทดลองจริง ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง จึงมีความสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดสอบเงื่อนไขในการอบแห้ง (ปองพล, 2557)

จากการสำรวจเอกสารของรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่นิยมใช้ในการศึกษาสำหรับกระบวนการอบแห้งผลผลิตทางเกษตร มักจะเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบจำลองเอมไพริคอล (Empirical model) เช่น แบบจำลองของ Newton, Henderson and Pabis, Page และ Modified Page เป็นต้น ซึ่งรูปแบบความสัมพันธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รูปแบบสมการของแบบจำลองการอบแห้งแบบต่าง ๆ

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

หมายเหตุ เมื่อ a b c g h k_1 k_2 n คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับวัสดุ และ k คือ สัมประสิทธิ์การอบแห้ง t คือ เวลา

การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมของการอบแห้งใบหม่อน สามารถทำได้โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใด ๆ จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับสมการอบแห้งชั้นบางที่ใช้สำหรับทำนายค่าความชื้น ซึ่งอยู่ในรูปสมการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical drying equation) ซึ่งการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสมการสมการอบแห้งชั้นบางใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression) มีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) ค่าไคสแควร์ (Chi-square, χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) ดังสมการต่อไปนี้

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

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

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

เมื่อ	$MR_{pre,i}$	คือ	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนาย
	$MR_{exp,i}$	คือ	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง
	MR_{pred}	คือ	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการประมาณ
	N	คือ	จำนวนข้อมูลจากการทดลอง
	z	คือ	พารามิเตอร์ในแต่ละแบบการทดลอง

สารต้านอนุมูลอิสระ

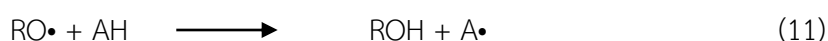
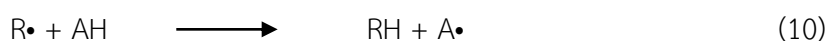
อนุมูลอิสระ (Free radicals) หมายถึง สารที่มีอิเล็กตรอนโดดเดี่ยว (Unpaired electrons) ในอะตอมหรือโมเลกุล พบได้ทุกแห่งทั้งในสิ่งแวดล้อม ในสิ่งมีชีวิตและในเซลล์โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการผลิตพลังงานภายในเซลล์หรือจากกระบวนการเมแทบอลิซึม (Metabolism) โดยมีการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนออกจากโมเลกุลของออกซิเจนทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลออกซิเจนไม่สมดุลกลายเป็นอนุมูลอิสระและว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยามากและสามารถดึงอิเล็กตรอนจากโมเลกุลอื่น

มาแทนที่อิเล็กตรอนที่ขาดหายไปเพื่อให้ตัวเองเกิดความสมดุลหรือเสถียร ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ และเกิดขึ้นในเซลล์ตลอดเวลาตั้งสมการต่อไปนี้



อนุมูลอิสระนี้สามารถทำลายชีวโมเลกุลทุกประเภท ทั้งในเซลล์และส่วนประกอบของเซลล์สิ่งมีชีวิต เช่น ลิพิด (Lipid) โปรตีน (Protein) เอนไซม์ (Enzyme) ดีเอ็นเอ (DNA) อาร์เอ็นเอ (RNA) คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) เซลล์เมมเบรน (Cell membrane) คอลลาเจน (Collagen) ไมโทคอนเดรีย (Mitochondria) และเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (Connective tissues) ซึ่งเป็นสาเหตุให้เซลล์ตาย การเกิดการกลายพันธุ์ของดีเอ็นเอในเซลล์และก่อให้เกิดโรคต่าง ๆ ได้แก่ โรคชรา (Aging) โรคมะเร็ง (Cancer) โรคหัวใจขาดเลือด (Coronary heart disease) โรคความจำเสื่อม (Alzheimer's disease) โรคข้ออักเสบ (Arthritis) โรคภูมิแพ้ โรคความดันโลหิต โรคเหน็บชา โรคเกี่ยวกับสายตา ความผิดปกติของปอดและระบบประสาท โรคเกี่ยวกับทางเดินหายใจ โรคเกี่ยวกับความผิดปกติของผิวหนัง และโรคไตอักเสบ เป็นต้น

สารต้านอนุมูลอิสระถือว่ามีสำคัญต่อกระบวนการออกซิไดซ์อนุมูลอิสระ หรือสามารถยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยในสิ่งมีชีวิตจะมีระบบการป้องกันการทำลายเซลล์และเนื้อเยื่อจากอนุมูลอิสระ ประกอบด้วยสารต้านอนุมูลอิสระมากมายหลายชนิดที่ทำหน้าที่แตกต่างกันไป ซึ่งมีทั้งที่เป็นเอนไซม์และไม่เป็นเอนไซม์ สารประกอบที่ละลายในน้ำและสารประกอบที่ละลายในไขมัน โดยสารต้านอนุมูลอิสระเหล่านี้มีกลไกการทำงานต้านอนุมูลอิสระด้วยกันหลายแบบ เช่น ดักจับอนุมูลอิสระ (Radical scavenging) การยับยั้งการทำงานของออกซิเจนที่ขาดอิเล็กตรอน (Singlet oxygen quenching) จับกับโลหะที่สามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ (Metal chelation) หยุดปฏิกิริยาการสร้างอนุมูลอิสระ (Chain-breaking) เสริมฤทธิ์ (Synergism) และยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ (Enzyme inhibition) ที่เร่งปฏิกิริยาอนุมูลอิสระ เป็นต้น ตัวอย่างแสดงการดักจับอนุมูลอิสระดังต่อไปนี้



โดย $R\cdot$ และ $RO\cdot$ คืออนุมูลอิสระ และ AH คือ สารต้านอนุมูลอิสระ แหล่งที่มาของสารต้านอนุมูลอิสระมี 2 แหล่ง ได้แก่ สารต้านอนุมูลอิสระสังเคราะห์ (Synthetic antioxidants) และสาร

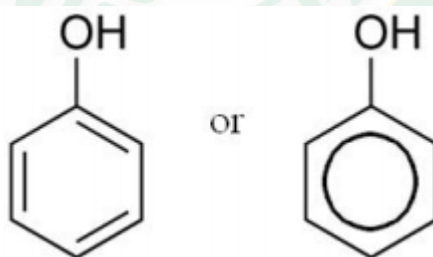
ต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ (Natural antioxidants) ซึ่งสารต้านอนุมูลอิสระสังเคราะห์เกิดจากการกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีโดยเป็นสารประกอบฟีนอลิก ได้แก่ Propyl gallate, 2-butylated hydroxyanisole, 3-butylate hydroxyanisole, BHT (Butylated hydroxytoluene) และ tertiary butylhydroquinone สารสังเคราะห์ดังกล่าวนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันที่เป็นสาเหตุที่ทำให้อาหารมีกลิ่น สีและรสชาติเปลี่ยนแปลงไป สารสังเคราะห์นี้มีสภาพคงตัวกว่าสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติแต่มีข้อจำกัดในด้านความปลอดภัยในการบริโภคขณะที่สารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติสามารถพบได้ในสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ซึ่งเป็นที่ได้ทั้งเอนไซม์ วิตามินและสารอื่น ๆ

1. สารประกอบฟีนอลิก

สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound) หรือ สารประกอบฟีนอล เป็นสารที่พบได้ตามธรรมชาติ ในพืชหลายชนิด เช่น ผัก ผลไม้ เครื่องเทศ สมุนไพร ถั่วเมล็ดแห้ง เมล็ดธัญพืช ซึ่งถูกสร้างขึ้นเพื่อประโยชน์ในการเจริญเติบโต มีสรรพคุณที่ดีต่อสุขภาพคือ มีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระสามารถละลายได้ในน้ำ

1.1 โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบฟีนอลิก

เป็นโมเลกุลรูปวงแหวนหกเหลี่ยมวงเดียว มีหมู่แอลกอฮอล์ หรือหมู่อัลดีไฮด์ หรือ หมู่คาร์บอกซิลิกเชื่อมต่อกับวงแหวนหกเหลี่ยม ได้แก่ ผลของวานิลลา ประโยชน์ของฟีนอลิก หลายชนิดมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ สามารถป้องกันโรคต่างๆ โดยเฉพาะโรคหัวใจ



ภาพที่ 10 ตัวอย่างโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิก

ที่มา: (Vermeris & Nicholson, 2006)

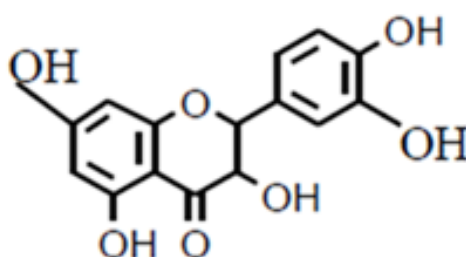
2. ฟลาโวนอยด์

ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) เป็นสารประกอบฟีนอลิกที่พบมากชนิดหนึ่ง จะพบมากในพืชผักและผลไม้ มีหน้าที่สองอย่าง คือ เป็นรงควัตถุ ทำหน้าที่กรองแสงที่มีความยาวคลื่นที่จำเพาะเจาะจง และทำหน้าที่เป็นสารต้านออกซิเดชัน โดยไปกำจัดอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในเซลล์พืชออกไป ความสามารถในการต้านออกซิเดชันขึ้นอยู่กับโครงสร้างของฟลาโวนอยด์ และสมบัติของฟลาโ

นอยด์ ยังสามารถช่วยลดการอักเสบ ช่วยให้หลอดเลือดแข็งตัว ทำให้การไหลเวียนเลือดดีขึ้น ต่อด้านแบคทีเรียและไวรัส ด้านการเกิดมะเร็ง ยับยั้งการแบ่งตัวและเพิ่มจำนวนของเซลล์มะเร็ง ลดโคเลสเตอรอล และช่วยเสริมการทำงานของวิตามินซี (ณัฐริกา, 2549)

2.1 โครงสร้างโมเลกุลของฟลาโวนอยด์

มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนแอโรมาติก (Aromatic ring) ที่มีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) รวมอยู่ในโมเลกุล ตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป สามารถละลายในน้ำได้ ส่วนใหญ่มักพบอยู่ร่วมกับน้ำตาล ในรูปของสารประกอบไกลโคไซด์ (Glycoside)



ภาพที่ 11 ตัวอย่างโครงสร้างของฟลาโวนอยด์

ที่มา: (ณัฐริกา, 2549)

ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้

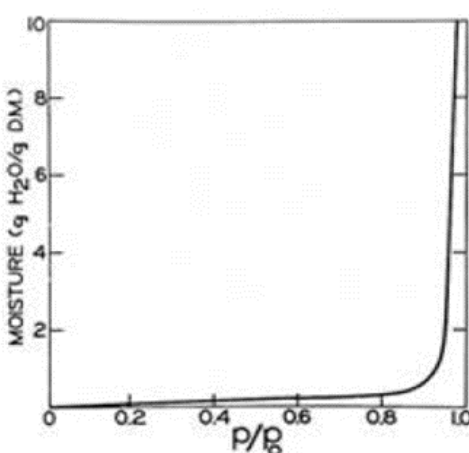
ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ (Water activity : a_w) ในอาหารจะประกอบด้วยน้ำอยู่ 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งเป็นน้ำที่อาหารยึดไว้ เรียกว่า bound moisture content จุลินทรีย์จะนำน้ำส่วนนี้ไปใช้ประโยชน์ได้ค่อนข้างยาก อีกส่วนหนึ่งคือน้ำอิสระที่อยู่รอบๆ องค์ประกอบของสารอาหารเรียกน้ำส่วนนี้ว่า น้ำที่เป็นประโยชน์ (Available water) หรือวอเตอร์แอกติวิตี้ จุลินทรีย์สามารถนำน้ำส่วนนี้ไปใช้ประโยชน์เพื่อการเจริญเติบโตได้ (อนุสรนา นาดิ, 2554) ซึ่งค่าวอเตอร์แอกติวิตี้สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$a_w = \frac{P}{P_0} = \frac{E.R.H}{100} \quad (12)$$

เมื่อ	a_w	คือ water activity, decimal
	P	คือ ความดันไอของน้ำของเหลวในอาหารที่ต้องการทราบ
	P_0	คือ ความดันไอน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน

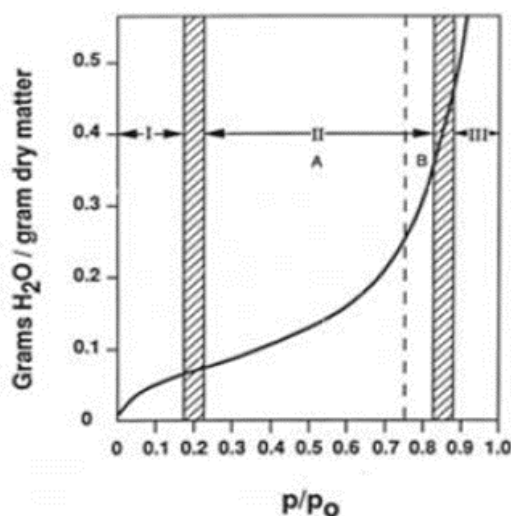
E.R.H คือ ความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดสมดุล (Equilibrium relative humidity)

การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตีออกมาเป็นกราฟ เรียกว่า กราฟไอโซเธอร์มการดูดซับความชื้น (Moisture sorption isotherm) ถ้าอาหารมีความชื้นน้อยจะดูดความชื้นจากอากาศเรียก Adsorption isotherm ถ้าอาหารมีความชื้นมากจะสูญเสียความชื้นแก่อากาศเรียกว่า Desorption isotherm น้ำที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตีสูงสุด ได้แก่ น้ำบริสุทธิ์ และเมื่อมีชีวะสารปนอยู่ในน้ำจะทำให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตีในอาหารลดลง ดังภาพที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอกติวิตีในอาหาร และปริมาณความชื้นในอาหารจำพวกอาหารสด และภาพที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวอเตอร์แอกติวิตีในอาหารและปริมาณความชื้นในอาหาร เมื่อมีความชื้นต่ำ ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงน้ำในบริเวณ I ของกราฟจะเป็นส่วนที่ถูกเกาะเกี่ยวไว้อย่างแน่นหนาที่มีการเคลื่อนที่ไว้น้อยที่สุด ไม่สามารถเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งได้ที่ -40°C เป็นน้ำโมโนเลเยอร์ ส่วนน้ำในบริเวณ II ของกราฟส่วนใหญ่ไม่สามารถเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งได้ที่ -40°C แต่เมื่อรวมกับของแข็งแล้ว ทำให้เกิดลักษณะพลาสติกเป็นน้ำในมัลติเลเยอร์และน้ำในแคพพิลลารี น้ำจากทั้ง 2 บริเวณนี้มีน้อยกว่าร้อยละ 5 ของอาหารสดที่มีความชื้นสูงทั่วไป น้ำในบริเวณที่ III สามารถเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งได้ ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายได้และทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ ดังนั้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตีจึงเป็นปัจจัยที่ชี้ระดับปริมาณน้ำต่ำสุดที่มีอยู่เพื่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังมีผลกระทบต่อการทำงานของเอ็นไซม์และวิตามินในอาหาร ซึ่งเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงสี รส และกลิ่นของอาหารได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในอาหารและค่าแอกติวิตีของน้ำในอาหารทั่วไป

ที่มา: (อนุสรานาตี, 2554)



ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอกติวิตีของน้ำในอาหารและปริมาณความชื้นในอาหารที่มีความชื้นต่ำ
ที่มา: (อนุสรานาตี, 2554)

สี (Color) จะแสดงถึงคุณภาพของอาหารและผลิตผลทางเกษตร ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพการยอมรับของผู้บริโภค หากมีสีที่ผิดปกติผู้บริโภคส่วนใหญ่อาจจะไม่ยอมรับและอาจไม่คำนึงต่อคุณภาพด้านอื่นต่อไป เช่น กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัส เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้งเกิดขึ้นได้จากการระเหยของน้ำออกจากผิววัสดุระหว่างการอบแห้ง รวมถึงการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ เช่น Enzymatic browning non-enzymatic browning และ Caramelization reactions โดยปกติแล้วการเปลี่ยนแปลงของสีระหว่างการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของกระบวนการอบแห้ง เช่น ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง หรือการใช้สารป้องกันการเปลี่ยนของสี (Color protective agent) หรือ การอบแห้งเป็นช่วง ๆ (Intermittent drying) (อนุสรานาตี, 2554)

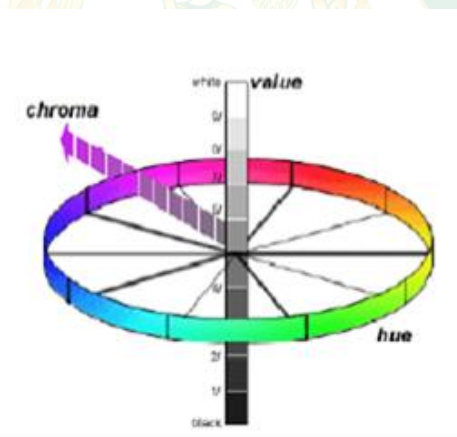
การวิเคราะห์สีระบบ CIE $L^* a^* b^*$ (CIE LAB) ในธรรมชาติแสงเป็นพลังงานที่มีสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีความยาวคลื่นที่ตามองเห็นอยู่ในช่วง 380-780 nm โดยระบบสีที่นิยมใช้ได้แก่ CIE หรือ Tristimulus system ระบบนี้เป็นระบบที่ Commission International de l'Eclairage (CIE) ได้พัฒนาระบบของการวัดสีในรูปของ Objective ที่ไม่ต้องอาศัยประสบการณ์ หรือความคิดของมนุษย์ในการวัดสี การวัดสีระบบนี้มีข้อดี คือ เป็นระบบที่ไม่ขึ้นกับการมองเห็นของแต่ละบุคคล เป็นระบบที่วัดสีออกมาเป็นตัวเลข เป็นระบบที่สามารถนำไปคำนวณ ดังนั้นการมองเห็นสีของวัตถุ ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสง วัตถุที่มีสี และสายตามนุษย์ ถ้าเราสามารถวัดออกมาเป็นตัวเลขได้

ก็สามารถวัดค่าสีออกมาเป็นตัวเลขได้ โดยทั่วไปมนุษย์จะระบุลักษณะสีของวัตถุที่มองเห็นเป็น 3 ลักษณะ คือ Hue, Value และ Chrome

- Hue หมายถึง สีที่ปรากฏให้เห็น (เฉดสี) เป็นชื่อของสีหลักที่แตกต่างกัน ในระบบ Munsell จะแบ่งออกเป็น 5 สี คือ แดง เหลือง เขียว น้ำเงิน ม่วง

- Value (lightness) หมายถึง ความสว่างของสี หรือปริมาณแสงที่สะท้อนออกมาจากวัตถุ หากมีปริมาณแสงที่สะท้อนออกมามากจะทำให้เห็นสีสว่าง ถ้าปริมาณแสงสะท้อนน้อยจะทำให้เห็นสีเข้ม หรือมืด มีค่าตั้งแต่ 0 = Black (หมายถึงวัตถุดำสมบูรณ์) ถึง 10 = White (หมายถึงวัตถุขาวสมบูรณ์)

- Chroma (Saturation) หมายถึง ค่าความบริสุทธิ์ (Purity) ของสี สีที่บริสุทธิ์มากที่สุด คือ สีที่ไม่มีแสงสีเทาผสม ซึ่งได้แก่สีหลัก (Hue) ทั้ง 100 สี แบ่งสเกล เป็น 0 ถึง 100 เป็นการวัดความแตกต่างของสีหลักจากสีเทาที่ Lightness เดียวกัน



ภาพที่ 14 แผนภาพสีแดง Hue Value และ Chroma

ที่มา: (อนุสรานาดี, 2554)

ระบบ CIE L* a* b* เป็นระบบสีที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

L* ใช้กำหนดค่าความสว่าง

L = 0 = Perfect black sample

L = 100 = Perfect white sample

a* ใช้กำหนดสีแดง หรือสีเขียว

a เป็น + วัตถุมีสีออกแดง

a เป็น - วัตถุมีสีออกเขียว

b* ใช้กำหนดสีเหลือง หรือสีน้ำเงิน

b เป็น + วัตถุมีสีออกเหลือง

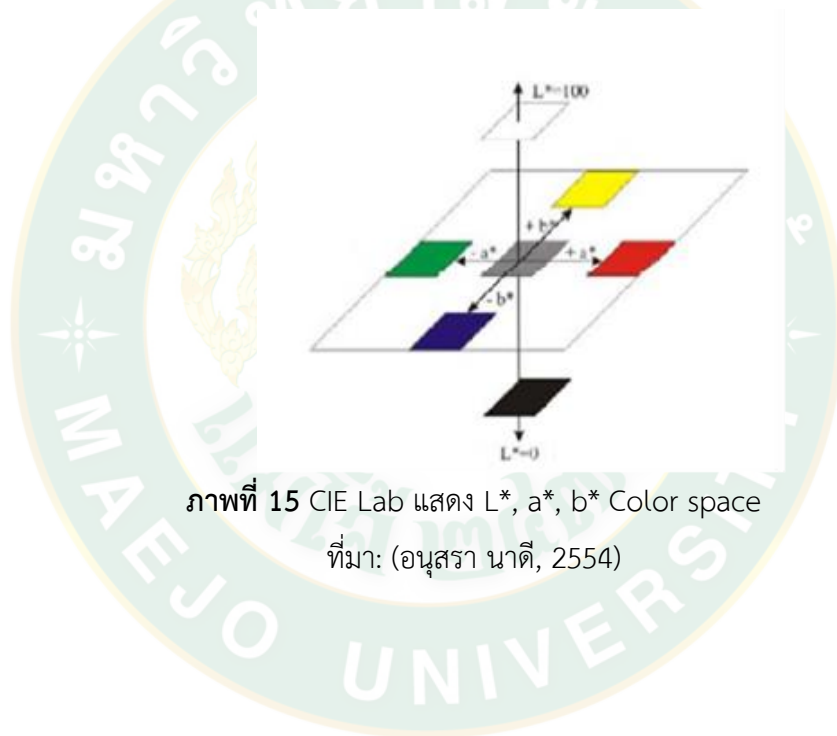
b เป็น - วัตถุมีสีออกน้ำเงิน

และในการหาค่าความแตกต่างของสีที่เป็นตัวเลขนั้น เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 14 จะพบว่า จุดๆหนึ่งใน Space นั้นเป็น L^* , a^* , b^* และเมื่อสีมีการเปลี่ยนเฉดสีไปจะได้อีกจุดใน Space เป็น L_0^* , a_0^* และ b_0^* ซึ่ง 2 จุดนี้จะมีระยะห่างกันใน Space เท่าไร ก็จะบ่งบอกถึงความแตกต่างของสีดังกล่าวต่อไป

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (13)$$

เมื่อ ΔE คือ ค่าความแตกต่างของสี

เมื่อ L_0^* , a_0^* และ b_0^* คือ ค่าเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ไบโหม่อน



ภาพที่ 15 CIE Lab แสดง L^* , a^* , b^* Color space

ที่มา: (อนุสรานาดี, 2554)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุภวรรณ และคณะ (2555ก) ศึกษาการอบแห้งใบบัวบกเพื่อผลิตเป็นใบบัวบกแห้งขงดื่ม และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบบัวบกด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดและในส่วนสุดท้ายการทดสอบทางประสาทสัมผัสและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบอยู่ระหว่าง 50-70 °C กำลังของอินฟราเรดเท่ากับ 500-1500 W การทดลองเริ่มจากใบบัวบกสดที่มีความชื้นเริ่มต้น 600% มาตรฐานแห้ง อบแห้งจนกระทั่งใบบัวบกแห้งมีความชื้นสุดท้าย 20% มาตรฐานแห้ง จากผลการทดลองพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli et al. สามารถอธิบายจลนศาสตร์ของการอบแห้งใบบัวบกได้ดีที่สุดทุกเงื่อนไขของการทดลอง เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยของแนวทางการอบแห้งต่าง ๆ ที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์คุณภาพและความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งใบบัวบก พบว่า การอบแห้งใบบัวบกด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 1500 W อุณหภูมิอบแห้ง 70 °C ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด (30 นาที) และมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด (0.31 MJ/kg of water evaporated) นอกจากนี้ในการศึกษาได้ทำการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ใบบัวบกแห้งในรูปของชาสมุนไพรขงดื่ม โดยประเมินทางประสาทสัมผัส พบว่า อุณหภูมิอบแห้งและกำลังรังสีอินฟราเรดมีผลต่อคุณลักษณะด้าน สี กลิ่น รสชาติ และรูปลักษณะ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

อนุสุรา และคณะ (2555) ศึกษาแนวทางการอบแห้งใบเตยเพื่อใช้ทำชาสมุนไพรด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน โดยเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะพิจารณาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง คุณภาพของใบเตยหลังการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง การทดลองอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 45-65 °C กำลังรังสีอินฟราเรด 500 และ 1000 W ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของใบเตยอยู่ในช่วง 400-600% มาตรฐานแห้ง และ 8-12% มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ จากผลการทดลอง พบว่า อัตราการอบแห้งจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูง แต่ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่ใช้ทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 1000 W ร่วมกับลมร้อน และการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว คือ แบบจำลอง Logarithmic ส่วนแบบจำลองที่ใช้ทำนายการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 500 W ร่วมกับลมร้อน คือ แบบจำลอง Page โดยผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองดังกล่าว ในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ พบว่า ร้อยละการคืนตัวและค่าสีในระบบ CIE (L^* , a^* และ b^*) แสดงให้เห็นว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 95%

จุฑารัตน์ และคณะ (2557) ศึกษาแนวทางการอบแห้งปลาข้าวสารแทนการทอดน้ำมันเพื่อใช้เป็นอาหารสุขภาพโดยใช้ตู้อบแห้งแบบภาคที่ใช้ลมร้อน และรังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งพลังงานความร้อน และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลาข้าวสาร

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล และพลังงานกระตุ้นในการทดลองนี้ และได้ทำการศึกษาปัจจัยอุณหภูมิอบแห้งระหว่าง 50-70 °C และความเข้มของรังสีอินฟราเรดที่ 500-1000 W ที่มีผลต่อการลดความชื้นของปลาข้าวสาร โดยความเร็วของลมร้อนที่เลือกใช้มีค่าเฉลี่ย 1.0 ± 0.2 เมตร/วินาที ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของปลาข้าวสารแห้งอยู่ในช่วง 150-155 % มาตรฐานแห้ง และ $15 \pm 2.0\%$ มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้งจะแปรผันกับอุณหภูมิอบแห้งและกำลังของรังสีอินฟราเรด และเมื่อนำผลการทดลองมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลหลายๆ รูปแบบด้วยวิธีการสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น โดยพิจารณาเลือกสมการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการทำนายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลาข้าวสารได้ดีที่สุด จากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ผลการทดลองสรุปได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page อธิบายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลาข้าวสารจากการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน และรังสีอินฟราเรดได้ดีที่สุด สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ที่หาได้จากกฎการแพร่ของฟิกส์ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของปลาข้าวสาร ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอบแห้ง และกำลังของรังสีอินฟราเรด และมีค่าอยู่ในระดับ 10^{-4} ตารางเมตร/ชั่วโมง และพบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่ากรณีการอบแห้งด้วยลมร้อน

Adak et al. (2017) ศึกษาผลกระทบของสภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน เช่น กำลังอินฟราเรด อุณหภูมิลมร้อน และความเร็วลม วิเคราะห์คุณภาพสตรอเบอร์รี่ พบว่า การอบแห้งลดลงเมื่อเพิ่มกำลังอินฟราเรด อุณหภูมิลมร้อน และความเร็วลม จากกำลัง 100-300 W อุณหภูมิ 60-80 °C และความเร็ว 1.0-2.0 เมตร/วินาที คุณภาพของสีลดลง สำหรับปริมาณฟีนอลและแอนโธไซยานินทั้งหมด 300 วัตต์ , 60 °C และ 1.0 เมตร/วินาที ดีกว่าการทดลองอื่น ๆ กระบวนการอบแห้งช่วยเพิ่ม N, P และ K และลดปริมาณ Ca, Mg, Fe, Mn, Zn และ Cu สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเก็บสารอาหารของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดของสตรอเบอร์รี่คือ 200 W, 100 °C และ 1.5 เมตร/วินาที

วิจิตรา และคณะ (2561) ศึกษาสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ โดยวิธี 2,2 -Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) และ Ferric ion reducing antioxidant power assay (FRAP) ในใบหม่อน 2 สายพันธุ์ คือ สายพันธุ์บุรีรัมย์ 60 และสกลนคร 72 ผลการศึกษาพบว่า ใบหม่อนทั้ง 2 สายพันธุ์ ที่เปรียบเทียบระหว่างการสกัดด้วยแอลกอฮอล์กับน้ำ ความชื้นอยู่ในช่วง 4.0-4.2% และมีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด คือ 2,433.31-2,127.18 μg Gallic acid equivalent/g extract, 74.81-76.73% และ 107.09-107.09-117.98 mg Trolox equivalent/g extract ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าการสกัดใบหม่อนด้วยน้ำอุณหภูมิ 100 °C มีกิจกรรมการต้าน

อนุมูลอิสระต่ำสุดในช่วง 488.29-805.09 $\mu\text{g Gallic acid equivalent/g extract}$, 36.67-42.56% และ 3.30-6.49 mg Trolox equivalent/g extract ตามลำดับ

ฤทัยทิพย์ และคณะ (2558) หม่อน (*Morus alba*) เป็นพืชชนิดหนึ่งที่สามารถใช้ประโยชน์ได้หลายส่วน (ใบและผล) ใบหม่อนนิยมใช้เป็นอาหารเลี้ยงหนอนไหม งานวิจัยนี้ศึกษาฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และวิตามินซี ในใบหม่อน 8 สายพันธุ์ โดย 6 สายพันธุ์จากประเทศจีน (SNKM14102, SNKM14104, SNKM14122, SNKM14123, SNKM14128 และ SNKM14133) และอีก 2 สายพันธุ์จากประเทศไทย (Sakon Nakhon and Buriram 60) ผลการศึกษาพบว่าใบหม่อนสายพันธุ์ SNKM14128 มีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด ($p \leq 0.05$) ส่วนสายพันธุ์ Sakon Nakhon และ SNKM14123 เป็นแหล่งที่ดีของสารประกอบฟีนอลิก ใบหม่อนสายพันธุ์จากประเทศจีนทั้ง 6 สายพันธุ์มีปริมาณวิตามินซีต่ำกว่าสายพันธุ์ Sakon Nakhon และ Buriram 60 ดังนั้นใบหม่อนสายพันธุ์ SNKM14128 และ SNKM14123 จึงมีศักยภาพนำไปใช้เป็นส่วนผสมในอาหารเนื่องจากมีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูง

Katsube et al. (2009) ใบหม่อน (*Morus alba L.*) เป็นแหล่งอาหารที่มีสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น เคอร์ซีติน เนื่องจากมีสารประกอบที่ค่อนข้างสูง ศึกษาผลกระทบของกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระและความคงตัวของสารประกอบโพลีฟีนอลในใบหม่อน สารประกอบหลักของฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในใบหม่อน คือ เคอร์ซีติน โกลโคไซด์ และกรดโคโลจินิก ใบหม่อนสดถูกอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่าง ๆ และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระโดยใช้ DPPH ตรวจวัดอนุมูลอิสระและระดับสารต้านอนุมูลอิสระที่ถูกวัด กิจกรรมอนุมูลอิสระ DPPH และสารประกอบโพลีฟีนอลในใบหม่อนอบแห้งที่ 60 °C หรือต่ำกว่าไม่แตกต่างจากใบหม่อนแห้งที่แช่แข็ง ในขณะที่ทั้งสองค่าของใบหม่อนอบแห้งที่ 70 °C และมากกว่ามีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการควบคุมอุณหภูมิเป็นสิ่งสำคัญในการผลิตใบหม่อนเพื่อรักษาระดับสารต้านอนุมูลอิสระและสารประกอบโพลีฟีนอล

Lee et al. (2006b) ใบชาเขียวที่ผ่านกระบวนการจะถูกนำมาฉายรังสีอินฟราเรดไกล (FIR) ที่ 8 อุณหภูมิ (80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 และ 150 °C) เป็นเวลา 10 นาที หลังจากการฉายรังสี FIR จะเตรียมชาเขียวโดยแช่ใบในน้ำเดือด และพิจารณาคูณสมบัติทางเคมีกายภาพของชาเขียว การฉายรังสี FIR ที่อุณหภูมิ 90 °C เพิ่มปริมาณฟีนอลทั้งหมดของชาเขียวจาก 244.7 เป็น 368.5 mg/g และปริมาณฟลาโวนอลทั้งหมดตั้งแต่ 122.0 ถึง 178.7 มิลลิกรัม/กรัม เปรียบเทียบกับการควบคุมที่ไม่มีการฉายรังสี การฉายรังสี FIR ยังส่งผลต่อปริมาณ Epigallocatechin และ Epigallocatechin gallate อย่างมีนัยสำคัญ Nitrite scavenging activity ยังเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มการฉายรังสี FIR จนอุณหภูมิสูงขึ้น 110 °C อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงสีของชาเขียวที่ฉายรังสีด้วย FIR ที่อุณหภูมิ

90 และ 100 °C เล็กน้อย การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าคุณภาพทางเคมีของชาเขียวได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญอุณหภูมิการฉายรังสี FIR ของใบชาเขียว

Wanyo et al. (2011) การอบแห้งรังสีอินฟราเรดไกล่ร่วมกับการพาความร้อน (FIR-HA) เพื่อปรับปรุงลักษณะสีและสารต้านอนุมูลอิสระของใบหม่อน คุณสมบัติของสารต้านอนุมูลอิสระและสารประกอบฟีนอลถูกกำหนดการอบแห้งรังสีอินฟราเรดไกล่ร่วมกับการพาความร้อนของใบหม่อนและเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์และใบสด จากการทดลองพบว่าการอบแห้ง FIR-HA ค่าของ L และ b มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์และมีฟีนอลิกทั้งหมด(TPC) และปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (TFC) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับใบสด ในขณะที่ FIR-HA มีสีคล้ายกับใบสด และมีฟีนอลิกทั้งหมด(TPC) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ให้ผลลัพธ์คล้ายกับ 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพในการต่อต้านอนุมูลอิสระลดลงของ FRAP โดยชาทั้งสองชนิดมีค่า FRAP assay ต่ำกว่าใบสด การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับวิธีการวัดความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระ FRAP assay เป็นวิธีการในการวัดพลังงานการลดทั้งหมดของสารที่บริจาคอิเล็กตรอนในขณะที่ DPPH assay เป็นวิธีการวัดความสามารถของโมเลกุลสารต้านอนุมูลอิสระในการดับอนุมูลอิสระ DPPH ดังนั้นการสลายตัวของสารประกอบโพลีฟีนอลโดยกระบวนการทางความร้อนอาจส่งผลให้ปล่อยสารต่อต้านอนุมูลอิสระซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมีและชีวภาพที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์การศึกษา	สิ่งที่ศึกษา	การทดสอบ
สุวรรณ และ คณะ (2555)	การอบแห้งใบบัวบกเพื่อผลิตใบ บัวบกแห้งขงต้มด้วยการแผ่รังสี อินฟราเรด: จลนพลศาสตร์ ความสัมพันธ์พลังงานและ คุณภาพ	ใบบัวบก	ศึกษาแนวทางการอบแห้งใบบัวบก เพื่อผลิตเป็นใบบัวบกแห้งขงต้ม และ สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำ นาจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบ บัวบกด้วยการแผ่รังสีได้แดง และ ทดสอบทางประสาทสัมผัสและความ สิ้น เปลืองพลังงานจำเพาะ	อุณหภูมิ 50-70 °C กำลังอินฟราเรด 500-1500 W จลนพลศาสตร์การอบแห้ง
อนุสรานาดี และคณะ (2555)	จลนพลศาสตร์การอบแห้ง ใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรด ร่วมกับลมร้อนและลมร้อน	ใบเตย	ศึกษาแนวทางการอบแห้งใบเตยเพื่อ ใช้ทำชาด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับ ลมร้อน โดยเปรียบเทียบกับการ อบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะพิจารณาจลนพลศาสตร์การ อบแห้ง คุณภาพของใบเตยหลังการ อบแห้ง และความสัมพันธ์ของพลังงาน จำเพาะ	อุณหภูมิ 50-70 °C กำลังอินฟราเรด 500-1500 W

ตารางที่ 3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา	สิ่งที่ศึกษา	การทดสอบ
จุฑารัตน์ และ คณะ (2557)	แนวทางการพัฒนาปลาข้าวสาร กรอบด้วยการอบแห้งลมร้อน และรังสีอินฟราเรด	ปลาข้าวสารกรอบ	ศึกษาแนวทางการอบแห้งปลา ข้าวสารและการทอดด้วยน้ำมัน เพื่อใช้เป็นอาหารสุขภาพโดย ใช้ตู้อบแห้งแบบภาตที่ใช้ลมร้อน และรังสีอินฟราเรดเป็นแหล่ง พลังงานความร้อน และสร้าง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ เอมพิริคัลทำนายจลนพลศาสตร์ การอบแห้งปลาข้าวสารคำนวณ หา ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน ประสิทธิผล และพลังงานกระตุ้นใน การอบแห้ง	- อุณหภูมิ 50-70 °C - กำลังอินฟราเรด 500-1500 W
Adak et al.(2017)	Infrared drying of strawberry	สตรอเบอร์รี่	ศึกษาผลกระทบของสภาวะการ อบแห้งที่แตกต่างกัน เช่น กำลัง อินฟราเรด อุณหภูมิลมร้อน และ ความเร็วลม วิเคราะห์คุณภาพ สตรอเบอร์รี่	- อุณหภูมิ 60-100 °C - กำลังอินฟราเรด 100-300 W - ความเร็วลม 1.0- 2.0 m/s

ตารางที่ 3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา	สิ่งที่ศึกษา	การทดสอบ
วิจิตร และคณะ(2561)	การวิเคราะห์ปริมาณสารฟีนอลิกและสารต้านอนุมูลอิสระในใบหม่อน 2 สายพันธุ์	ใบหม่อน	ศึกษาสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี 2,2 -Diphenyl-1-picrylhydrazyl(DPPH) และ Ferric ion reducing antioxidant power assay (FRAP)	- สายพันธุ์บุรีรัมย์ 60 และ สกลนคร 72 - สกัดตัวอย่างด้วยแอลกอฮอล์กับน้ำ
ฤทัยทิพย์ และคณะ (2558)	การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดที่สามารถต้านอนุมูลอิสระและวิตามินซีของใบหม่อนจำนวน 8 สายพันธุ์	ใบหม่อน	ศึกษาฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และ วิตามินซี ในใบหม่อน 8 สายพันธุ์	- สารต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด
Katsube et al.(2006)	Effect of air-drying temperature on antioxidant capacity and stability of polyphenolic compounds in mulberry (Morus alba L.) leaves	ใบหม่อน	ศึกษาผลกระทบของกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระและความคงตัวของสารประกอบฟีนอลิกในใบหม่อน สารประกอบหลักของฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในใบหม่อน	- อุณหภูมิ 40-110 °C - กำลังอินฟราเรด 300 W

ตารางที่ 3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา	สิ่งที่ศึกษา	การทดสอบ
Lee et al. (2006 b)	Effect of Far-Infrared Irradiation on Catechins and Nitrite Scavenging Activity of Green Tea	ชาเขียว	ศึกษาอุณหภูมิอบแห้งรังสีอินฟราเรดไกล (FIR) ที่ 8 อุณหภูมิ 10 นาที	- อุณหภูมิ 80, 90,100, 110, 120, 130, 140, and 150 °C - กำลังอินฟราเรด 300 W
Wanyo et al. (2011)	Improvement of quality and antioxidant properties of dried mulberry leaves with combined far-infrared radiation and air convection in Thai tea process	ใบหม่อน	ศึกษาการอบแห้งรังสีอินฟราเรด ไกลร่วมกับความร้อน (FIR-HA)	- อุณหภูมิ 40 °C - กำลังอินฟราเรด 250 W

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

วัตถุดิบ

ใบหม่อนพันธุ์บุรีรัมย์ (Mulberry leaves) ที่ใช้ในการทดลอง จากศูนย์หม่อนไหมเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์ พระบรมราชินีนาถ เชียงใหม่ นำมาล้างด้วยน้ำสะอาด 3 ครั้ง จากนั้นนำไปหม่อนไปสเด็ดน้ำให้แห้ง และนำไปหม่อนมาตัดให้มีขนาดประมาณ 1 เซนติเมตร ยาว 4 เซนติเมตร และหาความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน (AOAC, 1995)

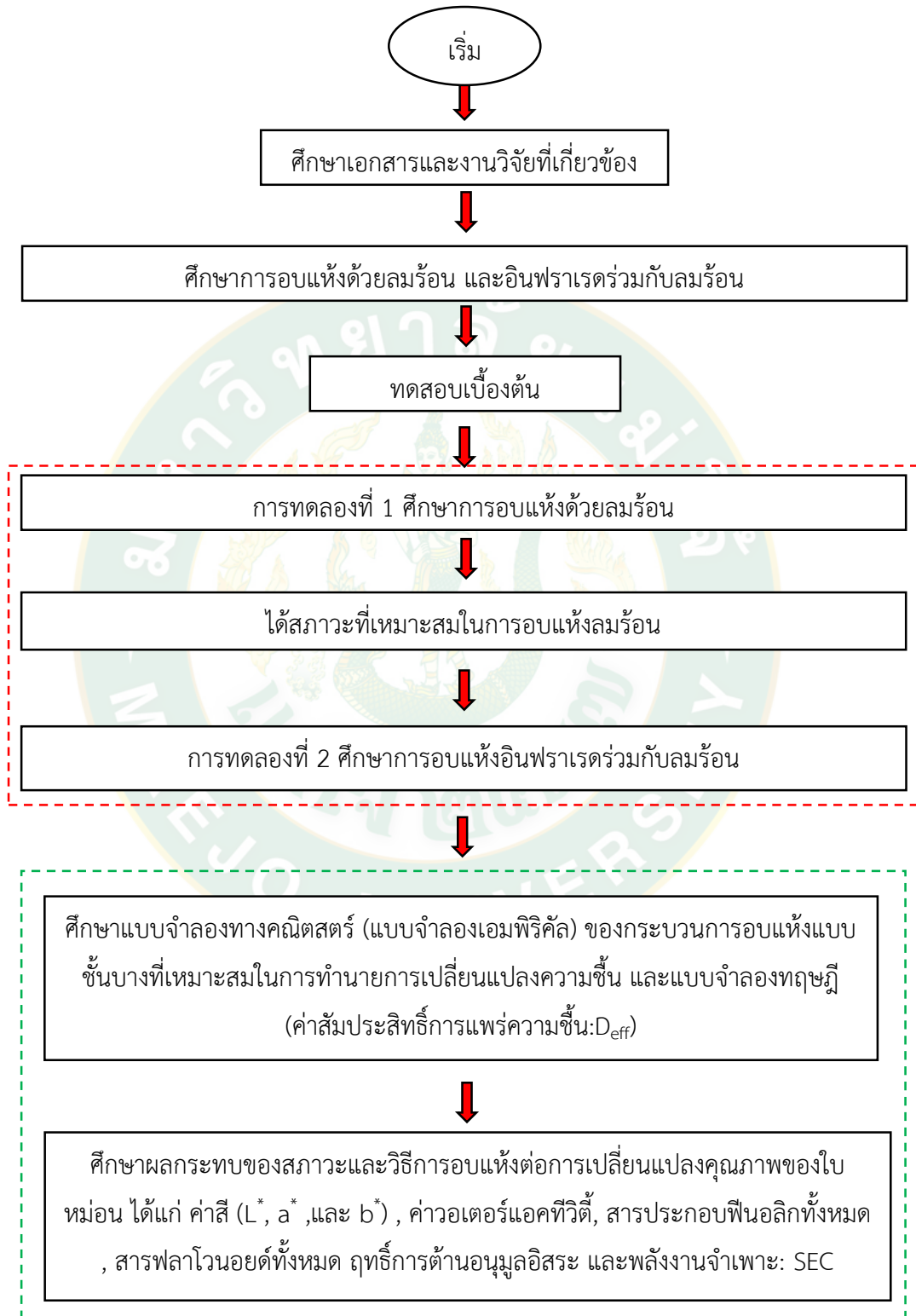
อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องอบแห้งลมร้อน ยี่ห้อ Binder รุ่น FD 115 ประเทศ เยอรมนี
2. อินฟราเรดกำลัง 250 W จำนวน 3 แท่ง ยี่ห้อ Ceramick รุ่น FTE ประเทศไทย
3. ถาดอบแห้งสแตนเลสขนาด 29×44×2 เซนติเมตร ประเทศไทย
4. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance) ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CP 3202s ประเทศ สหรัฐอเมริกา
5. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance) ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Ohaus pioneer รุ่น PA214 ประเทศ สหรัฐอเมริกา
6. เครื่องวัดสี (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Hunterlab รุ่น MiniScan XE plus ประเทศ สวิตเซอร์แลนด์
7. เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w meter) ยี่ห้อ AQUA lab รุ่น 3TE ประเทศ สวิตเซอร์แลนด์
8. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Labomed, inc. รุ่น Spectro SC series 002416 ประเทศ สหรัฐอเมริกา
9. เครื่องหมุนเหวี่ยง ยี่ห้อ Germany industrial corp. รุ่น PLCc-012e ประเทศ ไต้หวัน
10. เครื่องวัดค่า pH (pH meter portable) ยี่ห้อ Fiveosy™ Plus รุ่น FEP20 ประเทศ สวิตเซอร์แลนด์
11. เครื่องวัดค่าพลังงาน (Energy meter) ยี่ห้อ Hidance

สารเคมี

1. สารละลายเอทานอล (Ethanol alcohol: C_2H_5OH) บริษัท RCI-labscan ประเทศไทย
2. สารละลาย Folin-Ciocalteu reagent บริษัท Lobachemie ประเทศ อินเดีย
3. สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate: Na_2CO_3) บริษัท Ajax finechem ประเทศ ออสเตรเลีย
4. สารมาตรฐานกรดแกลลิก (Gallic acid) บริษัท Merck ประเทศ เยอรมัน
5. สารละลาย DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) บริษัท Aldrich ประเทศ เยอรมัน
6. สารละลายโซเดียมไนไตรต์ (Sodium nitrite: $NaNO_2$) บริษัท Kemaus ประเทศ ออสเตรเลีย
7. สารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Aluminium chloride: $AlCl_3 \cdot 6H_2O$) บริษัท Kemaus ประเทศ ออสเตรเลีย
8. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide: $NaOH$) บริษัท Lobachemie ประเทศ อินเดีย
9. สารมาตรฐานเคอควิซิน (Quercetin) บริษัท Sigma ประเทศ สหรัฐอเมริกา
10. สารละลายโซเดียมอะซิเตท (Sodium acetate: $C_2H_3NaO_2 \cdot 3H_2O$) บริษัท Kemaus ประเทศ ออสเตรเลีย
11. สารละลายกรดแอสติก (Acetic acid: CH_3COOH) บริษัท Merck KGaA ประเทศ สวิตเซอร์แลนด์
12. สารละลาย TPTZ (2,4,6-tripyridyl-s-triazine) บริษัท Fluka ประเทศ สวิตเซอร์แลนด์
13. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid 37% : HCl) บริษัท RCI-labscan ประเทศไทย
14. สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride: $FeCl_3$) บริษัท Merck KGaA ประเทศ สวิตเซอร์แลนด์
15. สารมาตรฐานโทรลอกซ์ (Trolox: 6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid) บริษัท Aldrich ประเทศ รัสเซีย
16. สารละลายเมทานอล (Methanol: CH_3OH) บริษัท RCI-labscan ประเทศไทย

วิธีดำเนินการวิจัย





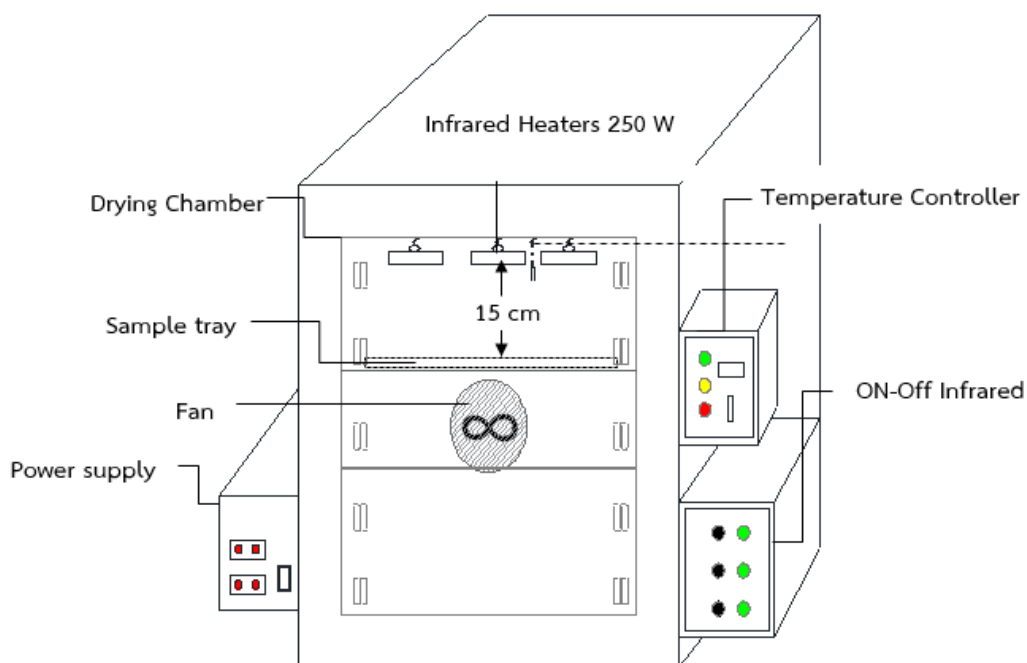
1. การเตรียมตัวอย่าง

นำไปหม่อนพันธุ์บุรีรัมย์ จากศูนย์หม่อนไหมเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์ พระบรมราชินีนาถ เชียงใหม่ ที่มีขนาด สีของใบ ใกล้เคียงกัน ค่าความชื้นเริ่มต้น 75-85% ฐานเปียก จากนั้นนำใบหม่อน มาล้างด้วยน้ำสะอาด 3 ครั้ง จากนั้นนำไปหม่อนไปสะเด็ดน้ำให้แห้ง และตัดใบหม่อนให้มีขนาดประมาณกว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 4 เซนติเมตร

2. การอบใบหม่อน

นำใบหม่อนที่ได้จากการเตรียม โดยชั่งน้ำหนักใบหม่อน 200 กรัม ใส่ถาดอบแห้งขนาด 29×44×2 เซนติเมตร จากนั้นนำเข้าเครื่องอบแห้ง แสดงดังภาพที่ 1 เป็นเครื่องอบแห้งลมร้อน ยี่ห้อ Binder รุ่น FD 115 ขนาด 55×55×38.5 เซนติเมตร ภายในห้องอบแห้งมีหลอดอินฟราเรดกำลัง 250 W จำนวน 3 หลอด โดยมีระยะห่างระหว่างหลอดกับวัสดุเท่ากับ 15 เซนติเมตร ในการอบแห้ง ใบหม่อนที่ความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 75-85% ฐานเปียก จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายของใบหม่อนน้อยกว่า 10% ฐานเปียก โดยมีเงื่อนไขการทดลองคือ การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C และการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดที่กำลัง 250 500 และ 750 W หลังจากการอบแห้ง

ในแต่ละสภาวะการทดลอง ตัวอย่างจะถูกไปปั่นให้ละเอียดและร่อนด้วยตะแกรงร่อนที่ขนาด 80 เมช เก็บตัวอย่างในถุงอะลูมิเนียมฟอยด์ปิดสนิท ที่อุณหภูมิ 4 °C จนกระทั่งนำไปวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและทางเคมี



ภาพที่ 17 เครื่องอบแห้ง

3. การหาความชื้น

การวิเคราะห์ความชื้นตามมาตรฐาน (AOAC, 1995) โดยชั่งน้ำหนัก 1-2 กรัม ลงในถ้วยอะลูมิเนียม นำไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักหลังอบแห้ง โดยความชื้นสามารถคำนวณจากสมการ (1)

การวิเคราะห์การอบแห้งนอกจากค่าความชื้น ยังมีค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำภายในวัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้น เมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินไปเป็นเวลาใด ๆ คือ อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) โดยอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณจากสมการ (3)

4. การหาอัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้ง (Drying rate , DR) คือ มวลของเหลวที่ระเหยต่อพื้นที่ที่เกิดการระเหยต่อเวลา จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเครื่องการอบแห้ง คุณสมบัติของวัสดุ และขนาดของวัสดุที่จะทำการอบแห้งซึ่งจะมีผลต่อการอบแห้ง โดยอัตราการอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการ (4)

5. การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

ในการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมของการอบแห้งใบหม่อน เพื่อทำนายพฤติกรรมของการอบแห้ง จะเลือกแบบจำลองอัตราการอบแห้งจากสมการเอมพิริคัล 8 แบบจำลอง ดังนี้ แบบจำลองของ Newton, Page, Henderson and Pabis, Two term, Modified Page , Logarithmic, Verma et al. และ Modified Henderson and Pabis โดย ซึ่งมีรูปแบบดังตารางที่ 1 และทุก ๆ กรณีจะมีการวิเคราะห์ความแม่นยำทางสถิติ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R²) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) และค่าไคสแควร์ (Chi-square, χ^2) ดังสมการ (5) ถึง (7)

6. การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient, D_{eff}) คือ คุณสมบัติเฉพาะทางกายภาพที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุซึ่งจะขึ้นอยู่กับความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ พิจารณาโดยอาศัยสมการการจำลองการแพร่ตามกฎข้อที่ 2 ของ Fick (Fick's second law of diffusion) ที่สมมติว่า การแพร่ออกของมวลน้ำหรือความชื้นจากวัสดุเกิดจากเกรเดียนต์ค่าความเข้มข้นของความชื้น

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 (D_{eff}) t}{L^2}\right) \quad (14)$$

เมื่อ t คือ เวลา (นาที)

เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งนาน จึงสามารถตัดแปลงสมการ และสามารถนำมาสร้างเป็นสมการเส้นตรงได้ดังสมการ (15)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 (D_{eff}) t}{L^2}\right) \quad (15)$$

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้น ($\ln MR$) กับ เวลาการอบแห้ง (t) และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งที่ สภาวะเหมาะสม ได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ (16)

$$D_{eff} = \frac{\text{slope} \cdot L^2}{\pi^2} \quad (16)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/min)
 L คือ ความหนาของตัวอย่าง (m)

7. การวิเคราะห์ค่าอวอเตอร์แอกติวิตี้

ค่า a_w วัดโดยเครื่องวัด a_w meter (ยี่ห้อ Aqua Lab รุ่น Series 3TE) ซึ่งแสดงค่า a_w ออกมา เป็นตัวเลขที่ไม่มีหน่วย มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยนำใบหม่อนอบแห้งในแต่ละสภาวะ จำนวน 3 กรัม โดย เครื่องจะใช้เวลาในการวัดค่า a_w ภายใน 5 นาที จากนั้นเครื่องจะแสดงผลบนหน้าจอพร้อมบันทึกค่า

8. การวิเคราะห์ค่าสี

การวิเคราะห์คุณภาพด้านสีของใบหม่อนอบแห้งจะใช้เครื่องวัดสีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Hunter lab รุ่น Mini Scan XE Plus การวิเคราะห์สีจะวิเคราะห์ด้วย ระบบ CIE โดยการวิเคราะห์วัดสีในเทอมของค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดงและสีเขียว (a^*) และค่าสี เหลืองและสีน้ำเงิน (b^*) และค่าความแตกต่างสีโดยรวม (Total color difference, ΔE) โดยค่าสี สามารถคำนวณได้จากสมการ (13)

9. การสกัดตัวอย่าง

วิธีการสกัดตัวอย่างดัดแปลงมาจากวิธี (วิจิตร และคณะ, 2561) การสกัดตัวอย่างด้วยเอทานอล โดยนำตัวอย่าง 5 กรัม สกัดด้วยเอทานอลความเข้มข้น 75% (โดยปริมาตรต่อปริมาตร) 50 มิลลิลิตร เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำสารสกัดที่ได้ไปหมุนเหวี่ยงที่ 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 เก็บตัวอย่างใส่ขวดปิดสนิท เก็บที่อุณหภูมิ $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ จนกว่าจะนำมาวิเคราะห์

10. การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

วิเคราะห์ฟีนอลิกทั้งหมดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu reagent ตามวิธีที่ดัดแปลงจากวิธีการของ (Onanong Kaisoon, 2011) โดยนำตัวอย่างปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง เติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ความเข้มข้น 2% (โดยมวลต่อปริมาตร) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ปิดปากหลอดด้วยกระดาษ ฟลอยด์หรือถุงฟอยด์ จากนั้นเติมสารละลาย Folin-Ciocalteu phenol reagent ลงไป 0.1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน จากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร คำนวณค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดแกลลิก (Gallic acid) รายงานผลเป็นกรัมกรดแกลลิกต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ($\text{g Gallic acid equivalent} / \text{g dry weight}$)

11. การวิเคราะห์ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมด

วิธีวิเคราะห์ฟลาโวนอยด์ทั้งหมดด้วยวิธี Colorimetric ตามวิธีที่ดัดแปลงจากวิธีการของ (Wanyo et al., 2011) เตรียมตัวอย่าง 0.5 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง ปิเปตน้ำกลั่น 2.25 มิลลิลิตร เติม NaNO_2 ความเข้มข้น 5 % (โดยมวลต่อปริมาตร) 0.15 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ 6 นาที จากนั้นปิเปต $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 10% (โดยมวลต่อปริมาตร) 0.3 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ 5 นาที หลังจากนั้นเติม 1 โมลาร์ NaOH 1 มิลลิลิตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร คำนวณค่าปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมดเทียบกับกราฟมาตรฐานเคอควิติน (Quercetin) รายงานผลเป็นกรัมเคอควิตินต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ($\text{g Quercetin equivalent} / \text{g dry weight}$)

12. การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

12.1 วิธี DPPH radical scavenging activity

เป็นวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ DPPH ตามวิธีการที่ดัดแปลงจากวิธีการของ (Shimada et al., 1992) และ (ประภาพรรณ พรหมศิริบุญกุล, 2551) ซึ่งสาร 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl 0.1972 กรัม จากนั้นปรับปริมาตรด้วยเมทานอลเป็น 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลาย DPPH เข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ปิเปตสารละลาย DPPH นี้มา 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยเมทานอล 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลาย DPPH เข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ (สารละลายนี้ควรเตรียมใหม่ทุกครั้งก่อนใช้งาน)

ปิเปตตัวอย่าง 0.1 ml ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย DPPH เข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ ในเมทานอล 2.9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันแล้ว ตั้งไว้ในที่มืดนาน 30 นาที (ในที่มืด) พร้อมกับทำตัวอย่างควบคุม (Control) หรือสารละลาย DPPH ที่ไม่มีตัวอย่างสารสกัด วิเคราะห์วิธีการเดียวกัน จากนั้น

นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร รายงานผลเป็นค่า (%Inhibition) คำนวณดังสมการ 17

$$\% \text{Inhibition} = \frac{(A_{\text{control}} - A_{\text{sample}})}{A_{\text{control}}} \times 100 \quad (17)$$

โดย A_{sample} = ค่าการดูดกลืนแสงของชุดทดสอบ

A_{control} = ค่าการดูดกลืนแสงของชุดควบคุม

12.2 วิธี FRAP assay

เป็นวิธีวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีรีดิวซ์เฟอร์ริกของสารต้านอนุมูลอิสระ ตามวิธีการที่ดัดแปลงจากวิธีการของ (เพชรุ่ง เทพทอง, 2555) เตรียมสารละลาย FRAP reagent โดยผสมสารละลาย Acetate buffer pH 3.6 สารละลาย FeCl_3 สารละลาย 2,4,6-tripyridyl-s-triazine (TPTZ) ใน 0.5 โมลาร์ HCl ในอัตราส่วน 10:1:1 ตามลำดับ จากนั้นเตรียมสารตัวอย่าง 40 ไมโครลิตร ผสมกับน้ำกลั่น 120 ไมโครลิตร และสารละลาย FRAP reagent 1200 μL ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน และตั้งทิ้งไว้ 6 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 593 nm คำนวณค่าดูดกลืนแสงโดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากกราฟมาตรฐานของ Ferrous sulfate (FeSO_4) แสดงค่าในรูปของ $\text{M Fe}^{2+}/\text{g dry weight}$

13. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

ในกระบวนการอบแห้ง พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง พลังงานจากวัสดุ และพลังงานที่ให้กับวัสดุอบแห้ง ซึ่งได้แก่ พลังงานความร้อน พลังงานไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นถึงคุณภาพผลิตภัณฑ์และพลังงานที่ใช้ นั่นคือ จะต้องไม่สิ้นเปลืองพลังงาน ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) คือ พลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำที่ระเหย ซึ่งเป็นส่วนกลับของอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (อีลีหัยะ และคณะ, 2555) สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ดังสมการ 16

$$SEC = \frac{P_e \times 3600}{W_i - W_f} \quad (18)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ($\text{kJ}/\text{g}_{\text{water}}$)

W_i คือ มวลใบหม่อนก่อนอบแห้ง (g)

W , คือ มวลใบหม่อนแห้งอบ (g)

P_e คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้ (kWh)

โดยค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้ ถ้าหากค่า SEC สูง จะมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่ำ และหากค่า SEC ต่ำ จะมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูง

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ผลการทดลองที่ได้จะนำมาวิเคราะห์โดยอาศัยหลักวิชาการทางสถิติของคุณภาพทางกายภาพและทางเคมี โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ซึ่งพิจารณาค่าที่ความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

สถานที่ดำเนินการวิจัย

ดำเนินการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการ (E215) อาคารเรียนรวมสาขาวิศวกรรมอาหาร (สำหรับนักศึกษาปริญญาโท และ ปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมอาหาร) คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์

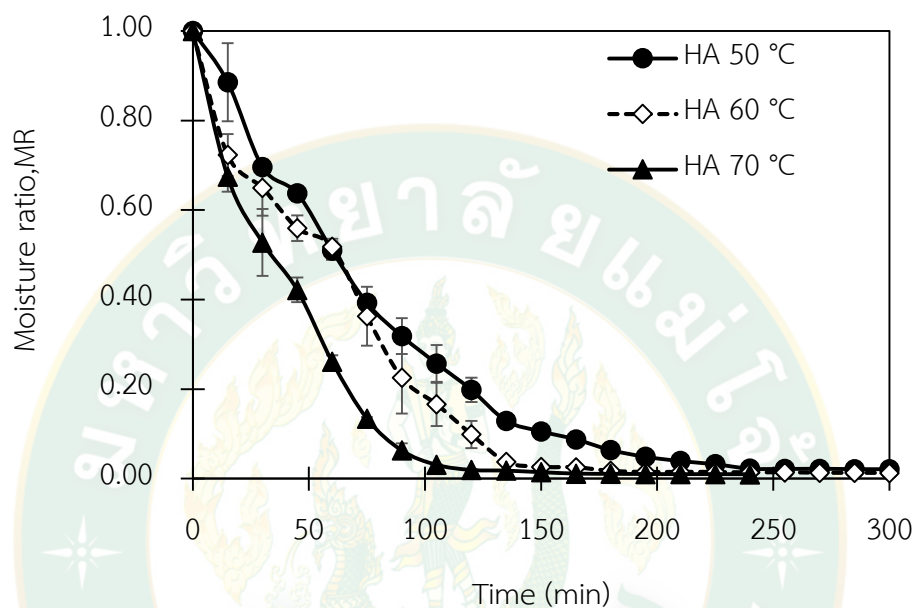
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากระบวนการอบใบหม่อนด้วยวิธีการอบแห้งลมร้อน และการอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน เพื่อทำการศึกษากการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสี ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ รวมทั้งทำการเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการอบใบหม่อน

การศึกษากการอบใบหม่อนด้วยลมร้อน

1. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบใบหม่อนผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน

การศึกษากผลของการอบใบหม่อนด้วยลมร้อน โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง คือ 50 60 และ 70 °C จากภาพที่ 18 การอบใบหม่อนจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นลดลงเมื่อระยะเวลาการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น โดยช่วงแรกอัตราส่วนความชื้นของตัวอย่างจะเกิดการลดลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นจะลดลงอย่างช้า ๆ และคงที่ในช่วงท้ายไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง นอกจากนี้ผลการศึกษาจากตารางที่ 4 ยังพบว่า อัตราส่วนความชื้นของใบหม่อนที่อุณหภูมิการอบแห้ง 70 °C มีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิ 60 และ 50 °C โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงส่งผลทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ผลต่างของความดันไอระหว่างตัวอย่างกับอากาศมีค่าสูง จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลได้ดีขึ้น จึงส่งผลทำให้น้ำระเหยออกจากตัวอย่างได้เร็วขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ น้ำฝน ไชยลังกา (2557) การอบแห้งสาหร่ายเตา พบว่า การอบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 65 70 และ 75 °C มีอัตราการอบแห้งสูงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้ง และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่อุณหภูมิการอบแห้ง 50-70 °C มีค่าอยู่ในช่วง 6.25×10^{-7} - 13.92×10^{-7} m²/min ซึ่งการที่อุณหภูมิในการอบแห้งสูงจะส่งผลต่อการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของใบหม่อน โดยที่อุณหภูมิอากาศสูงขึ้นจะเพิ่มพลังงานความร้อนหรือค่าเอนทัลปีในระบบมีค่าสูงขึ้น จึงช่วยเร่งอัตราการระเหยน้ำที่ผิวหน้าของใบหม่อน โดยมีค่าเท่ากับอัตราการเคลื่อนของน้ำภายในโครงสร้างที่มาเติมเต็มบริเวณผิวหน้าใบหม่อน ความร้อนที่เกิดขึ้นจะแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (Surface diffusion) ในของส่วนของการหาเวลาในการอบแห้งนั้นจะพิจารณาจากเวลาที่ความชื้นของใบหม่อนมีค่าน้อยกว่า 10% มาตรฐานเปียก (ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน [มผช.], 2557) โดยพบว่าในการอบแห้งที่ 70 °C ใช้เวลาในการอบแห้งเท่ากับ 105

นาที่ ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 60 และ 50 °C ที่ 135 และ 213 นาทีตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ มะลิ และคณะ (2559); เนาวนิตย์ และคณะ (2559) และ ฤทธิชัย และคณะ (2557) ที่ทำการศึกษารอบแห้งชาโมโรเฮยะ สระระแห่น และดอกคาโมมายล์ พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าอุณหภูมิต่ำ



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน
หมายเหตุ : HA คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน

ตารางที่ 4 อัตราการอบแห้งเฉลี่ย ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล เวลาอบแห้งและความชื้นสุดท้ายของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน

Sample	Drying rate ($\frac{g_{\text{water}}}{g_{\text{dry mass}} \cdot \text{min}}$)	$D_{\text{eff}} \times 10^{-7}$ (m^2/min)	Drying time (min)	Final moisture content (%w.b.)
HA 50 °C	1.84±0.32 ^b	6.25±0.09 ^c	213±3 ^a	8.81±1.02 ^a
HA 60 °C	2.24±0.29 ^b	9.31±0.16 ^b	135±3 ^b	8.29±1.12 ^a
HA 70 °C	2.81±0.25 ^a	13.92±0.08 ^a	105±3 ^c	7.08±1.10 ^a

หมายเหตุ : - ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์แสดงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

- HA คือ การอบด้วยแห้งลมร้อน

2. การศึกษาแบบจำลองการอบแห้งของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน

แบบจำลองการอบแห้งเป็นการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลความชื้นในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างการอบแห้ง จากการศึกษาทดลองการอบแห้งใบหม่อนด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C จะนำข้อมูลการอบแห้งมาคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นและนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับรูปแบบสมการของแบบจำลองของ Newton, Page, Henderson and Pabis, Two term, Modified Page, Logarithmic, Verma et al. และ Modified Henderson and Pabis โดยรูปแบบสมการที่อธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุดจะมีค่า R^2 สูงสุด แสดงถึงคุณภาพของสมการที่มีความเหมาะสมในการทำนาย แต่ในขณะที่ค่า RMSE และค่า χ^2 เป็นค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าแบบจำลองการอบแห้งซึ่งจะมีค่าต่ำสุด ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของใบหม่อนด้วยลมร้อน ดังตารางที่ 5 แสดงค่าคงพารามิเตอร์ต่างๆและการวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง การศึกษาพบว่าแบบจำลองของ Logarithmic สามารถทำนายพฤติกรรมของการอบใบหม่อนด้วยลมร้อนได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 สูง ซึ่งมีค่าอยู่ช่วง 0.993-0.960 นอกจากนี้มีค่า RMSE และค่า χ^2 ต่ำ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.0041-0.0093 และ 0.80×10^{-6} - 4.28×10^{-6} ตามลำดับ เมื่อนำมาพล็อตกราฟแสดงผลการทำนายด้วยสมการ Logarithmic และผลการทดลองการอบใบหม่อนด้วยลมร้อน ดังภาพที่ 19 จะเห็นได้ว่าเส้นโค้งจากการทำนายด้วยแบบจำลองสมการอบแห้งของ Logarithmic สามารถทำนายผลการทดลองได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อนุสร และคณะ (2555); Rayaguru & Routray (2012); Miraei Ashtiani et al. (2017) ที่พบว่าแบบจำลองของ Logarithmic มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบเตย แอปเปิ้ล สาระแทน ตามลำดับ นอกจากนี้ได้คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของการอบใบหม่อนด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C ที่ร้อยละ 0.13%, 1.35% และ 0.54% ตามลำดับ

ตารางที่ 5 ค่าคงที่ของไบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน

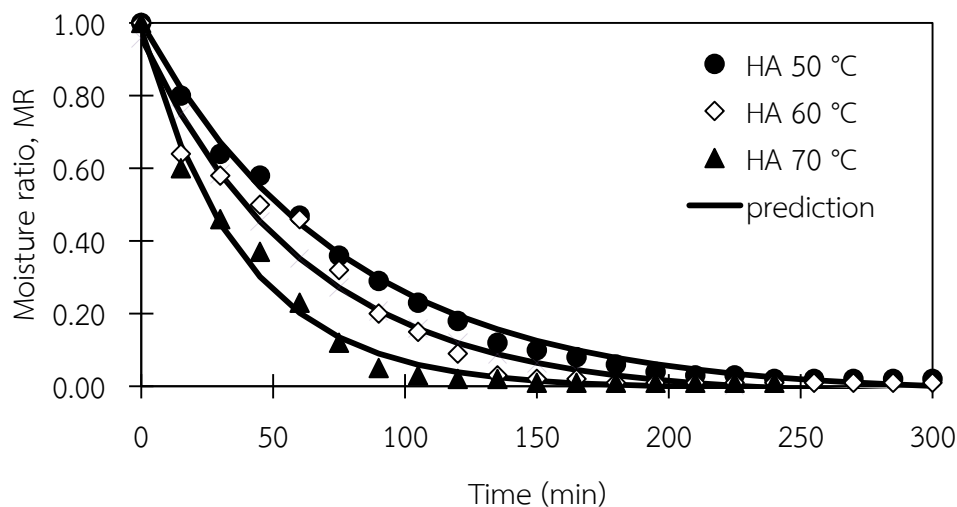
Model	Temperature °C	Empirical drying model constants	Analytical parameters		
			R ²	RMSE	$\chi^2 \times 10^{-6}$
Newton	50	k=0.014	0.992	0.0043	0.89
	60	k=0.018	0.950	0.0101	4.87
	70	k=0.027	0.976	0.0070	2.88
Page	50	k=0.01, n=1.078	0.995	0.0036	0.63
	60	k=0.016, n=1.016	0.952	0.0102	4.90
	70	k=0.03, n=975	0.975	0.0069	2.87
Henderson and Pabis	50	k=0.014, a=1.01	0.992	0.0043	0.89
	60	k=0.017, a=0.97	0.952	0.0098	4.68
	70	k=0.026, a=0.983	0.977	0.0069	2.82
Two term	50	k ₁ =0.014, k ₂ =0.014, a=0.519 b=0.491	0.992	0.0043	0.89
	60	k ₁ =0.017, k ₂ =0.017, a=0.509 b=0.461	0.951	0.0098	4.68
	70	k ₁ =0.026, k ₂ =0.026, a=0.236 b=0.747	0.978	0.0068	2.82
Modified Page	50	k=0.010, n=1.078	0.867	0.0197	17.70
	60	k=0.016, n=1.116	0.951	0.0109	56.70
	70	k=0.030, n=0.975	0.962	0.0084	4.17
Logarithmic	50	k=0.013, a=1.021, c=-0.02	0.993	0.0041	0.80
	60	k=0.016, a=0.984, c=-0.025	0.960	0.0093	4.28
	70	k=0.026, a=0.986, c=-0.005	0.987	0.0068	2.760

หมายเหตุ : k, k₁, k₂ คือค่าคงที่การอบแห้ง; n คือค่าดัชนีการอบแห้ง; a, b, c, g, h คือค่าคงที่แบบจำลอง

ตารางที่ 5 ค่าคงที่ของไบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน (ต่อ)

Model	Temperature °C	Empirical drying model constants	Analytical parameters		
			R ²	RMSE	$\chi^2 \times 10^{-6}$
Verma et al.	50	k=0.02, a=18.942, g=0.02	0.864	0.0177	14.50
	60	k=0.023, a=38.717, g=0.023	0.870	0.0156	11.41
	70	k=0.031, a=13.499, g=0.031	0.951	0.0096	5.40
Modified Henderson and Pabis	50	k=0.014, a=0.335, b=0.335, c=0.341, g=0.014, h=0.014	0.992	0.0043	0.90
	60	k=0.013, a=0.857, b=0.719, c=-0.623, g=0.013, h=0.009	0.964	0.0089	4.00
	70	k=0.026, a=0.328, b=0.327, c=0.328, g=0.026, h=0.026	0.977	0.0069	2.82

หมายเหตุ : k, k₁, k₂ คือค่าคงที่การอบแห้ง; n คือค่าดัชนีการอบแห้ง; a, b, c, g, h คือค่าคงที่แบบจำลอง



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งด้วยลมร้อนเทียบกับแบบจำลอง Logarithmic

หมายเหตุ : HA คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน

3. การศึกษาสมบัติทางกายภาพของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน

ผลของสมบัติทางกายภาพซึ่งได้แก่ ค่าวอเตอร์แอกติวิตีและสีของใบหม่อนหลังการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C แสดงในตารางที่ 6 ซึ่งพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ส่งผลให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตีของใบหม่อนมีค่าน้อยที่สุด ในขณะที่อุณหภูมิ 50 และ 60 °C มีค่าวอเตอร์แอกติวิตีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่อุณหภูมิการอบแห้งต่างๆ พบว่ามีค่าวอเตอร์แอกติวิตีอยู่ในช่วง 0.54-0.43 ซึ่งมีค่าตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน เนื่องจากตามมาตรฐานอาหารแห่งนั้น จะต้องมียวอเตอร์แอกติวิตีไม่เกิน 0.6

ค่าสีเป็นตัวบ่งบอกถึงคุณภาพที่สำคัญในการยอมรับของผู้บริโภค โดยสารที่ให้สีในผลิตภัณฑ์อาหารเรียกว่า รงควัตถุ เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสีผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ในรูปแบบปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ (Enzymatic browning reaction) และปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ (Non-enzymatic browning reaction) ดังนั้นในการเปรียบเทียบคุณภาพสีของใบหม่อนอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C ใช้ระบบสี CIE (L^* , a^* และ b^*) โดยจะเน้นการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง (L^*) / ความมืด ($-L^*$) ซึ่งเป็นผลกระทบจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล และการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นสีแดง (a^*) / สีเขียว ($-a^*$) ซึ่งเป็นผลกระทบของการสูญเสียรงควัตถุสีเขียวในระหว่างการอบแห้ง นอกจากนี้ยังศึกษาการเปลี่ยนแปลง

คุณภาพสีในระหว่างการอบแห้งอยู่ในรูปของค่าความแตกต่างสีโดยรวม (ΔE) โดยเป็นค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของใบหม่อนอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบกับค่าสีใบหม่อนสด จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงสีใบหม่อนแห้ง พบว่า ที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C ไม่ส่งผลต่อค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) แต่ส่งผลต่อค่าความเป็นสีเขียว ($-a^*$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นส่งผลทำให้ใบหม่อนอบแห้งมีค่าความเป็นสีเขียว ($-a^*$) ลดลง โดยที่อุณหภูมิ 70 °C มีค่าความเป็นสีเขียว ($-a^*$) ต่ำที่สุด ซึ่งอาจเกิดจากการใช้อุณหภูมิในการอบแห้งใบหม่อนสูงทำให้ใบหม่อนมีสีเหลืองน้ำตาลมากขึ้นโดยเกิดจากปฏิกิริยาสีน้ำตาล (browning reaction) ชนิดที่เกี่ยวข้องและไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ หรือปฏิกิริยามเมลลาร์ด (Maillard reaction) สอดคล้องกับงานวิจัย (ฤทธิชัย อัศวราชันย์ และคณะ, 2559) พบว่า การอบแห้งมีผลต่อค่า L^* a^* และ b^* เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นจะทำให้ค่า L^* a^* และ b^* ลดลง โดยการใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงจะทำให้เนื้อลำไยมีสีเข้มขึ้นอาจเป็นผลมาจากปฏิกิริยามเมลลาร์ด นอกจากนี้ยังพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C มีค่าความเป็นสีเขียว ($-a^*$) สูงที่สุด ซึ่งบ่งบอกถึงอัตราการสูญเสียรงควัตถุหรือคลอโรฟิลล์ในปริมาณต่ำ เมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างสีโดยรวม (ΔE) ของการอบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C เมื่อเทียบกับใบหม่อนสด พบว่า อุณหภูมิการอบแห้งใบหม่อนมีผลต่อค่าความแตกต่างสีโดยรวม (ΔE) อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยที่อุณหภูมิสูงส่งผลทำให้ใบหม่อนแห้งมีค่าความแตกต่างสีโดยรวม (ΔE) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งที่อุณหภูมิ 50 °C มีค่าความแตกต่างสีโดยรวม (ΔE) น้อยที่สุด อาจเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งไม่สูงจนเกินไปจึงไม่ไปทำลายรงควัตถุหรือสารให้สีของใบหม่อน

ตารางที่ 6 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของ ใบหม่อนสด และใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

Sample	a_w	Color			ΔE
		L^*	a^*	b^*	
Fresh	0.92±0.01 ^a	42.95±2.56 ^a	-8.46±0.49 ^a	24.70±0.83 ^a	-
HA 50 °C	0.54±0.04 ^b	39.73±0.44 ^b	-7.56±0.40 ^a	21.90±1.09 ^b	5.98±1.11 ^a
HA 60 °C	0.50±0.03 ^b	35.51±0.51 ^c	-6.41±0.16 ^b	21.79±1.24 ^b	8.21±1.15 ^b
HA 70 °C	0.43±0.02 ^c	33.70±1.27 ^d	-5.89±0.40 ^b	20.98±1.52 ^b	10.45±0.77 ^c

หมายเหตุ : - ตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

- HA คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน

4. การศึกษาสมบัติทางเคมีของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน

การวิเคราะห์สารประกอบกลุ่มฟีนอลิกเป็นสารกลุ่มสำคัญซึ่งมีสมบัติในการต้านออกซิเดชัน โดยทำหน้าที่เป็นสารให้อิเล็กตรอนหรือเป็นตัวไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระ จึงทำให้อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาจะถูกทำให้เป็นสารที่มีความเสถียรหรือมีความคงตัวมากขึ้น ซึ่งการหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสามารถคำนวณเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายกรดแกลลิก (gallic acid) จากตารางที่ 7 พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C มีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด สารฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระของใบหม่อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยที่อุณหภูมิ 50 °C มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมากกว่า 60 และ 70 °C

การวิเคราะห์ฟลาโวนอยด์เป็นสารประกอบในกลุ่มฟีนอลิก ซึ่งมีสมบัติในการต้านออกซิเดชันได้ดี เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของฟลาโวนอยด์สามารถให้อิเล็กตรอน หรือไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระ ทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระที่มีความคงตัวมากขึ้น จึงช่วยยับยั้งหรือการชะลอปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ (Calabrone et al., 2015) ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมดของใบหม่อนที่อุณหภูมิ การอบแห้งต่าง ๆ พบว่าการอบใบหม่อนที่อุณหภูมิ 50 °C มีปริมาณสารฟลาโวนอยด์สูงสุด

การวิเคราะห์ฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระด้วย 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) เป็นประสิทธิภาพการสกัดในการรวมตัวกับ DPPH ที่อยู่ในรูปอนุมูลอิสระที่เสถียรอยู่ในสารละลาย โดย DPPH คือ อนุมูลอิสระที่เสถียรและสามารถรับอิเล็กตรอนได้ เมื่อได้รับอะตอมไฮโดรเจนจากโมเลกุลอื่นจะทำให้เปลี่ยนเป็นโมเลกุลที่ไม่เป็นอนุมูลอิสระ ผลการวิเคราะห์ฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระของใบหม่อนที่อุณหภูมิการอบแห้งต่าง ๆ พบว่าการอบใบหม่อนที่อุณหภูมิ 50 °C มีฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระสูงสุด

Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) Assay เป็นการวัดความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระทั้งหมดซึ่งเกิดจากการรีดิวซ์ โดยใช้สารประกอบเชิงซ้อนของเหล็ก เฟอร์ริก Fe^{3+} กับ TPTZ (ferric tripyridyltriazine) ได้สารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กเฟอร์รัส Fe^{2+} กับ TPTZ ซึ่งมีสีน้ำเงิน และดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร ผลการวิเคราะห์ฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระของใบหม่อนที่อุณหภูมิการอบแห้งต่าง ๆ พบว่าการอบใบหม่อนที่อุณหภูมิ 50 °C มีฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระสูงสุด

จากการศึกษาสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระของการอบใบหม่อนด้วยลมร้อน พบว่า การอบแห้งใบหม่อนด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระลดลงเมื่อเทียบกับใบหม่อนสด โดยมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน เนื่องการเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งที่มากเกินไป

จะไปทำลายการยับยั้งอนุมูลอิสระลดลง อาจทำให้เกิดจากการสลายตัวของสารที่มีสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระเมื่อได้รับความร้อนสูงเกินไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย มะลิ และคณะ (2559); นรินทร์ และคณะ (2560); ปิยพร และศิริธร (2562) และวัฒนา (2561) ได้ทำการศึกษาผลของการอบแห้งที่ผลต่อสารต้านอนุมูลอิสระชาโมโรเฮยะ ชาแก่นฝาง หน่อไม้ตงลิ้มแล้ง และสารประกอบฟีนอลิกกระเจียบเขียว ตามลำดับ พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงส่งผลทำให้สารต้านอนุมูลอิสระมีค่าลดลง นอกจากนี้การอบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C มีสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระมากกว่าการอบแห้งทุกอุณหภูมิอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 7 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีของใบหม่อนสด ใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ

Sample	Phenolic (g Gallic acid equivalent/g dry weight)	Flavonoid (g Quercetin equivalent/g dry weight)	DPPH (%inhibition)	FRAP (M Fe ²⁺ /g dry weight)
Fresh	0.89±0.10 ^a	0.51±0.06 ^a	96.09±0.56 ^a	17.84±0.71 ^a
HA 50 °C	0.62±0.01 ^b	0.35±0.01 ^b	81.08±4.35 ^b	7.40±0.11 ^b
HA 60 °C	0.45±0.02 ^c	0.27±0.03 ^c	70.77±3.65 ^c	6.52±0.48 ^c
HA 70 °C	0.36±0.02 ^d	0.20±0.01 ^d	64.37±2.37 ^d	5.23±0.12 ^d

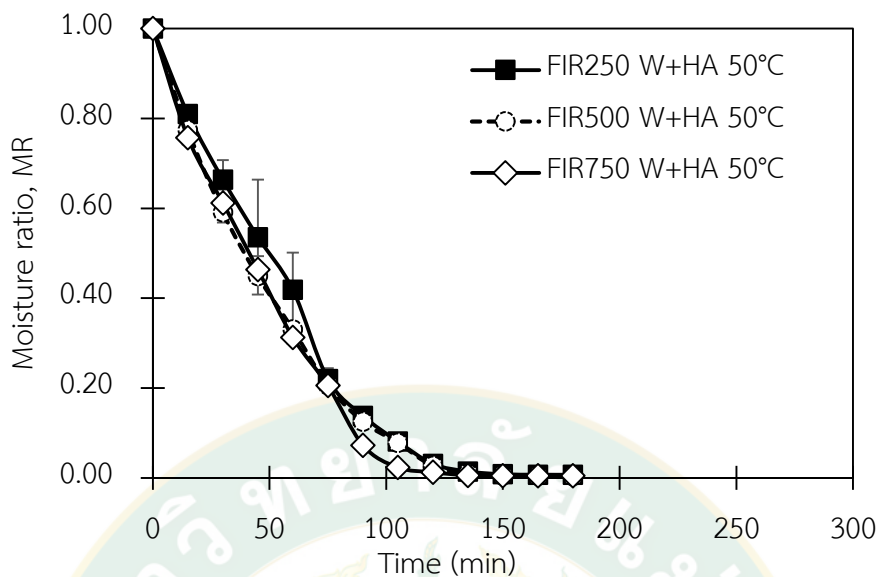
หมายเหตุ : - ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)
- HA คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน

เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ทั้งสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของใบหม่อนที่อบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C พบว่า ใบหม่อนที่อบแห้งอุณหภูมิ 50 °C มีค่าสีใกล้เคียงกับใบหม่อนสด และมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C นั้น ใช้เวลานานถึง 210 นาที หรือ 3.5 ชั่วโมง ซึ่งการใช้ระยะเวลาการอบแห้งที่ยาวนานสามารถส่งผลให้ต้นทุนการใช้พลังงานและแรงงานที่สูงขึ้น ดังนั้นเพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต จึงได้นำอินฟราเรดที่ กำลังต่าง ๆ มาร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นแหล่งความร้อนในการอบแห้งใบหม่อน

การศึกษาการอบแห้งใบหม่อนด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

1. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

ผลการศึกษาปัจจัยของกำลังอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C ต่ออัตราความชื้นในใบหม่อนแสดงดังภาพที่ 20 โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอัตราความชื้นในใบหม่อนมีลักษณะคล้ายกับการอบแห้งด้วยลมร้อนคือ เมื่อระยะเวลาการอบแห้งนานขึ้นอัตราส่วนความชื้นจะลดลง นอกจากนี้ผลการศึกษาในตารางที่ 8 พบว่าการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 250 500 และ 750 W ไม่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง แต่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยที่กำลังอินฟราเรด 750 W มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงกว่ากำลังอินฟราเรด 500 และ 250 W เนื่องจากการเพิ่มกำลังอินฟราเรดส่งผลทำให้ความดันไอภายในและภายนอกของใบหม่อนแตกต่างกันมากขึ้น ทำให้น้ำเคลื่อนที่จากภายในมาสู่ภายนอกได้เร็วขึ้น ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนนั้นจะพิจารณาจากเวลาที่ความชื้นของใบหม่อนมีค่าน้อยกว่า 10% ฐานเปียก มผช. (2557) ซึ่งพบว่าการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรดสูงสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้มากกว่าการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรดต่ำ โดยที่กำลังอินฟราเรด 750 จะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าที่กำลังอินฟราเรด 500 และ 250 W ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มกำลังอินฟราเรดจะช่วยในการเพิ่มพลังงานของหน่วยพื้นที่มากขึ้น ส่งผลต่ออัตราการถ่ายโอนพลังงานความร้อนและถ่ายโอนมวลของความชื้นได้มากขึ้น นอกจากนี้ผลการทดลองยังพบว่า อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของใบหม่อนแห้งที่มีแหล่งความร้อนเป็นอินฟราเรดร่วมลมร้อนมีค่าสูงกว่าการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนน้อยกว่าการใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 50 °C ถึง 1.73 เท่า เนื่องจากการอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนจะเกิดการถ่ายเทความร้อนทั้งการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนไปยังวัสดุพร้อมๆกัน ส่งผลให้น้ำภายในวัสดุได้รับพลังงานจากลมร้อนที่ผิวสัมผัสและการแผ่รังสีความร้อนไปยังภายในวัสดุได้โดยตรง ทำให้น้ำที่อยู่ภายในเนื้อวัสดุถูกถ่ายเทไปยังอากาศแวดล้อมเร็วกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวการถ่ายน้ำจะเริ่มจากการกระตุ้นที่ผิววัสดุไปยังอากาศแวดล้อมก่อน



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของไบโหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนโดยใช้ลมร้อนที่ 50 °C

หมายเหตุ : FIR คือ การอบแห้งด้วยอินฟราเรดคลื่นไกล; HA คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน

ตารางที่ 8 อัตราการอบแห้งเฉลี่ย ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล เวลาการอบแห้งและความชื้นสุดท้ายของไบโหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

Sample	Drying rate ($\frac{g_{water}}{g_{dry} \cdot min}$)	$D_{eff} \times 10^{-7}$ (m^2/min)	Drying time (min)	Final moisture (%w.b.)
HA50 °C	1.84±0.32 ^a	6.25±0.09 ^d	213±3 ^a	8.81±1.02 ^a
FIR250 W+HA 50 °C	3.36±0.31 ^b	13.06±0.23 ^c	128±6 ^b	7.59±0.35 ^b
FIR500 W+HA 50 °C	3.44±0.11 ^b	13.94±0.08 ^b	123±3 ^b	7.29±0.38 ^b
FIR750 W+HA 50 °C	3.53±0.13 ^b	14.58±0.19 ^a	106±3 ^c	7.09±0.40 ^b

หมายเหตุ : - ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

- FIR คือ การอบแห้งด้วยอินฟราเรดคลื่นไกล, HA คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน

2. การศึกษาแบบจำลองการอบแห้งของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งใบหม่อนด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน พบว่า แบบจำลองของ Modified Page สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบหม่อนที่การอบแห้งด้วยอินฟราเรดได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 ในช่วง 0.993-0.986 ซึ่งมีค่าสูง และมีค่า RMSE และค่า χ^2 ต่ำ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.0057-0.0085 และ 2.45×10^{-6} – 5.52×10^{-6} ตามลำดับ (ตารางที่ 9) เมื่อนำมาพล็อตกราฟแสดงผลการทำนายด้วยสมการ Modified Page และผลการทดลองการอบแห้งใบหม่อนด้วยลมร้อน ดังภาพที่ 21 จะเห็นได้ว่าเส้นโค้งจากการทำนายด้วยแบบจำลองสมการอบแห้งของ Modified Page สามารถทำนายผลการทดลองได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุภวรรณ และคณะ (2555ข) ซึ่งพบว่าแบบจำลองของ Modified Page มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของขนุน นอกจากนี้ได้คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของการอบใบหม่อนด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 250 500 และ 750 W ที่ร้อยละ 0.14% 0.32% และ 0.69% ตามลำดับ

ตารางที่ 9 ค่าคงที่ของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

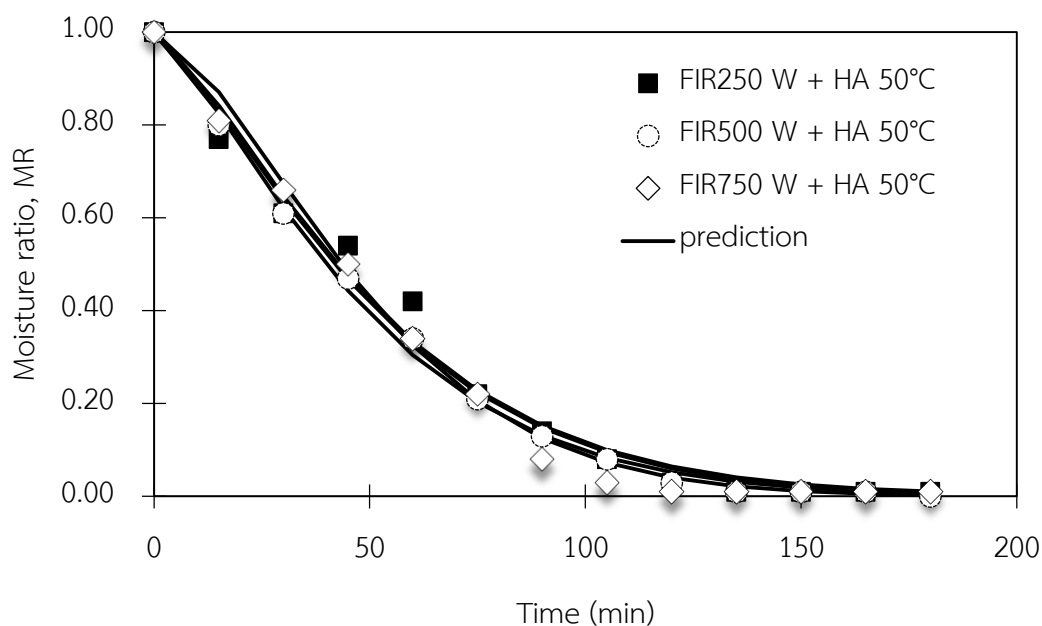
Model	Power W	Empirical drying model constants	Analytical parameters		
			R^2	RMSE	$\chi^2 \times 10^{-6}$
Newton	250	k=0.018	0.914	0.0177	23.79
	500	k=0.020	0.968	0.0107	8.68
	750	k=0.021	0.937	0.0148	16.70
Page	250	k=0.003, n=1.454	0.980	0.0108	8.87
	500	k=0.007, n=1.245	0.991	0.0066	3.20
	750	k=0.005, n=1.356	0.985	0.0085	5.53
Henderson and Pabis	250	k=0.019, a=1.067	0.939	0.0157	20.81
	500	k=0.020, a=1.039	0.971	0.0104	8.68
	750	k=0.020, a=1.356	0.986	0.0085	5.48

หมายเหตุ : k, k_1 , k_2 คือค่าคงที่การอบแห้ง; n คือค่าดัชนีการอบแห้ง; a, b, c, g, h คือค่าคงที่แบบจำลอง

ตารางที่ 9 ค่าคงที่ของไบโหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน (ต่อ)

Model	Power W	Empirical drying model constants	Analytical parameters		
			R ²	RMSE	$\chi^2 \times 10^{-6}$
Two term	250	k ₁ =0.019, k ₂ =0.019, a=0.503 b=0.564	0.939	0.0157	20.81
	500	k ₁ =0.021, k ₂ =0.021, a=0.520 b=0.520	0.956	0.0095	7.53
	750	k ₁ =0.022, k ₂ =0.022, a=0.524 b=0.525	0.978	0.0068	2.82
Modified Page	250	k=0.017, n=1.454	0.987	0.0085	5.52
	500	k=0.019, n=1.245	0.993	0.0057	2.45
	750	k=0.020, n=1.356	0.986	0.0085	5.48
Logarithmic	250	k=0.014, a=1.169, c=-0.133	0.974	0.0115	10.79
	500	k=0.017, a=1.097, c=-0.082	0.994	0.0053	2.27
	750	k=0.018, a=1.111, c=-0.085	0.977	0.0103	8.50
Verma et al.	250	k=0.035, a=89.562, g=0.035	0.497	0.0481	171.05
	500	k=0.035, a=62.457, g=0.035	0.657	0.0368	100.22
	750	k=0.038, a=96.864, g=0.039	0.565	0.0890	582.41
Modified Henderson and Pabis	250	k=0.019, a=0.772, b=0.147, c=0.147, g=0.019, h=0.019	0.939	0.0157	20.80
	500	k=0.021, a=0.775 b=0.142, c=0.142, g=0.021, h=0.021	0.978	0.0092	7.96
	750	k=0.022, a=0.799, b=0.125, c=0.125, g=0.022, h=0.022	0.951	0.0156	1.51

หมายเหตุ : k, k₁, k₂ คือค่าคงที่การอบแห้ง; n คือค่าดัชนีการอบแห้ง; a, b, c, g, h คือค่าคงที่แบบจำลอง



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนโดยใช้ลมร้อนที่ 50 °C เทียบกับแบบจำลอง Modified Page
หมายเหตุ : FIR คือ การอบแห้งด้วยอินฟราเรดคลื่นไกล, HA คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน

3. การศึกษาสมบัติทางกายภาพของไบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

จากผลการทดลองในตารางที่ 10 ที่แสดงค่าวอเตอร์แอกติวิตีและค่าสีของไบหม่อนที่อบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน พบว่าค่าวอเตอร์แอกติวิตีในไบหม่อนหลังการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนมีค่าลดลงจาก 0.92 ± 0.01 ในไบหม่อนสดมาอยู่ในช่วง 0.40-0.36 ซึ่งเป็นช่วงตามมาตรฐานชุมชน โดยผลจากการศึกษาพบว่ากำลังอินฟราเรดไม่ส่งผลต่อค่าวอเตอร์แอกติวิตีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าวอเตอร์แอกติวิตีไบหม่อนหลังการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนทุกตัวอย่างนั้น พบว่ามีค่าวอเตอร์แอกติวิตีน้อยกว่าไบหม่อนที่อุณหภูมิลมร้อน 50 °C อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

นอกจากนี้ค่าสีของไบหม่อนที่อบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่กำลังต่างๆ มีค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) และค่าความเป็นสีเขียว ($-a^*$) ลดลงเมื่อเทียบกับไบหม่อนสด โดยการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรดต่างๆ ไม่ส่งผลต่อค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) แต่ส่งผลต่อค่าความเป็นสีเขียว ($-a^*$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยการเพิ่มกำลังอินฟราเรดส่งผลทำให้ค่าความเป็นสีเขียว ($-a^*$) ลดลง เนื่องจากการเพิ่มกำลังอินฟราเรดจะเป็นการเพิ่มพลังงาน

ความร้อนมากขึ้น จึงส่งผลทำให้ได้รับความร้อนมากขึ้นและเข้าไปทำลายรงควัตถุหรือสารให้สีของใบหม่อน โดยที่กำลังอินฟราเรด 250 W มีค่าความเป็นสีเขียว ($-a^*$) มากที่สุด และมีค่าใกล้เคียงกับใบหม่อนสด ในขณะที่กำลังอินฟราเรด 500 และ 750 W และการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ 50 °C มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาค่าความแตกต่างของสี (ΔE) ของใบหม่อนอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่กำลังต่าง ๆ รวมทั้งที่การอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 50 °C เทียบกับใบหม่อนสด พบว่า ค่าความแตกต่างของสีทุกตัวอย่างไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 10 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

Sample	a_w	Color			ΔE
		L^*	a^*	b^*	
Fresh	0.92±0.01 ^a	42.95±2.56 ^a	-8.46±0.49 ^a	24.70±0.83 ^a	-
HA 50°C	0.54±0.04 ^b	39.73±0.44 ^b	-7.56±0.40 ^b	21.90±1.09 ^c	5.98±1.11 ^a
FIR250W+ HA 50°C	0.40±0.08 ^c	37.79±0.73 ^b	-8.36±0.15 ^a	23.20±0.47 ^b	5.53±2.03 ^a
FIR500W+ HA 50°C	0.37±0.03 ^c	37.76±0.10 ^b	-7.43±0.04 ^b	23.05±0.10 ^{bc}	5.77±1.85 ^a
FIR750W+ HA 50°C	0.36±0.04 ^c	37.58±0.07 ^b	-7.52±0.26 ^b	23.06±0.26 ^{bc}	5.87±2.03 ^a

หมายเหตุ : - ตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

- FIR คือ การอบแห้งด้วยอินฟราเรดคลื่นไกล, HA คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน

4. การศึกษาสมบัติทางเคมีของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

เมื่อพิจารณาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระของใบหม่อนที่การอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนซึ่งแสดงในตารางที่ 11 พบว่ากำลังอินฟราเรดส่งผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการอบแห้งด้วยอินฟราเรดที่กำลัง 750 W ร่วมกับลมร้อน 50 °C สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และ FRAP มีค่าสูงสุด นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบกับการอบแห้งลมร้อนอุณหภูมิ 50 °C พบว่า

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระ มีค่าน้อยกว่า การอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน เนื่องการอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนใช้เวลาน้อยกว่าการอบแห้งลมร้อนจึงทำให้เกิดปริมาณออกซิเจนต่ำ และการอบแห้งอินฟราเรดยังสามารถทำลายพันธะของโควาเลนต์ของสายโพลีเมอร์ที่มีหน่วยซ้ำๆ กัน (repeating polymer) แล้วปลดปล่อยสารกลุ่มไฮเปอร์ออกไซด์หลุดออกมาจนได้เป็นสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ เช่น ฟลาโวนอยด์ แคโรทีนอยด์ แทนนินและ โพลีฟีนอล (Lee et al., 2006b) จึงทำให้สารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าการอบแห้งลมร้อน สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Lee et al. (2003a) และ (Wanyo et al., 2011) ทำการศึกษาการอบแห้งเปลือกข้าวและใบหม่อน พบว่า การอบแห้งอินฟราเรดช่วยเพิ่มสารต้านอนุมูลอิสระและสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

ตารางที่ 11 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

Sample	Phenolic (g Gallic acid equivalent /g dry weight)	Flavonoid (g Quercetin equivalent/g dry weight)	DPPH (%inhibition)	FRAP (M Fe ²⁺ /g dry weight)
Fresh	0.89±0.10 ^a	0.51±0.06 ^a	96.09±0.56 ^a	17.84±0.71 ^a
HA50°C	0.62±0.01 ^d	0.33±0.02 ^c	81.08±4.36 ^c	7.40±0.11 ^d
FIR250W+ HA 50°C	0.71±0.02 ^c	0.43±0.01 ^b	86.69±0.62 ^b	8.94±0.67 ^c
FIR500 W+ HA 50°C	0.73±0.01 ^{bc}	0.44±0.03 ^b	88.73±0.94 ^b	9.55±0.66 ^c
FIR750 W+ HA 50°C	0.81±0.02 ^a	0.51±0.04 ^a	93.52±0.69 ^a	11.82±0.93 ^b

หมายเหตุ : - ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

- FIR คือ การอบแห้งด้วยอินฟราเรดคลื่นไกล, HA คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน

การศึกษาความสัมพันธ์เปลืองพลังงานจำเพาะของไบโหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

ค่าความสัมพันธ์เปลืองพลังงานจำเพาะของไบโหม่อนที่อบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 50-70 °C และอบแห้งด้วยอินฟราเรดกำลังต่างๆ ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C แสดงในตารางที่ 12 มีค่าความสัมพันธ์เปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ในช่วง 14.98-17.66 kJ/g of water evaporated ซึ่งผลการทดลองพบว่า ในกรณีของการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C มีค่าความสัมพันธ์เปลืองพลังงานจำเพาะมากที่สุด เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งนานถึง 3.5 ชั่วโมง ซึ่งจะเวลาในการอบแห้งมากกว่าทุกๆ อุณหภูมิในการอบแห้ง ในขณะที่ค่าความสัมพันธ์เปลืองพลังงานจำเพาะที่อุณหภูมิ 60 และ 70 °C มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ในกรณีการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C กำลังอินฟราเรด 250 500 และ 750 W มีค่าความสัมพันธ์เปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ในช่วง 8.63-11.08 kJ/g of water evaporated นอกจากนี้ยังพบว่า ที่กำลังอินฟราเรด 250 W มีค่าความสัมพันธ์เปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด ในขณะที่ค่าความสัมพันธ์เปลืองพลังงานจำเพาะที่กำลัง 500 และ 750 W มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากการเพิ่มอินฟราเรดส่งผลทำให้ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นในการอบแห้ง ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกันจึงทำให้ค่าความสัมพันธ์เปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยการอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรด 500 และ 1000 W อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 44.5-64.6 °C พบว่า เมื่ออุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้น ค่าพลังงานจำเพาะลดลง เนื่องจากอุณหภูมิลมร้อนต่ำกว่าใช้เวลาในการอบแห้ง เมื่อพิจารณา กำลังอินฟราเรดที่เพิ่มขึ้นของแหล่งพลังงานความร้อนร่วม พบว่า กำลังอินฟราเรดที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความสัมพันธ์เปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น (อนุสรานา นาดิ ,2555)

ตารางที่ 12 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของไบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

Sample	SEC (kJ/g of water evaporated)
HA50°C	17.66±0.40 ^d
HA60°C	15.07±0.34 ^c
HA70°C	14.98±0.57 ^c
FIR250 W+HA50°C	8.63±0.58 ^a
FIR500 W+HA50°C	10.32±0.67 ^b
FIR750 W+HA50°C	11.08±0.83 ^b

หมายเหตุ : - ตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มนี้แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

- FIR คือ การอบแห้งด้วยอินฟราเรดคลื่นไกล, HA คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน

จากการศึกษาการอบแห้งไบหม่อนด้วยลมร้อนและอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน พบว่า การอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งอินฟราเรด ส่งผลทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งลมร้อน 39.91-50.95% เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ทั้งสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไบหม่อนที่การอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C พบว่า ไบหม่อนที่อบแห้งกำลังอินฟราเรด 750 W ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด ช่วยรักษาคุณภาพสีใกล้เคียงกับไบหม่อนสด และมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการศึกษา

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการอบใบหม่อนด้วยลมร้อนและการอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ผลการศึกษาวิธีการอบแห้งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบหม่อนในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน พบว่า เวลาที่ใช้ในการอบใบหม่อนจากความชื้นเริ่มต้นจนเหลือความชื้นน้อยกว่า 10 % มาตรฐานเปียก (มผช , 2558) ใช้เวลาเท่ากับ 213 135 และ 105 นาที ของการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C ตามลำดับ ขณะที่การอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่กำลังอินฟราเรด 250 500 และ 750 W ร่วมลมร้อน 50 °C ใช้เวลาในการอบแห้ง 128 123 และ 106 นาที ตามลำดับ และอัตราการอบใบหม่อนด้วยลมร้อน มีค่าเท่ากับ 1.84, 2.24 และ 2.81 $\text{g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry mass}} \cdot \text{min}$ ที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C ตามลำดับ และการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่กำลังอินฟราเรด 250 500 และ 750 W ร่วมลมร้อน 50 °C มีอัตราการอบแห้งเท่ากับ 3.36, 3.34 และ 3.53 $\text{g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry mass}} \cdot \text{min}$

2. ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลการอบใบหม่อนด้วยลมร้อนอยู่ในช่วง $6.25 \times 10^{-7} - 13.92 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{min}$ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลการอบใบหม่อนด้วยการอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนมีค่าอยู่ในช่วง $13.06 \times 10^{-7} - 14.58 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{min}$

3. ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งชั้นบางแบบจำลอง Logarithmic สามารถทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งลมร้อนได้ดีที่สุด และแบบจำลอง Modified Page สามารถทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนได้ดีที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 สูง และมีค่า RMSE และค่า χ^2 ต่ำ

4. ผลการศึกษาวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของใบหม่อน จากผลการทดลองพบว่าค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของใบหม่อนที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.36 ถึง 0.54 เมื่อพิจารณาทั้งการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน พบว่า ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ที่อยู่ในระดับที่ต่ำกว่า 0.6 จากการศึกษาผลของการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงของสีใบหม่อน พบว่า การอบใบหม่อนด้วยลมร้อน

และการอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนมีค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีเขียว ($-a^*$) และความเป็นสีเหลือง (b^*) มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับใบหม่อนสด

5. การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระของใบหม่อนที่การอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนมีค่ามากกว่าการอบแห้งลมร้อน

6. ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน

จากการศึกษาการอบแห้งใบหม่อนด้วยลมร้อนและอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน เมื่อพิจารณาคุณภาพของใบหม่อน พบว่า การอบแห้งด้วยอินฟราเรดที่กำลัง 750 W ร่วมกับลมร้อน $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีค่าสีใกล้เคียงกับใบหม่อนสด รวมถึงมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระสูงสุด ดังนั้นจากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตใบหม่อนแห้งขงต้มเพื่อการจำหน่ายคือ การใช้อินฟราเรดที่กำลัง 750 W ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 106 นาที

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาบรรจุผลิตภัณฑ์ของใบหม่อนแห้งขงต้ม ที่จะไม่ส่งผลต่อปริมาณความชื้นและสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระ

2. ควรศึกษาสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษาของใบหม่อนแห้งขงต้ม

บรรณานุกรม

- จุฑารัตน์ ทะสระระ, สุภวรรณ ภูริระวณิชกุล และยุทธนา ภูริระวณิชกุล. 2557. แนวทางการพัฒนาปลาข้าวสารกรอบด้วยการอบแห้งลมร้อนและรังสีอินฟราเรด. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา**, 19(1), 1-10.
- จุไรรัตน์ เกิดดอนแฝก. 2556. **สมุนไพรลดไขมันในเลือด 140 ชนิด**. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์เซเว่นพรินต์ติ้งกรุ๊ป.
- ชญาณีศ รัตนมงคล. 2561. **จลนพลศาสตร์การอบแห้งมะม่วงด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกล**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยแม่โจ้. เชียงใหม่. 1-95
- ณัฐริกา ศิลาฉาย. 2549. **ปลาโชนอยต์โนโปลา** หน้า ที่ การใช้ประโยชน์ และการวิเคราะห์. **วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม**, 2(1). 1-10
- นรินทร์ ท้าวแก่นจันทร์, ภาวิณี อารีศรีสม, ทิพย์สุดา ตั้งตระกูล, วาที คงบรรทัด และเยาวนิตย์ ธาราฉาย. 2560. ผลของอุณหภูมิการอบแห้งต่อคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระและคุณค่าทางโภชนาการของชาแก่นฝาง. **ทรัพยากรไทย : ศักยภาพมากล้นมีให้เห็น**. 1-8
- เนาวนิตย์ โพธิ์ศรี, สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ, ชนวัฒน์ นิตศน์วิจิตร และจตุรภัทร วาฤทธิ. 2559. **จลนพลศาสตร์การอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด**. **การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 40**. 165-170
- น้ำฝน ไชยลังกา. 2557. **ผลกระทบของสภาวะและวิธีการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของสาหร่ายเตา**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยแม่โจ้. เชียงใหม่. 1-135
- ปองพล สุริยะกันธร. 2557. **ผลกระทบของวิธีการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของดอกคามีมายล์และดอกเบญจมาศ (แก้ฮวย)**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยแม่โจ้. เชียงใหม่. 1-95.
- ปิยพร สีแวง และศิริธร ศิริอมรพรรณ. 2562. ผลของอุณหภูมิการอบแห้งต่อสารพฤกษเคมีและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของหน่อไม้ตังลิ้มแล้ง (*Bambusa beecheyana*). **วารสารแก่นเกษตร**, 47(1), 1385-1392.
- ประภาพรพรณ พรหมทริฎกุล. 2551. การประเมินฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในเครื่องดื่มสมุนไพรและไวน์ไทย. **เวชสาร โรงพยาบาลมหาราชชนนครราชสีมา**, 32(2), 101-108.
- เพชรรุ่ง เทพทอง, จิตพิสุทธิ์ จันทรทองอ่อน, อรมณี ประจวบจินดา, ศรีโสภา เรืองหนู และอรุณพร อัฐรัตน์. 2555. **การเปรียบเทียบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณสารกลุ่มฟีนอล**

- นอลิกในสารสกัดชั้นเอทานอลของ ชิง พริกไทยดำ และตีปลี. การประชุมเครือข่าย
วิชาการบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- พงษ์ชัย ไกลถิ่น, อิศระ ยศเรศ. 2552. **เครื่องอบอินฟราเรด**. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี. มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่. 1-200.
- มะลิ นาชัยสินธุ์, สมภพ พิศดู, ศราวุธ เหลี่ยมสิงขร และกนกอร คำผุย. 2559. ปริมาณสารต้านอนุมูล
อิสระของใบชาโมโรเฮยะที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยอากาศร้อน. **วารสารวิจัยเพื่อพัฒนา
สังคมและชุมชน**, 3(1(5)), 59-66.
- ฤทธิชัย อัศวราชันย์, ปองพล สุริยะกันธร และประพันธ์ จิโน. 2557. ผลกระทบของการเตรียมขั้นต้น
ด้วยการลวกและแบบจำลองการอบแห้งดอกเก๊กฮวย. **วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่ง
ประเทศไทย**, 20(2), 43-51.
- ฤทธิชัย อัศวราชันย์, อุมาพร อุประ, เสมอขวัญ ตันติกุล และพัชรมณี อุณหพิพัฒพงศ. 2559.
จลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อลำไยสีทองด้วยการใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียวและอุณหภูมิแบบ
หลายขั้น. **วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย**, 22(2), 30-40.
- ฤทัยทิพย์ สุระเสี, พัชรภรณ์ ถิ่นจันทร์, พุทธพร วิวาจกร, สิทธิชัย บุญมั่น, ประชาชาติ นพเสนีย์,
ศุภกฤต จันทรวิชญ, ชลธิรา แสงศิริ และธนพร ขจรผล. 2558. การวิเคราะห์ปริมาณ
สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และวิตามินซี ของใบหม่อน
จำนวน 8 สายพันธุ์. **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร**, 46(3), 381-384.
- วรภรณ์ สุทธิสา. 2554. **การถ่ายทอดเทคโนโลยีการแปรรูปใบหม่อนและผลหม่อนเป็นอาหารและ
เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพ**. ศูนย์นวัตกรรมใหม่ กองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ.
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. มหาสารคาม 1-75
- วัฒนา วิริวุฒิก. 2561. ผลของการอบแห้งกระเจี๊ยบเขียวต่อสารประกอบฟีนอลิกษาเขียวผสมกระเจี๊ยบ
เขียวและมะลิ. **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร**, 42(2), 625-628.
- วิจิตรา แสงโคตร, อรัญญา พรหมกุล, วรณทิชา เศวตบวร และเกรียงไกร พัทยากร. 2561. การ
วิเคราะห์ปริมาณสารฟีนอลิกและสารต้านอนุมูลอิสระในใบหม่อน 2 สายพันธุ์. **วารสารแก่น
เกษตร**, 46(1). 359-362.
- วิไล รังสาดทอง. 2547. **เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สถาบันเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าพระนครเหนือ: กรุงเทพมหานคร. 1-500
- ศุภชัย แก้วจ้ง. 2559. **ศึกษาอิทธิพลรังสีอินฟราเรดกับการอบแห้งกะปิ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี.
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา. สงขลา. 1-51
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2558. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน เรื่อง ใบหม่อนแห้งซึ่งมี
มผช. 30/2558.

- สุภวรรณ ฐิระวณิษย์กุล, สติลลา ชาญูเชี้ยว และยุทธนา ฐิระวณิษย์กุล. 2555. การอบแห้งใบบัวบก เพื่อผลิตใบบัวบกแห้งขงดื่มด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด: จลนพลศาสตร์ ความสิ้นเปลืองพลังงาน และคุณภาพ. **วารสารวิจัยมหาลัยขอนแก่น**, 18(2), 311-324.
- สุภวรรณ ฐิระวณิษย์กุล, สากีนา ลาแมปะ และยุทธนา ฐิระวณิษย์กุล. 2555. การอบแห้งขุ่นด้วย พลังงานความร้อนร่วมของรังสีอินฟราเรด/ไมโครเวฟ และลมร้อน : จลนพลศาสตร์คุณภาพและการทดสอบประสาทสัมผัส. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา**, 15(1), 117-129.
- อนุสรนา นาดิ. 2554. **ปัจจัยของวิธีและสภาวะการอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์และคุณภาพของใบเตย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา. 1-171
- อนุสรนา นาดิ, ยุทธนา ฐิระวณิษย์กุล และสุภวรรณ ฐิระวณิษย์กุล. 2555. จลนพลศาสตร์การอบแห้ง ใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและลมร้อน. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา**, 17(2), 86-94.
- อำไพศักดิ์ ทีบุญมา และศกชัย จงจำ. 2553. การอบแห้งขิงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา**, 15(2), 76-86.
- อิลิฮัยะ สนิโซ, ฟามิรา สะอูดี และรัชดาภรณ์ ฮานาฟ. 2555. สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ความสิ้นเปลืองพลังงาน และอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของการอบแห้งผลหมากด้วยพลังงานความร้อนร่วม. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา**, 17(1), 142-149.
- Adak, N., Heybeli N. and Ertekin C. 2017. Infrared drying of strawberry. **Food Chemistry**, 2(19), 109-116.
- AOAC. 1995. **Official method of analysis**. 16th ed. The Association of Official Analytical Chemists. Inc Arlington, Verginia, USA.
- Calabrone, L., Larocca M., Marzocco. S., Martelli, G. and Rossano, R. 2015. Total Phenols and Flavonoids Content, Antioxidant Capacity and Lipase Inhibition of Root and Leaf Horseradish (*Armoracia rusticana*) Extracts. **Food and Nutrition Sciences**, 6(1), 64-74.
- Katsube, T., Tsurunaga, Y., Sugiyama. M., Furuno, T. and Yamasaki Y,. 2009. Effect of air-drying temperature on antioxidant capacity and stability of polyphenolic compounds in mulberry (*Morus alba L.*) leaves. **Food Chemistry**, 113(4), 964-969.
- Shimada, K., Fujikawa, K., Yahara, K. and Nakamura, T. 1992. Antioxidative properties of xanthan on the autoxidation of soybean oil in cyclodextrin emulsion. **Agricultural and food chemistry**, 40, 945-948.

- Onanong, K., Sirithon, S., Natthida, W. and Naret, M. 2011. Phenolic compounds and antioxidant activities of edible flowers from Thailand. **Journal of Functional Foods**, 3(2), 88-99.
- Rayaguru, K. and Routray, W. 2012. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of stone apple slices. **International Food Research Journal**, 19(2), 1503-1510.
- Lee, S.C., Kim, J.H., Jeong, S.M., Kim, D.R., Ha, J.U., Nam, K. C., and Ahn, D. U. 2003a. Effect of Far-Infrared Irradiation on the Antioxidant Activity of Extracts from Rice Hulls. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 40, 4400-4403.
- Lee, S.C., Kim, J.H., Jeong, S.M. and Park, J.H. 2006b. Effect of Far-Infrared Irradiation on Catechins and Nitrite Scavenging Activity of Green Tea. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 54(2), 399-403.
- Miraei Ashtiani, S.H., Salarikia, A. and Golzarian, M.R. 2017. Analyzing drying characteristics and modeling of thin layers of peppermint leaves under hot-air and infrared treatments. **Information Processing in Agriculture**, 4, 128-139.
- Vermerris, W. and Nicholson, R. (2006). **Phenolic compound biochemistry**. Netherlands: Springer. 1-31
- Wanyo, P. Siriamornpun, S. and Meeso, N. 2011. Improvement of quality and antioxidant properties of dried mulberry leaves with combined far-infrared radiation and air convection in Thai tea process. **Food and Bioproducts Processing**, 89(1), 22-30.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ใบหม่อน เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการหาความชื้น และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง



ภาพผนวกที่ 1 ใบหม่อนที่ใช้ในการทดลอง



ภาพผนวกที่ 2 เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการหาความชื้น
ยี่ห้อ Binder รุ่น FD 115 ประเทศเยอรมนี



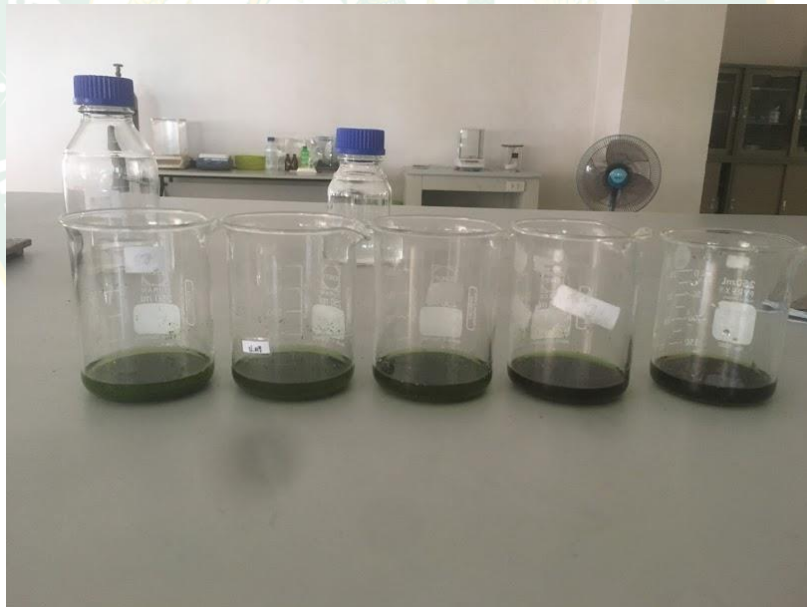
ภาพผนวกที่ 3 เครื่องวัดวอเตอร์แอกติวิตี
ยี่ห้อ AQUA lab รุ่น 3TE ประเทศสวิตเซอร์แลนด์



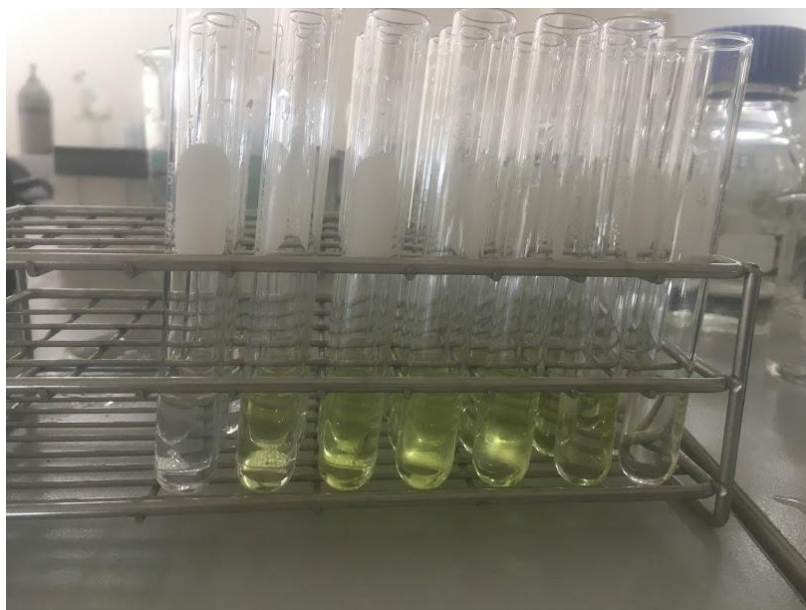
ภาพผนวกที่ 4 เครื่องวัดค่าสี
ยี่ห้อ Hunterlab รุ่น MiniScan XE plus ประเทศสวิตเซอร์แลนด์



ภาพผนวกที่ 5 ใบหม่อนหลังการอบแห้ง



ภาพผนวกที่ 6 สกัดตัวอย่างใบหม่อน



ภาพผนวกที่ 7 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด



ภาพผนวกที่ 8 การวิเคราะห์สารประกอบฟลาโวนอยด์ทั้งหมด



ภาพผนวกที่ 9 การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH



ภาพผนวกที่ 10 การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ FRAP



ภาพผนวกที่ 11 เครื่องวัดค่าพลังงาน
ยี่ห้อ Hidance



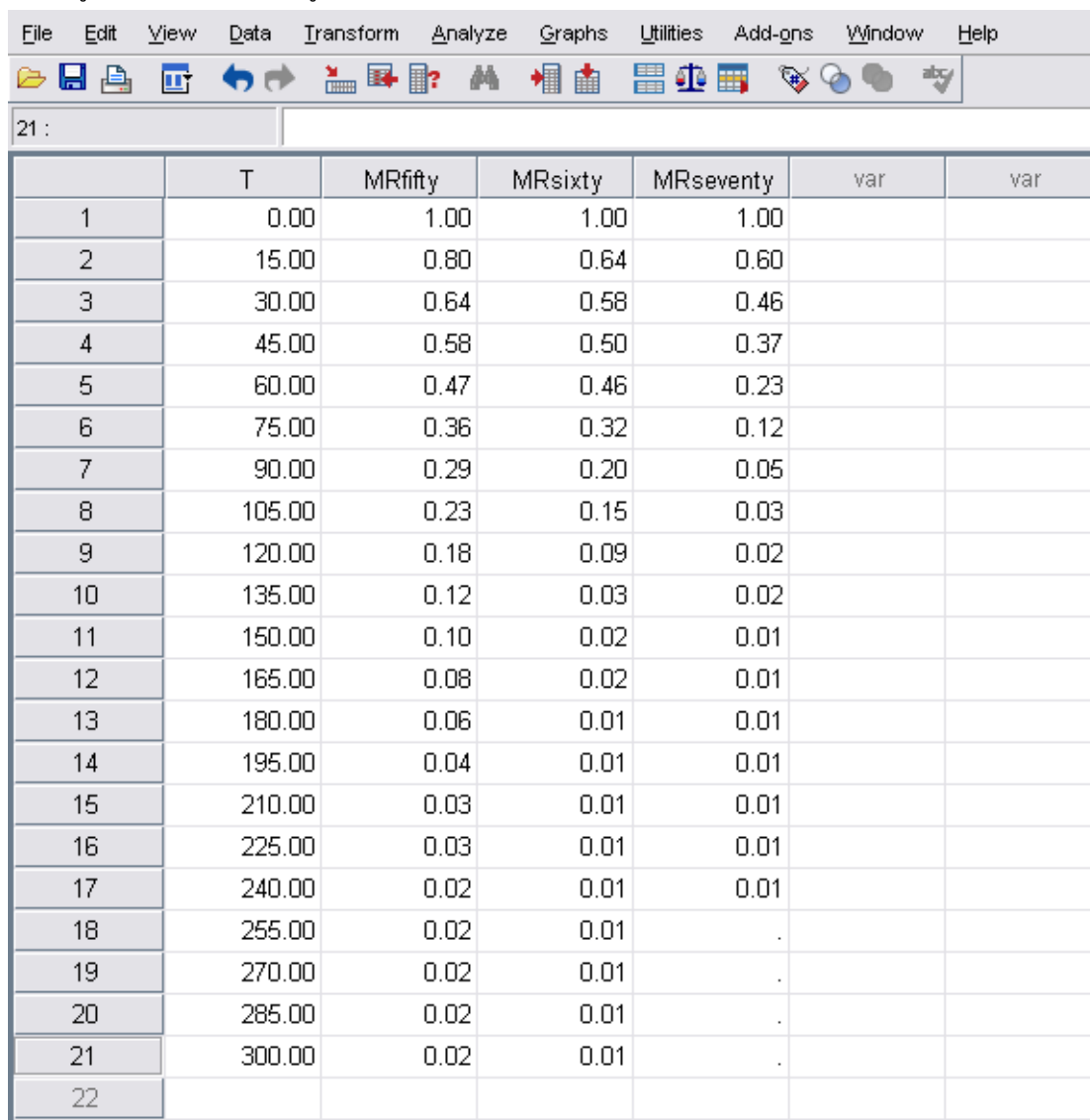


ภาคผนวก ข
การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น

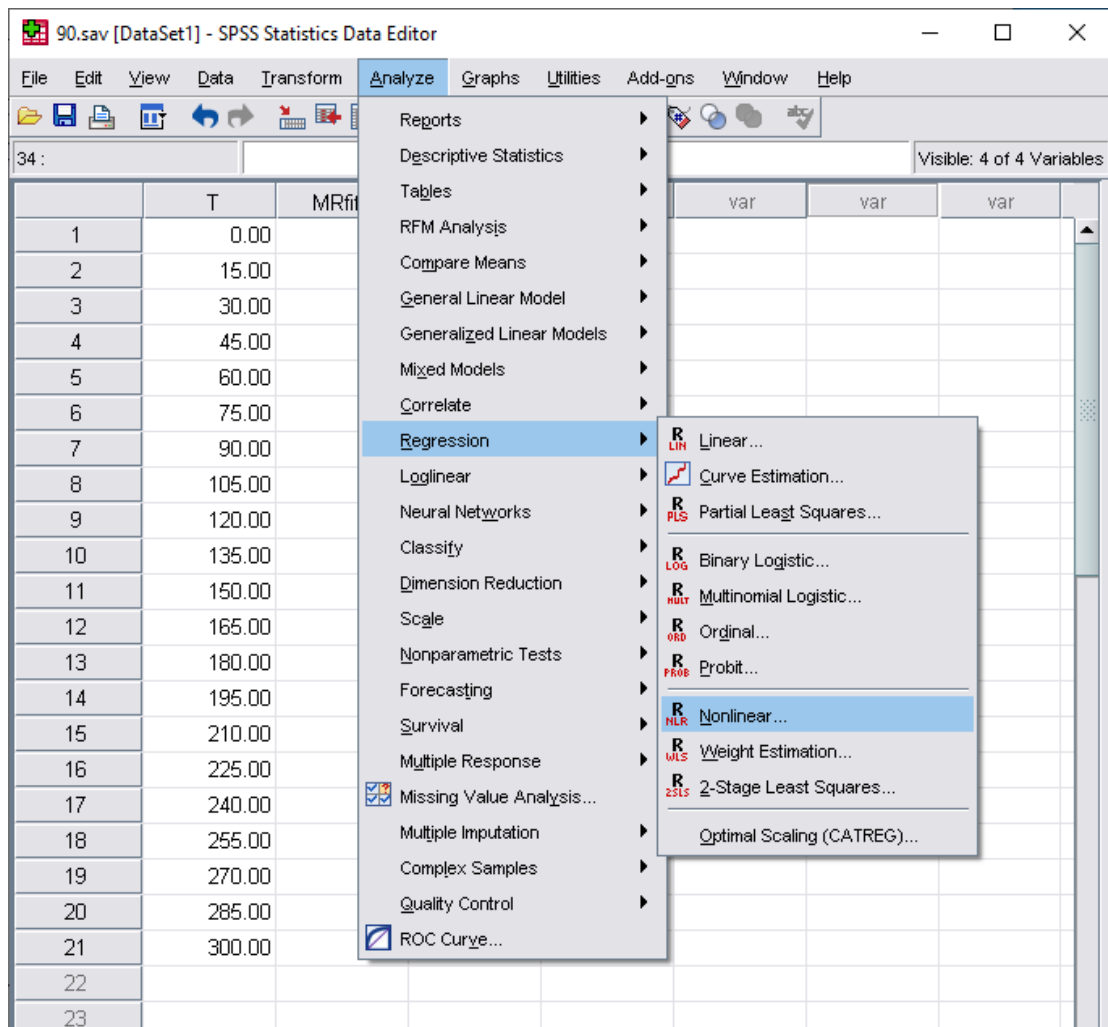
การวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป เริ่มจากการใส่ข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังภาพ



	T	MRfifty	MRsixty	MRseventy	var	var
1	0.00	1.00	1.00	1.00		
2	15.00	0.80	0.64	0.60		
3	30.00	0.64	0.58	0.46		
4	45.00	0.58	0.50	0.37		
5	60.00	0.47	0.46	0.23		
6	75.00	0.36	0.32	0.12		
7	90.00	0.29	0.20	0.05		
8	105.00	0.23	0.15	0.03		
9	120.00	0.18	0.09	0.02		
10	135.00	0.12	0.03	0.02		
11	150.00	0.10	0.02	0.01		
12	165.00	0.08	0.02	0.01		
13	180.00	0.06	0.01	0.01		
14	195.00	0.04	0.01	0.01		
15	210.00	0.03	0.01	0.01		
16	225.00	0.03	0.01	0.01		
17	240.00	0.02	0.01	0.01		
18	255.00	0.02	0.01	.		
19	270.00	0.02	0.01	.		
20	285.00	0.02	0.01	.		
21	300.00	0.02	0.01	.		
22						

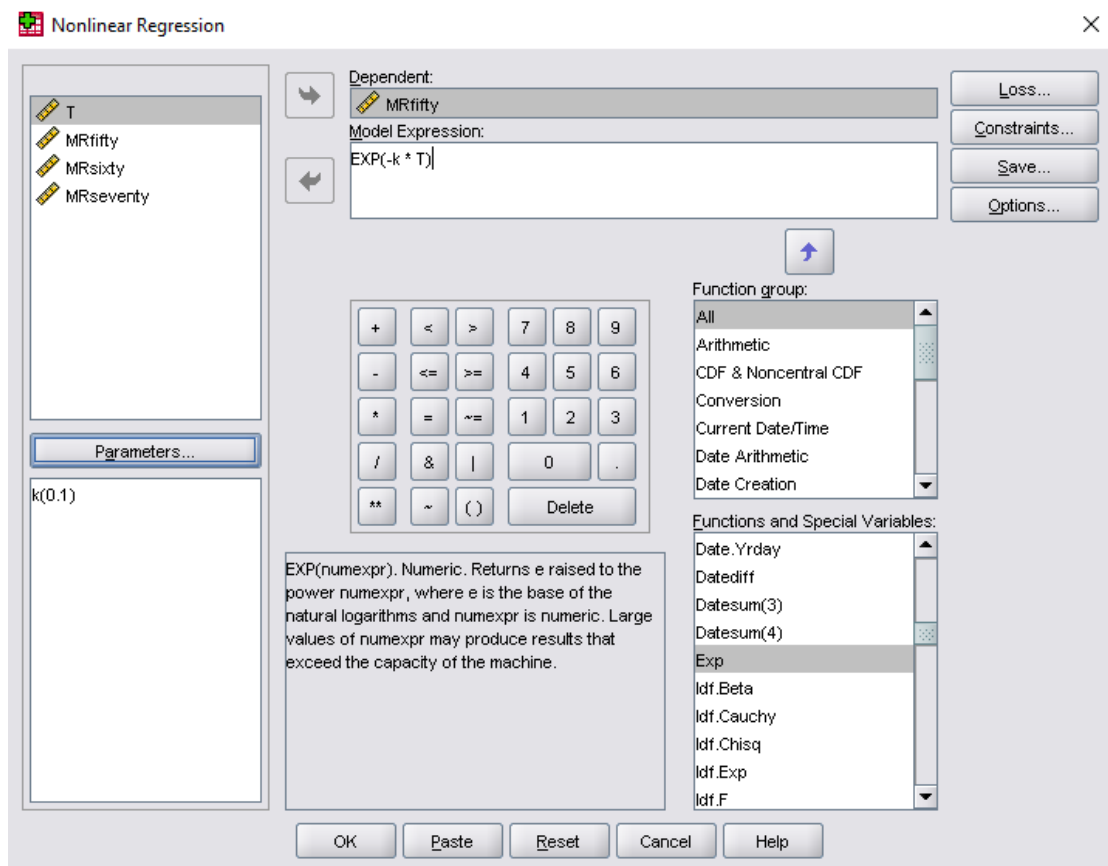
ภาพผนวกที่ 12 การใส่ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

จากนั้นเลือกวิธีในการวิเคราะห์ Analyze , Regression , Nonlinear ดังภาพผนวกที่ 12



ภาพผนวกที่ 13 การเลือกวิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น

วิเคราะห์หาค่าคงที่ k โดยการใส่สมการ และกำหนดค่าเริ่มต้นในการวิเคราะห์ ดังภาพผนวกที่ 13 และแสดงผลการวิเคราะห์ดังภาพผนวกที่ 14



ภาพผนวกที่ 14 การใส่สมการในการวิเคราะห์และหาค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ k

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
k	.014	.000	.014	.015

ANOVA^a

Source	Sum of Squares	df	Mean Squares
Regression	2.938	1	2.938
Residual	.008	20	.000
Uncorrected Total	2.946	21	
Corrected Total	1.702	20	

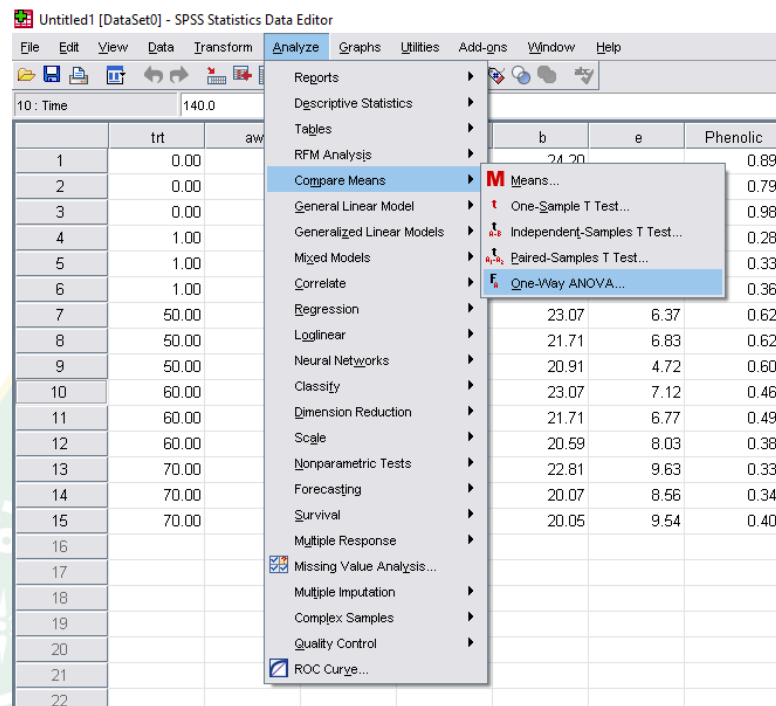
Dependent variable: MRfifty

a. R squared = 1 - (Residual Sum of Squares) / (Corrected Sum of Squares) = .995.

ภาพผนวกที่ 15 ผลการวิเคราะห์ค่า k

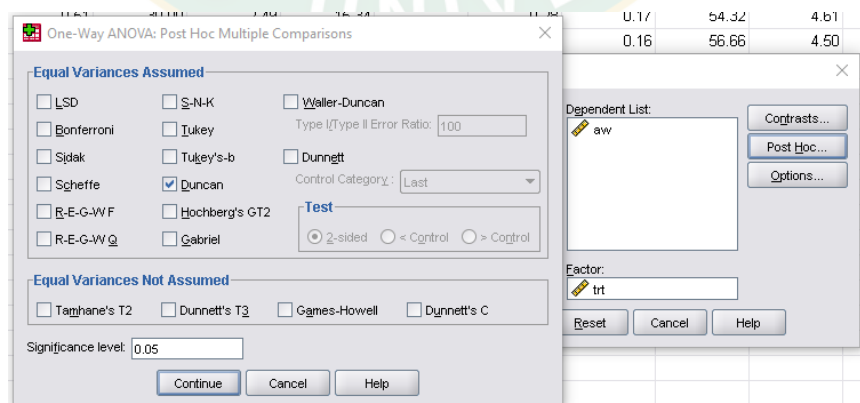
การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) เริ่มจากการใส่ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จากนั้นเลือกวิธีในการวิเคราะห์ Analyze , Compare Means , One-Way ANOVA ดังภาพผนวกที่ 16



ภาพผนวกที่ 16 การเลือกวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน

เลือกตัวแปรที่จะทำการวิเคราะห์ จากนั้นเข้าไปที่ Post Hoc กดเลือกวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ดังภาพผนวกที่ 17



ภาพผนวกที่ 17 วิธีการเลือกเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
DR	Between Groups	1.445	2	.723	8.997	.016
	Within Groups	.482	6	.080		
	Total	1.927	8			
Deff	Between Groups	82.265	2	41.132	28.269	.001
	Within Groups	8.730	6	1.455		
	Total	90.995	8			
Time	Between Groups	17550.000	2	8775.000	1053.000	.000
	Within Groups	50.000	6	8.333		
	Total	17600.000	8			
MC	Between Groups	5.556	3	1.852	2.109	.177
	Within Groups	7.025	8	.878		
	Total	12.581	11			

Deff

Time

Duncan ^a				
trt	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
70.00	3	106.6667		
60.00	3		136.6667	
50.00	3			211.6667
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

Duncan ^a				
trt	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
50.00	3	6.5924		
60.00	3		9.3067	
70.00	3			13.9167
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

DR

Duncan ^a			
trt	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
50.00	3	1.8367	
60.00	3	2.2400	
70.00	3		2.8133
Sig.		.132	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

MC

Duncan ^a			
trt	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	
70.00	3	7.0833	
60.00	3	8.2867	
1.00	3	8.6800	
50.00	3	8.8067	
Sig.		.067	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ภาพผนวกที่ 18 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของอัตราการอบแห้งเฉลี่ย ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพ เวลาอบแห้งและความชื้นสุดท้ายของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
aw	Between Groups	.423	3	.141	194.467	.000
	Within Groups	.006	8	.001		
	Total	.429	11			
L	Between Groups	156.597	3	52.199	92.707	.000
	Within Groups	4.504	8	.563		
	Total	161.101	11			
a	Between Groups	12.006	3	4.002	33.497	.000
	Within Groups	.956	8	.119		
	Total	12.962	11			
b	Between Groups	23.735	3	7.912	5.330	.026
	Within Groups	11.876	8	1.484		
	Total	35.611	11			
e	Between Groups	30.106	2	15.053	14.317	.005
	Within Groups	6.308	6	1.051		
	Total	36.414	8			

aw

Duncan^a

trt	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
70.00	3	.4333		
60.00	3		.5033	
50.00	3		.5400	
.00	3			.9167
Sig.		1.000	.134	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

a

Duncan^a

trt	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
.00	3	-8.4600		
50.00	3		-7.5633	
60.00	3			-6.4167
70.00	3			-5.8867
Sig.		1.000	1.000	.097

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

L

Duncan^a

trt	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
70.00	3	33.7033			
60.00	3		35.5100		
50.00	3			39.7333	
.00	3				42.9533
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

b

Duncan^a

trt	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
70.00	3	20.9767	
60.00	3	21.7900	
50.00	3	21.8967	
.00	3		24.6967
Sig.		.401	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

e

Duncan^a

trt	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
50.00	3	5.9733		
60.00	3		8.2100	
70.00	3			10.4533
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ภาพผนวกที่ 19 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของสมบัติทางกายภาพของไบโหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วย

ลมร้อน

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Phenolic	Between Groups	.483	3	.161	65.513	.000
	Within Groups	.020	8	.002		
	Total	.503	11			
Flavonoid	Between Groups	.159	3	.053	38.920	.000
	Within Groups	.011	8	.001		
	Total	.169	11			
DPPH	Between Groups	1724.555	3	574.852	60.218	.000
	Within Groups	76.369	8	9.546		
	Total	1800.924	11			
FRAP	Between Groups	302.289	3	100.763	523.829	.000
	Within Groups	1.539	8	.192		
	Total	303.828	11			

Phenolic

Duncan ^a		Subset for alpha = 0.05			
trt	N	1	2	3	4
70.00	3	.3567			
60.00	3		.4533		
50.00	3			.6133	
.00	3				.8867
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

DPPH

Duncan ^a		Subset for alpha = 0.05			
trt	N	1	2	3	4
70.00	3	64.3700			
60.00	3		70.7733		
50.00	3			81.0833	
.00	3				96.0933
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

Flavonoid

Duncan ^a		Subset for alpha = 0.05			
trt	N	1	2	3	4
70.00	3	.2000			
60.00	3		.2733		
50.00	3			.3500	
.00	3				.5100
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

FRAP

Duncan ^a		Subset for alpha = 0.05			
trt	N	1	2	3	4
70.00	3	5.2267			
60.00	3		6.5233		
50.00	3			7.4033	
.00	3				17.8367
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ภาพผนวกที่ 20 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของสมบัติทางเคมีของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
DR	Between Groups	5.629	3	1.876	34.211	.000
	Within Groups	.439	8	.055		
	Total	6.068	11			
Deff	Between Groups	122.306	3	40.769	1564.629	.000
	Within Groups	.208	8	.026		
	Total	122.514	11			
Time	Between Groups	19908.333	3	6636.111	455.048	.000
	Within Groups	116.667	8	14.583		
	Total	20025.000	11			
MC	Between Groups	5.424	3	1.808	4.913	.032
	Within Groups	2.944	8	.368		
	Total	8.368	11			

DR

trt	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
50.00	3	1.8367	
250.00	3		3.2367
500.00	3		3.4400
750.00	3		3.5233
Sig.		1.000	.188

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

Deff

trt	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
50.00	3	6.5924			
250.00	3		13.0633		
500.00	3			13.9400	
750.00	3				14.5767
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

Time

trt	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
750.00	3	106.6667		
500.00	3		123.3333	
250.00	3		128.3333	
50.00	3			211.6667
Sig.		1.000	.147	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

MC

trt	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
750.00	3	7.0867	
500.00	3	7.2567	
250.00	3	7.5933	
50.00	3		8.8067
Sig.		.355	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ภาพผนวกที่ 21 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของอัตราการอบแห้งเฉลี่ย ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพ เวลาอบแห้งและความชื้นสุดท้ายของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
aw	Between Groups	.655	4	.164	75.157	.000
	Within Groups	.022	10	.002		
	Total	.677	14			
L	Between Groups	63.178	4	15.794	10.832	.001
	Within Groups	14.582	10	1.458		
	Total	77.760	14			
a	Between Groups	2.969	4	.742	10.968	.001
	Within Groups	.677	10	.068		
	Total	3.646	14			
b	Between Groups	11.941	4	2.985	6.900	.006
	Within Groups	4.326	10	.433		
	Total	16.267	14			
e	Between Groups	2.396	3	.799	.169	.914
	Within Groups	37.743	8	4.718		
	Total	40.139	11			

aw

Duncan ^a		Subset for alpha = 0.05		
trt	N	1	2	3
750.00	3	.3600		
500.00	3	.3733		
250.00	3	.4033		
50.00	3		.5400	
1.00	3			.9167
Sig.		.303	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

a

Duncan ^a		Subset for alpha = 0.05	
trt	N	1	2
1.00	3	-8.4600	
250.00	3	-8.3567	
50.00	3		-7.5633
750.00	3		-7.5233
500.00	3		-7.4333
Sig.		.637	.572

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

L

Duncan ^a		Subset for alpha = 0.05	
trt	N	1	2
750.00	3	37.5833	
500.00	3	37.7567	
250.00	3	37.7867	
50.00	3	39.7333	
1.00	3		42.9533
Sig.		.069	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

b

Duncan ^a		Subset for alpha = 0.05		
trt	N	1	2	3
50.00	3	21.8967		
500.00	3	23.0467	23.0467	
750.00	3	23.0567	23.0567	
250.00	3		23.1933	
1.00	3			24.6967
Sig.		.066	.800	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ภาพผนวกที่ 22 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของสมบัติทางกายภาพของไบโหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Phenolic	Between Groups	.129	4	.032	14.969	.000
	Within Groups	.021	10	.002		
	Total	.150	14			
Flavonoid	Between Groups	.052	4	.013	9.788	.002
	Within Groups	.013	10	.001		
	Total	.066	14			
DPPH	Between Groups	415.778	4	103.944	24.776	.000
	Within Groups	41.954	10	4.195		
	Total	457.732	14			
FRAP	Between Groups	199.904	4	49.976	109.574	.000
	Within Groups	4.561	10	.456		
	Total	204.465	14			

Duncan^a

trt	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
50.00	3	81.0833		
250.00	3		86.6867	
500.00	3		88.7333	
750.00	3			93.5200
1.00	3			96.0933
Sig.		1.000	.249	.155

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

Phenolic

trt	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
50.00	3	.6133			
250.00	3		.7133		
500.00	3		.7267	.7267	
750.00	3			.8100	.8100
1.00	3				.8867
Sig.		1.000	.732	.052	.070

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

FRAP

trt	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
50.00	3	7.4033			
250.00	3		8.9433		
500.00	3		9.5467		
750.00	3			11.8233	
1.00	3				17.8367
Sig.		1.000	.300	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

Flavonoid

trt	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
50.00	3	.3500		
250.00	3		.4267	
500.00	3		.4400	
750.00	3			.5067
1.00	3			.5100
Sig.		1.000	.664	.913

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ภาพผนวกที่ 23 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของสมบัติทางเคมีของใบหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

ANOVA

SEC					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	179.354	5	35.871	104.325	.000
Within Groups	4.126	12	.344		
Total	183.481	17			

SEC

Duncan ^a					
trt	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
250.00	3	8.6333			
500.00	3		10.3200		
750.00	3		11.0833		
70.00	3			14.9833	
60.00	3			15.0700	
50.00	3				17.6533
Sig.		1.000	.137	.859	1.000

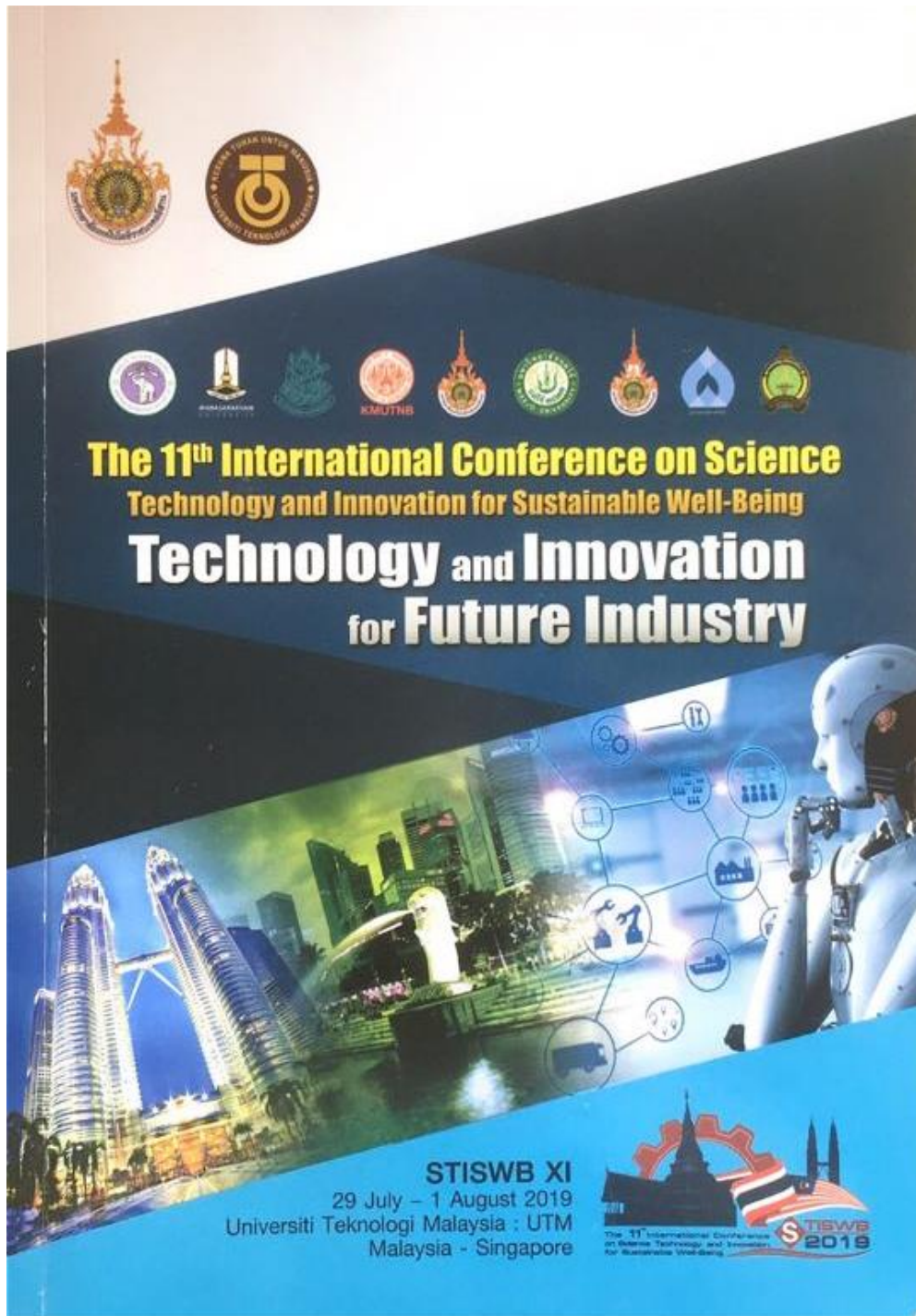
Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ภาพผนวกที่ 24 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าพลังงานจำเพาะของไบโหม่อนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน



ภาคผนวก ค
บทความวิชาการที่ได้นำเสนอและตีพิมพ์เผยแพร่





Drying Characteristics and Color of Dried Mulberry Leaves Using Hot Air and Infrared Drying

**Suttida Kunvana¹, Somkiat Jaturonglumlert¹, Chanawat Nitatwichit¹,
Yardfon Tanongkankit^{1,*}**

¹ Faculty of Engineering and Argo-Industry, Maejo University, Chiangmai, Thailand 50290

*Corresponding Author: yardfon@hotmail.com

Abstract

Mulberry leaves are used as a raw material of mulberry leaf tea and Chinese medicine since they contain high amount of nutrition and antioxidants. The important process for production of these products is drying which is performed to extend their shelf life. During drying change in moisture content of material occurred. Thus, this research was aimed to investigate drying kinetics and empirical drying model for predicting drying behaviors of mulberry leaves. Color of dried mulberry leaves was also measured for determination of the best drying condition. Two drying methods including hot-air and infrared techniques were employed. Five different temperatures at 50, 60, 70, 80 and 90°C were used for hot air drying. Three levels of infrared power at 250, 500 and 750 W were carried out for infrared drying. The results showed that the moisture content of mulberry leaves decreased when increased the drying temperatures and infrared powers. It was also found that drying with infrared radiation had shorter drying time than hot air drying. According to the statistical values of the highest coefficients (R^2) and the least of root mean square error ($RMSE$), Logarithmic model could present better predictions for the moisture transfer during drying mulberry leaves than others for two drying techniques. The effective moisture diffusivity values calculated using the slope method were in the range from 6.48×10^{-7} to 2.25×10^{-6} m²/min. Furthermore, the color values measured in the CIE system (L^* , a^* and b^*) showed that hot air drying at 50°C and infrared drying at 250 W provided the most similar color values to fresh mulberry leaves.

Keywords: Color; Hot air drying; Infrared drying; Kinetics; Empirical models.

1. Introduction

Mulberry (*Morus alba* L.) is a crop widely grown in northern and northeastern region of Thailand. Several studies have shown that mulberry leaves are rich sources of nutrition such as calcium, potassium, protein and carbohydrate and antioxidants including phenolic and flavonoid compounds. Because of its benefits, mulberry leaves are not only a staple food for silkworms, but also consumed as a functional food such as mulberry leaf tea and Chinese medicine for reducing a risk of various cancers, lower

blood pressure, treating fever and protecting liver [1, 2].

Among the steps for production of mulberry leaf tea and Chinese medicine, drying is the most important process since it has a great effect on the quality of the product. This process involves thermal treatment for removal of moisture from fresh products to a level which allows safe storage over an extended shelf life. Hot air drying is one of a simple drying method providing a uniform, hygienic and attractively colored product [3]. However, a disadvantage





associated with hot air drying is the long drying time resulting in loss in nutrient quality and large energy consumption. Infrared drying is gaining popularity because of its high thermal efficiency and rapid heating rate leading to shorter drying time.

To provide a basic theory for manufacture and application of drying, it is necessary to determine the effects of hot air drying temperature, infrared power and drying time on the moisture content of mulberry leaf and develop a mathematical model for better understanding of the controlling parameters of drying process. Many mathematical models have been proposed to describe the drying process, of which thin-layer drying models have been widely in use [4]. Ashtiani et al. [5] investigated the best model for explaining the hot air and infrared drying behaviors of peppermint by fitting experimental drying data into three semi-theoretical thin-layer drying models namely Lewis, Logarithmic and Midilli. Their results showed that the Logarithmic and Midilli models had the excellent results in prediction the hot air and infrared drying behaviors, respectively.

Therefore, the purposes of the present study were to study changes of moisture content of mulberry leaves during hot air and infrared drying and to investigate a suitable thin-layer drying model for describing the drying behavior. The effective moisture diffusivities of hot air and infrared drying were also determined.

2. Materials and methods

2.1 Sample preparation

Fresh mulberry leaves from Queen Sirikit Sericulture Center in Chiang Mai were cleaned with tap water and drained on a screen to get rid of excess water. The leaves were then cut into size of 1.0 cm x 4.0 cm.

2.2. Hot Air Drying

Approximately 200 g of the prepared mulberry leaves were placed on tray with dimension of 29×44×2 cm as a thin layer. The samples were dried in a laboratory-scale hot air oven (Binder, model FD 115, Tuttlingen, Germany) at temperature of 50,

60, 70, 80 and 90°C. Constant air velocity with 1 m/s was controlled. The samples were taken at time intervals to determine moisture content using the AOAC method [6]. Drying time was also investigated when moisture content of the samples was lower than 10% dry basis.

2.3 Infrared Drying

Approximately 200 g of the prepared mulberry leaves were placed on tray with dimension of 29×44×2 cm as a thin layer. The samples were dried at infrared power of 250, 500 and 750 W. Constant air velocity with 1 m/s was controlled. The samples were taken at time intervals to determine moisture content using the AOAC method [6]. Drying time was also investigated when moisture content of the samples was lower than 10% dry basis

2.4 Color

The color of dried mulberry leaves was measured by spectrophotometer brand hunter lab (Mini Scan XE Plus model) with CIE system in the terms of brightness (L^*), red and green values (a^*) and yellow and blue values (b^*)

2.5 Mathematical models

The moisture content data were calculated by Eq. (1):

$$MR = \frac{M_1 - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (1)$$

where, MR is the dimensionless moisture ratio; M_i is moisture content at any time M_0 : initial moisture content and M_{eq} is equilibrium moisture content.

The details of evaluated thin-layer drying models, presented in Table 1, these models were fitted to obtain results for MR . For analysis of the parameters, the thin layer of drying technique was used to analyze nonlinear regression. An indicator of the ability to predict the equation. The coefficient of determination (R^2) and Root mean square error ($RMSE$) can be calculated from Eqs. (2) - (3), respectively.





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

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

where N is the total number of data, $MR_{exp,i}$, $MR_{pre,i}$ and MR_{pred} are the moisture content of the experiment, predicted and average predicted moisture rates, respectively.

Table 1. Mathematical models

Model	Equation
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Modified Page	$MR = \exp((-kt)^n)$
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
Two term	$MR = a \exp(-k_1t) + b \exp(-k_2t)$
Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$

MR is moisture ratio; t is time (min) and a , b , c , g , k_1 , k_2 and n are coefficients of models.

2.6 Effective moisture diffusivity

In drying, the diffusion is suggested as the main mechanism for the moisture transport to the surface. For food drying process, Fick's second law of diffusion has been widely introduced to describe a falling rate stage. This model is presented for slab geometry as Eq. (4) [7].

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 (D_{eff}) t}{L^2}\right) \quad (4)$$

where, MR is moisture ratio; t is time (min); D_{eff} is effective diffusivity (m^2/min); L is half slab thickness of slices (m).

When the drying periods is too long, Eq. (4) can be abbreviated to Eq. (5) [6].

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 (D_{eff}) t}{L^2}\right) \quad (5)$$

The effective moisture diffusivity could be determined by empirical data using the graph between logarithmic values of the moisture content ($\ln MR$) and drying time (t); the $\ln(MR)$ -time graph would present an incline line with its slope. The effective moisture diffusivity was then calculated following the Eq. 6.

$$D_{eff} = \frac{slope \cdot L^2}{\pi^2} \quad (6)$$

3. Results and discussion

3.1 Drying characteristics of mulberry leaves

The moisture content of a sample prior to drying was approximately 70-80 % wet basis. Fig. 1 showed the changes of moisture ratio with time during hot air and infrared drying at different drying conditions. It was found that faster moisture removal of the samples occurred at the initial stage of drying. After that, moisture contents of the samples gradually decreased when drying time was longer. The absence of constant-rate period was noticed; only the falling rate period existed for both drying methods. This is because the internal moisture transfer was not sufficient enough to maintain the saturated surface leading to the rate of evaporation was not constant [8]. Similar results have been reported for various fruits and vegetables. Ashtiani et al. [5] stated that there was no constant rate period during hot air and infrared drying of peppermint leaves. Meisami-asl et al. [9] revealed that only falling rate period took place during hot air drying of apple slices.

For hot air drying, increase in the slope of the drying curve occurred when drying temperature raised. At higher drying temperature water molecules move faster because of gaining energy leading to larger driving force for heat/mass transfer than at lower temperatures [10]. Similar result was found for infrared drying. Drying curve became steeper when infrared power was higher. Acceleration of infrared power gave higher infrared energy which consequently increased temperature and moisture removal





rate [11]. The results were in accordance with the previous reports by Ashtiani et al. [5] and Tirawanichakul et al. [12] who reported that increase in level of hot air drying temperature and infrared intensity significantly provided higher reduction of drying rate.

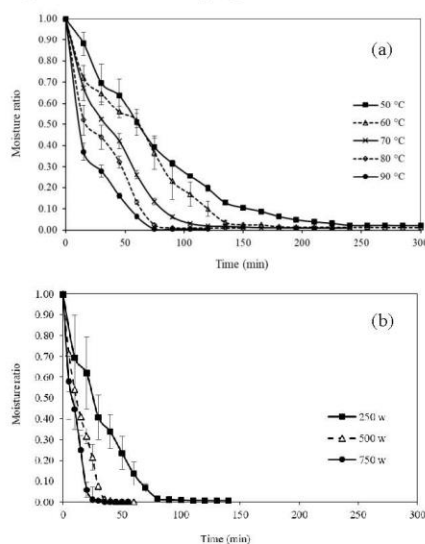


Fig 1. Changes of moisture ratio with time during (a) hot air and (b) infrared drying

Furthermore, the reduction of moisture ratio during infrared drying was larger than that during hot air drying under all conditions. This is due to the fact that infrared radiation can penetrate into the materials and be directly converted to internal heat providing a rapid heating mechanism [10].

Table 2 presented the time to dry mulberry leaves to reach the final moisture content of less than 10% wet basis at various experimental conditions. As expected, the results showed that the drying time at higher hot air temperature and infrared power were shorter than those at lower hot air temperatures and infrared power. Moreover, infrared drying had faster drying time than hot air drying. As discussed earlier, increase in water removal rate of mulberry leaves at higher drying temperature and infrared power

resulted in less drying time. Infrared drying also had better rate of heat transfer and flux than hot air drying.

Table 2. Time to dry samples to the final moisture content of less than 10% wet basis

Drying method	Drying condition	Drying time (min)
Hot air	50 °C	210
	60 °C	135
	70 °C	105
	80 °C	75
	90 °C	70
Infrared	250 W	80
	500 W	40
	750 W	30

2. Modelling of drying kinetic

To describe the drying behavior of mulberry leaves during hot air and infrared drying, the experimental data as the moisture ratio (*MR*) of samples versus drying time was fitted to six thin layer drying models shown in Table 1. The estimated parameters and statistical analysis of those empirical models for all drying conditions of both drying methods were presented in Table 3. According to the statistical values of the highest coefficients (R^2) and the least of root mean square error (*RMSE*), the Logarithmic model could present better predictions for the moisture transfer during hot air and infrared drying of mulberry leaves. The values of R^2 and *RMSE* of the Logarithmic model varied between 0.9302 to 0.9934 and 0.0041 to 0.0174 for hot air drying, respectively and 0.8730 to 0.9788 and 0.0086 to 0.0293 for infrared drying, respectively. This finding is in agreement with the previous research. For example, Ashtiani et al. [5] and Taheri-Garavand et al. [13] reported that thin-layer hot air drying kinetic could be properly described by the Logarithmic model. Doymaz [14] and Ismail and Kocabay [15] also stated that the Logarithmic models was found the most suitable model for explaining the infrared drying kinetic of sweet potato slices and rainbow trout fillets.





Table 3. Statistical results obtained from different six drying models

Model	Parameter	Hot air temperature (°C)					Infrared power (W)		
		50	60	70	80	90	250	500	750
Newton	k	0.014	0.018	0.027	0.034	0.051	0.031	0.067	0.012
	R ²	0.9922	0.9500	0.9759	0.9277	0.9318	0.9649	0.9554	0.7938
	RMSE	0.0036	0.0101	0.0070	0.0151	0.0186	0.0127	0.0122	0.0319
Page	k	0.010	0.016	0.030	0.044	0.123	0.018	0.042	0.067
	n	1.078	1.016	0.975	0.972	0.737	1.143	1.158	1.162
	R ²	0.9949	0.9516	0.9753	0.8950	0.6016	0.9778	0.6901	0.8417
	RMSE	0.0036	0.0102	0.0070	0.0180	0.0549	0.0088	0.0353	0.0311
Modified Page	k	0.010	0.016	0.030	0.044	0.123	0.030	0.065	0.098
	n	1.078	1.016	0.975	0.970	0.737	1.143	1.158	1.162
	R ²	0.7843	0.6880	0.9760	0.8525	0.7013	0.9778	0.9746	0.8445
	RMSE	0.0263	0.0324	0.0069	0.0213	0.0437	0.0088	0.0101	0.0308
Logarithmic	a	1.021	0.984	0.986	0.988	0.956	1.041	1.202	1.125
	k	0.013	0.016	0.026	0.031	0.054	0.027	0.043	0.076
	c	-0.020	-0.025	-0.005	-0.018	-0.025	-0.45	-0.223	-0.137
	R ²	0.9934	0.9603	0.9779	0.9402	0.9302	0.9788	0.9541	0.8730
	RMSE	0.0041	0.0093	0.0067	0.0144	0.0174	0.0086	0.0163	0.0293
Two term	a	0.519	0.509	0.236	2.247	0.660	0.442	0.439	0.466
	k ₁	0.014	0.017	0.026	0.036	0.035	0.031	0.068	0.103
	b	0.491	0.461	0.747	-1.273	0.340	0.570	0.576	0.543
	k ₂	0.014	0.017	0.026	0.039	1.526	0.031	0.068	0.103
	R ²	0.9923	0.9516	0.9768	0.9327	0.9686	0.4048	0.9578	0.7731
	RMSE	0.0043	0.0098	0.0068	0.0147	0.0106	0.0432	0.0120	0.0349
Modified Henderson and Pabis	a	0.335	0.857	0.328	0.233	0.404	0.472	0.0373	0.382
	b	0.335	0.719	0.327	0.164	0.340	-0.376	0.372	0.373
	c	0.341	0.623	0.328	0.579	0.0256	0.895	0.271	0.254
	g	0.014	0.013	0.026	0.033	0.469	0.012	0.068	0.103
	h	0.014	0.009	0.026	0.033	0.035	0.023	0.068	0.103
	k	0.014	0.013	0.026	0.033	0.034	0.023	0.068	0.103
	R ²	0.9923	0.9640	0.9768	0.8990	0.7934	0.9806	0.9579	0.7385
	RMSE	0.0043	0.0089	0.0068	0.0207	0.0306	0.0082	0.0120	0.0328

Note: a, b, c, g, h, k₁, k₂ is the constant dependent on the material and k is the drying coefficient.

The accuracy of the established model for the thin layer drying process was investigated by comparing the predicted moisture ratio with experimental moisture ratio. The relationships of the model for all the drying conditions of hot air and infrared drying were illustrated in Fig 2.

3. Effective moisture diffusivity

The parameter of effective diffusivity was calculated using the method of slope obtained from plotting $\ln(MR)$ against drying time. The values of D_{eff} of dried mulberry leaves with corresponding coefficients of determination (R^2) were also presented in Table 4. The effective diffusivity of hot air drying temperature at 50-90°C were ranged from 6.483×10^{-7} to 2.253×10^{-6} m²/min and infrared power at 250-750 W were ranged

from 1.726×10^{-6} to 6.662×10^{-6} m²/min. The results indicated that D_{eff} values increased greatly with an increase in hot air temperatures and infrared power. This is because higher mass transfer occurred at higher temperatures and infrared power. Similar results were noted by Rayaguru and Routray [16] who report that by increasing the drying air temperature of stone apple slices from 40 to 70°C, the effective moisture diffusivity values increased from 3.731×10^{-10} m²/s to 6.67×10^{-10} m²/s. Ashtiani et al. [5] also reported that larger the effective moisture diffusivity was obtain as higher infrared power was employed.





The 11th International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB XI), 29 July -1 August 2019, Johor Bahru, Malaysia

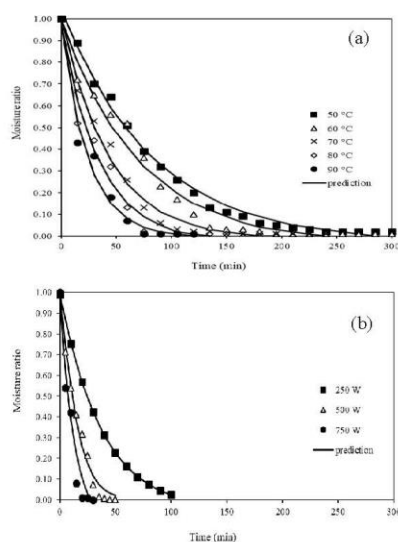


Fig 2. Relationship between moisture ratio and drying time of the experiment data of (a) hot air and (b) infrared drying versus the logarithmic model

4. Color

Table 5 presented the color parameters of dried mulberry leaves by hot air and infrared drying method. The color parameters

presenting in the terms of L^* and a^* values decreased when the hot air drying temperature and infrared power increased. However, the drying temperature and infrared power did not show a significant effect on b^* value of dried mulberry leaves. This indicated that the samples were turned to more intense and greenish as the hot air drying temperature and infrared power were raised. Moreover, the color parameters of dried mulberry leaves by hot air drying at 50°C and infrared drying at 250 W was maintained constant when compared with the fresh mulberry leaves.

Table 4. The effective moisture diffusivity of hot air and infrared drying at different drying conditions

Drying method	Drying condition	Effective moisture diffusivity (m^2/min)
Hot air	50°C	6.484×10^{-07}
	60°C	9.767×10^{-07}
	70°C	1.317×10^{-06}
	80°C	2.079×10^{-06}
	90°C	2.253×10^{-06}
Infrared	250W	1.726×10^{-06}
	500W	5.961×10^{-06}
	750W	6.662×10^{-06}

Table 5. Color parameters of dried mulberry leaves undergoing hot air and infrared drying

Drying method	Drying condition	Color parameters		
		L^*	a^*	b^*
Fresh	-	37.54 ± 2.14^a	-10.29 ± 1.45^a	21.56 ± 1.92^a
Hot air	50°C	36.37 ± 2.33^a	-8.52 ± 1.02^{ab}	21.09 ± 1.77^a
	60°C	36.46 ± 1.85^a	-6.62 ± 1.34^{bc}	21.58 ± 1.56^a
	70°C	35.29 ± 1.44^{ab}	-6.00 ± 1.47^{cd}	21.23 ± 1.64^a
	80°C	34.53 ± 1.63^{ab}	-4.06 ± 1.51^{ef}	20.41 ± 1.48^a
	90°C	34.21 ± 5.85^{ab}	-3.36 ± 1.38^{ef}	19.66 ± 3.07^a
Infrared	250W	38.43 ± 1.15^a	-7.66 ± 1.42^{ab}	20.79 ± 2.42^a
	500W	33.82 ± 1.53^{ab}	-5.31 ± 1.00^{cd}	19.87 ± 1.94^a
	750W	30.55 ± 1.51^b	-2.60 ± 1.01^f	18.03 ± 1.68^a

Same letters in the same column indicate that the values are not significantly different ($p > 0.05$).





5. Conclusion

The drying characteristics of mulberry leaves at five different temperatures of 50, 60, 70, 80 and 90°C and three levels of infrared power at 250, 500 and 750 W were investigated. Drying curves of mulberry leaves did not show a constant rate-drying period under the experimental employed and showed only a falling rate-drying period. The empirical logarithmic model showed a better fit to the experimental data as compared to others models. The effective moisture diffusivity values of mulberry leaves during hot air and infrared drying at all conditions were ranged between 6.48×10^{-7} and 2.25×10^{-6} m²/min. From the color results in the terms of L*, a* and b* values, it was possible concluded that hot air drying at 50°C and infrared drying at 250 W were the best condition for production of dried mulberry leaves since these two drying conditions provided the most similar color values to fresh mulberry leaves.

6. References

- [1] Katsube, T., Tsurunaga, Y., Sugiyama, M., Furuno, T. and Yamasaki, Y. (2018). Effect of air-drying temperature on antioxidant capacity and stability of polyphenolic compounds in mulberry (*Morus alba* L.) leaves, *Food Chemistry*, vol. 113, pp. 964-969.
- [2] Sun, C., Wu, W., Ma, Y., Min, T., Lai, F. and Wu, H. (2018). Physicochemical, functional properties, and antioxidant activities of protein fractions obtained from mulberry (*Morus atropurpurea* roxb.) leaf, *International Journal of Food Properties*, vol. 20, NO. S3, S3311-S3325.
- [3] Doymaz, I. (2004). Drying Kinetics of White Mulberry, *Journal of Food Engineering*, vol. 61, pp.341-346.
- [4] Rahman, S. N. F. S. A., Wahid, R. and Rahman, N. Ab. (2015). Drying Kinetics of *Nephelium Lappaceum* (Rambutan) in a Drying Oven, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 195, pp. 2734 – 2741.
- [5] Ashtiani, S.-H. M., Salarikia, A. and Golzarian, M.R. (2017). Analyzing drying characteristics and modeling of thin layers of peppermint leaves under hot-air and infrared treatments. *Information Processing in Agriculture*, vol. 4, pp.128-139.
- [6] AOAC, 1990, Official methods of analysis, 15th ed., Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC, USA.
- [7] Apintanapong, M. (2009). Infrared drying of holy basil leaves and its effect on sensory characteristics. *Agricultural Science Journal*, vol. 40 (Suppl. 3), pp. 69-72.
- [8] Srikiatden, J. and Roberts, J. S. (2007). Moisture transfer in solid food materials: a review of mechanisms, models, and measurements. *International Journal of Food Properties*, vol. 10, pp. 739-777.
- [9] Meisami-asl, E., Rafiee, S., Keyhani, A. and Tabatabaefar, A. (2010). Drying of apple slices (var. Golab) and effect on moisture diffusivity and activation energy. *Plant Omics Journal*, vol. 3, pp. 97-102.
- [10] Riadh, M. H., Ahmad, S. A. B., Marhaban, M. H., and Soh, A. C. (2015). Infrared heating in food drying: An overview. *Drying Technology*, vol.33, pp.322-335.
- [11] Tanongkankit, Y., Chiewchan, N. and Devahastin, S. (2012). Physicochemical property changes of cabbage outer leaves upon preparation into functional dietary fiber powder. *Food and Bioproducts Processing*, vol. 90, pp. 541-548.
- [12] Tirawanichakul, S., Na phatthalung, w. and Tirawanichakul, Y. (2008). Drying strategy of shrimp using hot air convection and hybrid infrared radiation/hot air convection. *Walailak Journal Science and Technology*, vol.5, pp.77-100.
- [13] Taheri-Garavand, A., Rafiee, S. and Keyhani, A. (2011). Study on Effective moisture diffusivity, activation energy and mathematical modeling of thin layer drying kinetics of bell pepper. *Australian Journal of Crop Science*, vol.5, pp.128-131.
- [14] Doymaz, I. (2012). Infrared drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) slices. *Journal of Food Science and Technology*, vol.49, pp. 760-766.
- [15] Ismail, O., Kocabay, O. G. (2018). Infrared and Microwave Drying of Rainbow Trout: Drying Kinetics and Modelling, vol.18, pp. 259-266.
- [16] Rayaguru, K. and Routray, W. (2012). Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of stone apple slices, *International Food Research Journal*, vol. 19(4), pp.1503-1510.



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นางสาว สุธธิตา กัณณะนา
เกิดเมื่อ 15 พฤษภาคม 2538
ประวัติการศึกษา 2560 ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
2556 มัธยมศึกษาตอนปลาย
โรงเรียนมัธยมวิทยา
ที่อยู่ 29 หมู่ 3 ต. นาแก้ว อ. เกาะคา จ. ลำปาง 52130
อีเมล mintha47@gmail.com

