



ผลกระทบของสภาวะและวิธีการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลง
คุณภาพของสาหร่ายเตา

น้ำฝน ไชยลังกา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

ชื่อเรื่อง

ผลกระทบของสภาวะและวิธีการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลง

คุณภาพของสาหร่ายเตา

โดย

นำฝน ไชยลังกา

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย อัสวราชันย์)

วันที่ 6 เดือน พ.ย. พ.ศ. 2557

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิสิน บวรสมบัติ)

วันที่ 6 เดือน พ.ย. พ.ศ. 2557

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงพร อมรเลิศพิศาล)

วันที่ 6 เดือน พ.ย. พ.ศ. 2557

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.ชนันท์ ราษฎร์นิยม)

วันที่ 6 เดือน พ.ย. พ.ศ. 2557

ประธานอาจารย์ประจำหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จิตรงค์กล้าเลิศ)

วันที่ 6 เดือน พ.ย. พ.ศ. 2557

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุพงศ์ วาฤทธิ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 7 เดือน พ.ย. พ.ศ. 2557

ชื่อเรื่อง	ผลกระทบของสภาวะและวิธีการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลง คุณภาพของสาหร่ายเตา
ชื่อผู้เขียน	นางสาวน้ำฝน ไชยลังกา
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย อัสวราชันย์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวิธีการอบแห้งและหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตา ซึ่งเป็นสาหร่ายที่อุดมไปด้วยคุณค่าทางโภชนาการและมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ปัจจุบันจึงนิยมนำสาหร่ายเตาอบแห้งมาสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเพื่อนำมาเป็นส่วนประกอบในการผลิตเครื่องสำอางและอาหารเสริม โดยงานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี คุณลักษณะการอบแห้ง รวมถึงหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งที่เหมาะสมและเปรียบเทียบผลของวิธีการอบแห้ง 3 วิธี ได้แก่ การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของสาหร่ายเตาอบแห้ง จากนั้นหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งโดยใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ด้วยการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (BBD)

ผลการศึกษาพบว่าสาหร่ายเตาที่ใช้ในการทดลองมีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $8.55 \pm 0.20 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ โดยเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสาหร่ายเตาจนเหลือความชื้น $0.15 \pm 0.01 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ ใช้เวลาเท่ากับ 1,980 min ของการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ขณะที่การอบแห้งด้วยลมร้อนในช่วงอุณหภูมิ 60-75°C และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับ 0.77-2.50 W/g ใช้เวลาอยู่ระหว่าง 220-590 min และ 21-80 min ตามลำดับ จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งสาหร่ายเตา พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Logarithmic สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งสาหร่ายการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟได้เหมาะสมที่สุด ในขณะที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli et al. สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งสาหร่ายการอบแห้งด้วยลมร้อนได้เหมาะสมที่สุด ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งด้วยลมร้อนในช่วงอุณหภูมิ 60-75°C และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับ 0.77-2.50 W/g มีค่าเท่ากับ $0.48 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, 1.72×10^{-10} - $4.51 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ และ 2.74×10^{-7} -

$10.64 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ตามลำดับ และค่าพลังงานกระตุ้น มีค่าเท่ากับ 62.36 kJ/mol และ 1.32 W/g สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

การศึกษาผลของสภาวะและวิธีการอบแห้ง พบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพโดยรวมทั้งการสูญเสียสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้ดีที่สุด และการหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งสำหรับเตาด้วยลมร้อนโดยใช้วิธี RSM จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 69.57°C ความเร็วลมร้อน 1.60 m/s และความหนาของชั้นวัสดุ 3.05 mm โดยสภาวะที่ได้จากการทำนายให้ค่าความแตกต่างสีโดยรวม เท่ากับ 16.92 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS และ DPPH มีค่าเท่ากับ $2,502.02 \text{ mg GAE}/100 \text{ g}_{\text{dry matter}}$, $2,017.40 \text{ mg TEAC}/100 \text{ g}_{\text{dry matter}}$ และ $3,722.50 \text{ mg TEAC}/100 \text{ g}_{\text{dry matter}}$ ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี มีค่าเท่ากับ 6.62 และ $4.93 \text{ mg}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ ตามลำดับ

Title	Effects of Drying Conditions and Drying Methods on the Quality Changes of <i>Spirogyra</i> sp.
Author	Miss Namphon Chailungka
Degree of	Master of Engineering in Food Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Rittichai Assawarachan

ABSTRACT

The purpose of this research was to study the effects of the drying process and identify appropriate conditions for drying *Spirogyra* sp. This type of algae is nutritionally beneficial and has anti-oxidant qualities. Therefore, there is now a trend of extracting biological matter from dried *Spirogyra* sp. to use in producing cosmetics and food supplements. This research studied its physical and chemical qualities as well as characteristics of the drying process and found a suitable mathematical model of the drying process. The effects of three drying methods, open sun drying, hot air drying and microwave drying were compared on the quality of the dried *Spirogyra* sp. From this data suitable conditions for the drying process were discovered using the Response Surface Methodology (RSM) technique and the Box-Benken Design (BBD) testing method.

The results of the study showed that the tested *Spirogyra* sp. had a moisture content of $8.55 \pm 0.01 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ at the beginning of the process and a moisture content of $0.15 \pm 0.01 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ at the end. This process took 1,980 minutes with the open sun drying process. The hot air drying process, which used a temperature of 60-75°C, took between 220-590 minutes, while the microwave drying process, which used 0.77-2.50 W/g frequencies, took between 21-80 minutes. From the results of the mathematical models, the Logarithmic model was the best describing the behavior of the *Spirogyra* sp. for the open sun and microwave drying methods, while the Midilli et al. model best describes the drying behavior of *Spirogyra* sp. in the hot air drying method. The results of the coefficient analysis of *Spirogyra* sp.'s moisture diffusion effectiveness show values of $0.48 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, 1.72×10^{-10} - $4.51 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ and 2.74×10^{-10} - $10.64 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, respectively during the open sun drying, hot air drying, and microwave drying

processes. The activation energy values were 62.36 kJ/mol for the hot air drying method and 1.32 W/g for the microwave drying method.

By examining the results of the drying conditions and methods the study showed that the hot air drying at 70°C is the most ideal condition, since it is best able to minimize discoloration and loss of antioxidants. By using the RSM technique the results of the study conclude that the most ideal conditions for hot air drying of *Spirogyra* sp. is using a temperature of 69.57°C with an air velocity of 1.60 m/s and material thickness of 3.05 mm. These conditions produced a total color difference value of 16.92, a total phenolic content equal to 2,502.02 mg GAE/100 g_{dry matter}, an antioxidant activity of scavenging activity of ABTS radical and DPPH radical value of 2,017.40 and 3,722.50 mg TEAC/100 g_{dry matter}, a chlorophyll A and a chlorophyll B content equal to 6.62 and 4.93 mg /g_{dry matter}, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย อัสวราชันย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการศึกษาค้นคว้าและการวิจัย ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิสิน บวรสมบัติ อาจารย์ ดร.ดวงพร อมรเลิศพิศาล และอาจารย์ ดร.ชนันท์ ราษฎร์นิยม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่อบรมสั่งสอนให้ความรู้ แนะนำแนวทางในการทำวิจัยและตรวจสอบความบกพร่องในการเขียนวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.รัตนา ม่วงรัตน์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเนตร สืบคำ ที่ได้ให้คำแนะนำในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากทุนศึกษย์ก้นกุฏิ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ขอขอบพระคุณคุณอุเทน จำใจ และคุณรัตนภรณ์ จันทรทิพย์ ที่คอยให้คำแนะนำและสอนวิธีการใช้เครื่องมือในการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และขอขอบพระคุณคุณธีระวัฒน์ รัตนพจน์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์จัดหาวัสดุคิบที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา และมารดาที่คอยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลืออุปการะค่าใช้จ่ายต่างๆ รวมถึงพี่ๆ เพื่อนๆ และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยจนทำให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จ ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

น้ำฝน ไชยลังกา

พฤศจิกายน 2557

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
ABSTRACT	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
สารบัญตาราง	(10)
สารบัญภาพ	(11)
สารบัญตารางผนวก	(14)
สารบัญภาพผนวก	(15)
อักษรย่อและสัญลักษณ์	(16)
บทที่ 1 บทนำ	1
ความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
ขอบเขตของการวิจัย	4
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร	5
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสาหร่ายเตา	5
สารต้านอนุมูลอิสระและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ	6
รงควัตถุหรือสารสีในอาหาร	8
ทฤษฎีการอบแห้ง	9
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง	21
การวิเคราะห์สี	24
การหาสถานะที่เหมาะสมของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อน โดยใช้	
วิธีการพื้นผิวตอบสนอง	26
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	32
อุปกรณ์และสารเคมี	32
วิธีการทดลอง	33

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	45
ผลการศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งของสาหร่ายเตา	45
ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วย	
วิธีการอบแห้งแบบต่างๆ	52
ผลการศึกษาสภาวะและวิธีการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของ	
สาหร่ายเตา	65
ผลการศึกษาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง	81
ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อนโดยใช้	
วิธีพื้นผิวตอบสนอง	83
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	104
สรุปผลการทดลอง	104
ข้อเสนอแนะ	107
บรรณานุกรม	108
ภาคผนวก	117
ภาคผนวก ก สาหร่ายเตา เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง และตัวอย่างสาร	
สกัดน้ำของสาหร่ายเตาที่ใช้ในการวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ	118
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและ	
ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ	122
ภาคผนวก ค การคำนวณค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง	129
ภาคผนวก ง บทความวิชาการที่ได้นำเสนอและตีพิมพ์เผยแพร่	132
ภาคผนวก จ ประวัติผู้วิจัย	134

สารบัญตาราง

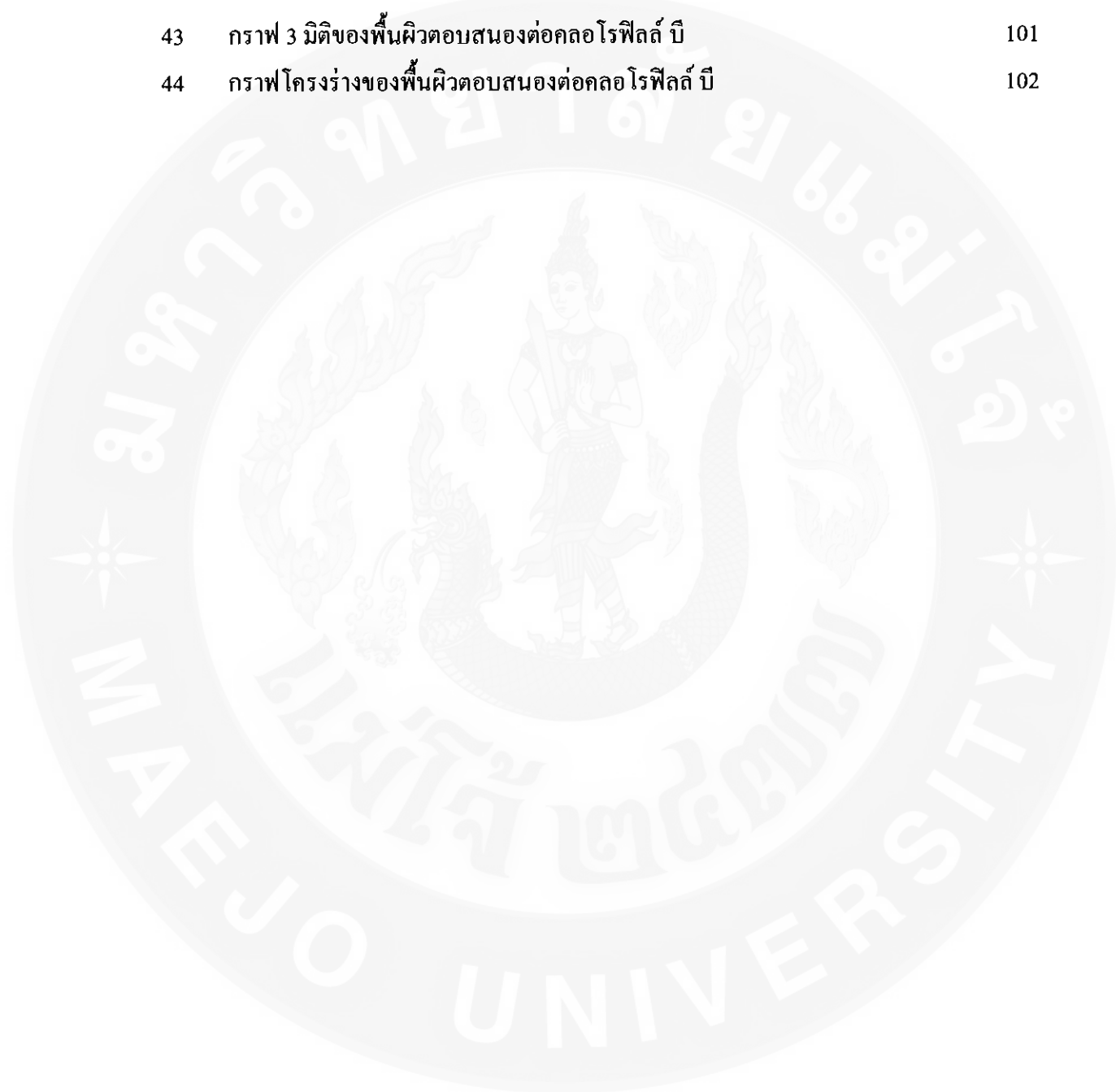
ตาราง	หน้า
1 คุณค่าทางโภชนาการและสารอาหารในสาหร่ายเตา	6
2 การเปรียบเทียบข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ	20
3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งในรูปของแบบจำลองเอมพิริคัล	21
4 ค่าตัวแปรต้นที่ใช้ในการทดลอง	44
5 ค่าคงที่การอบแห้งของสาหร่ายเตาด้วยพลังงานแสงอาทิตย์	54
6 ค่าคงที่การอบแห้งของสาหร่ายเตาด้วยลมร้อน	55
7 ค่าคงที่การอบแห้งของสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟ	56
8 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งสาหร่ายเตา ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และการอบแห้งด้วยลมร้อน	61
9 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งสาหร่ายเตา ด้วยคลื่นไมโครเวฟ	62
10 การเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งสาหร่ายเตา (ค่อ 1,000 g dry matter)	82
11 การวิเคราะห์ข้อมูลการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อนโดยใช้วิธีพื้นผิว ตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบิ้ลันเคน	88
12 ANOVA สำหรับแต่ละค่าการตอบสนองของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลม ร้อน	89
13 ANOVA สำหรับแต่ละค่าการตอบสนองของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลม ร้อน	90
14 สมการโพลิโนเมียลลำดับที่สองและค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับค่า การตอบสนองของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อน	91
15 การกำหนดช่วงของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการตอบสนองเพื่อเลือกสภาวะที่ เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อนโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง	103

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1 สาหร่ายเตาชนิด <i>Spirogyra neglecta</i> (Hassall) Kutzing	5
2 เส้นโค้งความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้ง	10
3 การถ่ายเทความชื้นออกจากอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพในระหว่างการอบแห้ง	16
4 แผนภาพของเครื่องอบแห้งแบบถาด	16
5 แถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	17
6 ไดอะแกรมแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	18
7 กลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออนและกลไกกลไกการหมุนของทั้งสองขั้ว	19
8 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบ้น์เคน	27
9 แผนภาพการดำเนินโครงการวิจัยทั้งหมด	34
10 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยพลังงานแสงอาทิตย์	46
11 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อน	47
12 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟ	48
13 การเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยพลังงานแสงอาทิตย์	50
14 การเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อน	51
15 การเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟ	52
16 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Logarithmic สำหรับการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยพลังงานแสงอาทิตย์	57
17 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli et al. สำหรับการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อน	58
18 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Logarithmic สำหรับการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟ	59

ภาพ	หน้า
19 ความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียสระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ความขึ้นประสิทธิผลและอุณหภูมิในการอบแห้ง	63
20 ความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียสระหว่างค่าคงที่การอบแห้งและ น้ำหนักของสาหร่ายเตาต่อระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ	64
21 การเปรียบเทียบค่า a_w ของสาหร่ายเตา	65
22 การเปรียบเทียบสีของสาหร่ายเตาสดและสาหร่ายเตาอบแห้ง	66
23 การเปรียบเทียบค่า L^* ของสาหร่ายเตา	67
24 การเปรียบเทียบค่า a^* ของสาหร่ายเตา	69
25 การเปรียบเทียบค่า b^* ของสาหร่ายเตา	71
26 การเปรียบเทียบค่า ΔE ของสาหร่ายเตา	72
27 การเปรียบเทียบค่า C^* ของสาหร่ายเตา	73
28 การเปรียบเทียบค่า h^0 ของสาหร่ายเตา	74
29 การเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของสาหร่ายเตา	76
30 การเปรียบเทียบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสาหร่ายเตา	77
31 การเปรียบเทียบคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บีของสาหร่ายเตา	80
32 การเปรียบเทียบสีสาหร่ายเตาอบแห้งด้วยลมร้อนที่ได้ในแต่ละสิ่งทดลอง	84
33 กราฟ 3 มิติของพื้นผิวตอบสนองต่อค่าความแตกต่างสีโดยรวม	86
34 กราฟโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองต่อค่าความแตกต่างสีโดยรวม	87
35 กราฟ 3 มิติของพื้นผิวตอบสนองต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด	93
36 กราฟโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ทั้งหมด	94
37 กราฟ 3 มิติของพื้นผิวตอบสนองต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS	95
38 กราฟโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองต่อความสามารถในการต้านอนุมูล อิสระ ABTS	96
39 กราฟ 3 มิติของพื้นผิวตอบสนองต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH	97
40 กราฟโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองต่อความสามารถในการต้านอนุมูล อิสระ DPPH	98

ภาพ	หน้า
41 กราฟ 3 มิติของพื้นผิวตอบสนองต่อคลอโรฟิลล์ เอ	99
42 กราฟโครงสร้างของพื้นผิวตอบสนองต่อคลอโรฟิลล์ เอ	100
43 กราฟ 3 มิติของพื้นผิวตอบสนองต่อคลอโรฟิลล์ บี	101
44 กราฟโครงสร้างของพื้นผิวตอบสนองต่อคลอโรฟิลล์ บี	102



สารบัญตารางผนวก

ตารางผนวก		หน้า
1	ค่าการดูดกลืนแสงของกรดแกลลิก (gallic acid) ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด	123
2	ค่าการดูดกลืนแสงของโทรล๊อกซ์ (trolox) และ %inhibition ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS	125
3	ค่าการดูดกลืนแสงของโทรล๊อกซ์ (trolox) และ %inhibition ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH	127

สารบัญภาพผนวก

ภาพผนวก		หน้า
1	สารห่วยเตาที่ใช้ในการทดลอง	119
2	เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนแบบถาดที่ใช้ในการทดลอง	119
3	เครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง	120
4	ตัวอย่างสารสกัดน้ำของสารห่วยเตาที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด	120
5	ตัวอย่างสารสกัดน้ำของสารห่วยเตาที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS	121
6	ตัวอย่างสารสกัดน้ำของสารห่วยเตาที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH	121
7	กราฟมาตรฐานของสารละลายกรดแกลลิก (gallic acid) สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด	124
8	กราฟมาตรฐานของ Trolox (trolox) สำหรับวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS	126
9	กราฟมาตรฐานของ Trolox (trolox) สำหรับวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH	128

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
MC_{wb}	ความชื้นน้ำหนักเปียก	g_{water}/g_{weight}
MC_{db}	ความชื้นน้ำหนักแห้ง	$g_{water}/g_{dry\ matter}$
MC_i	ความชื้นเริ่มต้น	% (wb.)
MC_f	ความชื้นสุดท้าย	% (wb.)
M_{w+d}	มวลทั้งหมดของอาหาร	g
M_w	มวลของน้ำในอาหาร	g
M_d	มวลของแข็งในอาหาร	g
W_i	น้ำหนักอาหารเริ่มต้นก่อนการอบแห้ง	g
W_f	น้ำหนักอาหารสุดท้ายหลังการอบแห้ง	g
MR	อัตราส่วนความชื้น	-
t	เวลาในการอบแห้ง	s
k	ค่าคงที่การอบแห้ง	1/min
n	ดัชนีการอบแห้ง	1/min
a	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	-
b	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	-
c	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	-
D_{eff}	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล	m^2/s
L	ความหนาครึ่งหนึ่งของตัวอย่าง	m
D_0	ปัจจัยก่อนเลขชี้กำลัง	1/min
E_a	พลังงานกระตุ้นของการอบแห้งด้วยลมร้อน	kJ/mol
R	ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 0.008314	kJ/mol K
T	อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง	K
E_a	พลังงานกระตุ้นของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ	W/g
k_0	แฟกเตอร์ความถี่	1/min
m	น้ำหนักของตัวอย่าง	g
P	พลังงานของคลื่นไมโครเวฟ	W
$MR_{i,exp}$	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง	-

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$MR_{i,pre}$	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง	-
N	จำนวนค่าสังเกต	-
n	จำนวนค่าคงที่ในแบบจำลอง	-
R^2	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ	-
χ^2	ค่าการลดลงไคกำลังสอง	-
$RMSE$	ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย	-
ΔE	ค่าความแตกต่างเอนทัลปีโดยรวม	-
C^*	ค่าความสด	-
h°	ค่าเอนทัลปี	-
C_p	ค่าความจุความร้อนของน้ำ มีค่าเท่ากับ 4.187 kJ/g* K	-
ΔT	ผลต่างของอุณหภูมิน้ำกลั่นก่อนและหลังการได้รับความร้อนด้วยคลื่น	°C
M_i	ความชื้นเริ่มต้น	$g_{water}/g_{dry\ matter}$
M_t	ความชื้นที่เวลาใดๆ	$g_{water}/g_{dry\ matter}$
M_e	ความชื้นสมดุล	$g_{water}/g_{dry\ matter}$
a_w	ค่าวอเตอร์แอคทีวิตี	-
L^*	ค่าความสว่าง/ความมืด	-
a^*	ค่าความเป็นสีแดง/สีเขียว	-
b^*	ค่าความเป็นสีเหลือง/สีน้ำเงิน	-
P	กำลังไฟฟ้า	kW
I	กระแสไฟฟ้า	A
V	ความต่างศักย์ทางไฟฟ้า	V
$\cos \phi$	ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 0.85	-
$\beta_0 \beta_1 \beta_2 \beta_3$	ค่าสัมประสิทธิ์	-
X_i	ตัวแปรต้น	-
Y_i	ตัวแปรตาม	-

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมากระแสในเรื่องความห่วงใยสุขภาพ การป้องกัน และรักษาอาการเจ็บป่วยกำลังเป็นสิ่งที่ผู้บริโภคให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก ปัจจุบันผู้บริโภคหลายๆ ประเทศทั่วโลก รวมทั้งประเทศไทยได้ให้ความสนใจในการนำวัตถุดิบจากธรรมชาติมารับประทาน หรือเพื่อใช้บำรุงรักษาสุขภาพ รวมทั้งการบริโภคผลิตภัณฑ์อาหารเสริมเพื่อสุขภาพ และเครื่องสำอางที่ผลิตจากวัตถุดิบตามธรรมชาติมากขึ้น มีสาหร่ายน้ำจืดสีเขียวหลายชนิดเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีผู้ให้ความสนใจ และนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ โดยที่รู้จักกันดี คือ สาหร่ายสไปรูลิน่า (*Spirulina*) ซึ่งจะอุดมไปด้วยคุณค่าทางโภชนาการสูงรวมทั้งมีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ แต่มีราคาจำหน่ายที่สูง ดังนั้นจึงมีการศึกษาสาหร่ายเตา หรือเทาน้ำ ซึ่งเป็นสาหร่ายน้ำจืดสีเขียวอีกชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นเส้นสายยาว ไม่แตกแขนง คล้ายเส้นผมสีเขียวสด จากงานวิจัยของดวงพร และคณะ (2555); ยวดี และคณะ (2555) พบว่าสาหร่ายเตามีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีโปรตีนอยู่ในระดับสูงใกล้เคียงกับปลาน้ำจืด มีฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาใกล้เคียงกับสาหร่ายสไปรูลิน่า แต่มีราคาถูกกว่า และจากรายงานการวิจัยของยวดี และคณะ (2552); จูติกานต์ (2550) พบว่าสาหร่ายเตามีความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระได้มากกว่าสาหร่ายไก่อ (*Cladophora glomerata*) และสาหร่ายลอน (*Nostochopsis lobatus* wood em geittler) ซึ่งเป็นสาหร่ายน้ำจืดสีเขียวขนาดใหญ่อีกชนิดหนึ่ง

สาหร่ายเตา หรือเทาน้ำ มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Spirogyra* sp. เป็นสาหร่ายน้ำจืดสีเขียวขนาดใหญ่มีลักษณะเป็นเส้นสายยาวสีเขียวสด ที่พบมากในแถบภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ชาวบ้านนิยมนำมารับประทานเป็นอาหารพื้นบ้าน คือ ยำเตาสด หรือนำมาแปรรูปเป็นข้าวเกรียบเตา ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจำหน่ายในราคาถูก (สรนัศร และยวดี, 2552) จากผลงานวิจัยหลายฉบับพบว่าสาหร่ายเตามีคุณค่าทางโภชนาการสูง ประกอบด้วยโปรตีน 18.63% ไขมัน 5.21% คาร์โบไฮเดรต 56.31% เส้นใย 7.66% เถ้า 11.78% มีแร่ธาตุ วิตามิน และรงควัตถุหลายชนิด เช่น คลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี เบต้าแคโรทีน แซนโทฟิลล์ ด้านเภสัชวิทยาพบว่า มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) ระงับการเกิดแผลในกระเพาะอาหาร การหดเกร็งของกล้ามเนื้อเรียบ ขยายหลอดลม ด้านการอักเสบ ระงับปวด และลดความดันโลหิต (ยวดี และคณะ, 2555; ดวงพร และคณะ, 2555) ซึ่งอนุมูลอิสระมีผลต่อการแก่และความเสื่อมของเซลล์

และยังเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดภาวะแทรกซ้อนในโรคเบาหวาน ทั้งนี้สำหรับเตายังมีฤทธิ์ต้านเอนไซม์ไทโรซิเนส ช่วยป้องกันการเกิดฝ้าและจุดด่างดำ มีสารเมือกหรือมอยเจอร์ไรเซอร์ช่วยให้ความชุ่มชื้นแก่ผิวหนัง ช่วยให้ผิวขาว (whitening agent) และกระตุ้นการสร้างโปรคอลลาเจน (procollagen) ที่มีผลต่อการสร้างเนื้อเยื่อผิวหนัง (Takashi, 2008) จากคุณสมบัติของสารออกฤทธิ์ที่สำคัญในสารสกัดจากสาหร่ายเตาจึงได้รับความสนใจ และนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางหลายชนิด เช่น ครีมบำรุงผิวขาว ครีมบำรุงผิวหน้าป้องกันฝ้า สบู่ล้างหน้า ลิปบาล์ม สครับขัดผิว แชมพู ครีมนวด รวมทั้งผลิตภัณฑ์สปาที่กำลังได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย และอาหารเสริมเพื่อสุขภาพ เช่น เจลลี่ (เครื่องดื่มน้ำผลไม้) โยเกิร์ตสาหร่ายเตา (Jean et al, 2010; ดวงพร และคณะ, 2555; ชีระวัฒน์ และคณะ, 2554) ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์แปรรูปจากสาหร่ายเตา แต่สาหร่ายเตาสดมีข้อจำกัดคือ เน่าเสียง่าย จึงไม่นิยมนำสาหร่ายเตาสดมาสกัดสารออกฤทธิ์ ดังนั้นจึงมีการนำสาหร่ายเตาสดมาผ่านกระบวนการอบแห้งเพื่อเก็บไว้ทำการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพต่างๆ ในภายหลัง

การอบแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปที่ช่วยให้อาหารหรือวัสดุชีวภาพมีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนาน เนื่องจากมีค่าความชื้นในระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสียได้ นอกจากนี้ยังช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในอาหารได้เป็นอย่างดี (ฤทธิ์ชัย และคณะ, 2554) รวมทั้งผู้บริโภคมีความต้องการอาหารอบแห้งที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับของอาหารสดและมีคุณภาพด้านโภชนาการสูง อีกทั้งมีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้น ทั้งนี้กลุ่มเกษตรกรที่ชุมชนบ้านนาคูหา ตำบลสวนเขื่อน อำเภอเมือง จังหวัดแพร่ ซึ่งทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเตาเป็นอาชีพจะใช้วิธีการอบแห้งสาหร่ายเตาแบบดั้งเดิม นั่นคือการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์หรือตากแดด (open sun drying) ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะใช้เวลานาน อีกทั้งการตากแดดยังทำให้สาหร่ายเตามีคุณภาพไม่แน่นอน การควบคุมคุณภาพทำได้ยากเนื่องจากคุณภาพของสาหร่ายเตาจะขึ้นอยู่กับลักษณะอากาศและช่วงเวลาที่ใช้ในการตากแดด รวมทั้งอาจเกิดการปนเปื้อนฝุ่นละอองและอาจมีแมลงซึ่งเป็นสาเหตุของการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งอาจส่งผลให้สาหร่ายเตาตากแห้งไม่เป็นที่ยอมรับในด้านคุณภาพได้ ดังนั้นการออกแบบวิธีการอบแห้งให้เหมาะสมกับสาหร่ายเตา จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีความเกี่ยวข้องทั้งในด้านการอบแห้ง ผลกระทบต่อคุณภาพของสาหร่ายเพื่อลดปัญหาการสูญเสียคุณภาพ และสารออกฤทธิ์ที่สำคัญ รวมถึงพลังงานที่ใช้ในกระบวนการ โดยกระบวนการอบแห้งสามารถจำแนกได้หลายแบบ เช่น การจำแนกโดยใช้ความต่อเนื่องของการทำงานเป็นตัวกำหนด ได้แก่ การอบแห้งแบบกะ (batch drying) และการอบแห้งแบบต่อเนื่อง (continuous drying) โดยการอบแห้งแบบกะสามารถทำได้โดยการใส่อาหารหรือวัสดุทางชีวภาพที่ต้องการอบแห้งไว้ในเครื่องอบแห้งในช่วงเวลาที่

กำหนด ส่วนการอบแห้งแบบต่อเนื่องจะทำโดยการป้อนอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพเข้าเครื่องอบแห้ง และนำออกอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้การอบแห้งยังสามารถจำแนกได้โดยพิจารณาจากลักษณะของการให้ความร้อน ซึ่งสามารถจำแนกได้ 4 ชนิด คือ (วิไล, 2547)

1. การอบแห้งแบบการให้ความร้อนโดยตรง (convective หรือ direct drying) โดยการป้อนอากาศร้อนให้สัมผัสกับอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพโดยตรงที่ความดันบรรยากาศ ไอน้ำที่เกิดขึ้นจะถูกพาออกจากเครื่องอบแห้งด้วยอากาศ ข้อเสียของการอบแห้งด้วยวิธีนี้คือ อุณหภูมิของอากาศร้อนที่เข้าจะต้องสูงไม่เกิน 100°C เพราะถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้ผิวหน้าของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพสูญเสียความชื้นมากเกินไป ทำให้เกิดรูพรุนและพื้นผิวจะยุบ ซึ่งจะส่งผลให้พื้นผิวภายนอกของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพแข็ง มีลักษณะคล้ายเปลือก

2. การอบแห้งแบบการให้ความร้อนทางอ้อม (indirect หรือ contact drying) เป็นกระบวนการแยกน้ำที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจเกิดที่ความดันสุญญากาศโดยความร้อนจะไม่สัมผัสกับอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพโดยตรง แต่จะสัมผัสกับผนังของภาชนะที่ใช้บรรจุ การถ่ายโอนความร้อนจะเกิดขึ้นเนื่องจากการแผ่รังสี ข้อดีของการอบแห้งแบบนี้คือไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงนัก เนื่องจากทำงานที่ความดันสุญญากาศจึงเหมาะกับชิ้นงานหรือของแข็งที่สมบัติอาจมีการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนสีได้เมื่อได้รับความร้อนสูง

3. การทำแห้งเยือกแข็ง (freeze drying) การแยกน้ำเกิดขึ้นโดยการระเหิดของน้ำจากชิ้นงานหรือของแข็งที่แช่แข็ง การลดความดันของระบบสามารถทำได้โดยการใช้ปั๊มสุญญากาศ กระบวนการนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการอบแห้งอาหารและเวชภัณฑ์ เนื่องจากการอบแห้งด้วยวิธีดังกล่าวจะทำให้สมบัติทางชีวภาพของโปรตีน วิตามิน รวมถึงสารประกอบที่มีคุณค่ายังคงสมบัติที่ดีอยู่

4. การอบแห้งที่ภาวะเหนือวิกฤต (supercritical drying) เช่น การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด (superheated steam drying) กระบวนการนี้เหมาะกับการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหาร เพราะจะทำให้สามารถกำจัดน้ำออกไปได้ที่อุณหภูมิต่ำรวมถึงความดันในระบบที่ต่ำลง

ดังนั้น หน่วยงานวิจัยจึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณความชื้นสถานะและวิธีการอบแห้งสำหรับเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสี ปริมาณสารออกฤทธิ์ที่สำคัญของสารสกัดอบแห้ง รวมทั้งการเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งด้วยวิธีต่างๆ เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการอบแห้งสำหรับเตา โดยการศึกษาดังกล่าวจะเป็นแนวทางเพื่อใช้ประโยชน์สำหรับการออกแบบสถานะการอบแห้งสำหรับเตาในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะของสาหร่ายเตาสด และสาหร่ายเตาอบแห้ง ได้แก่ ค่าความชื้นเริ่มต้น และค่าความชื้นสมดุลที่สภาวะการอบแห้งต่างๆ
2. เพื่อเปรียบเทียบผลของสภาวะและวิธีการอบแห้งสาหร่ายเตาระหว่างการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของสาหร่ายเตา และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการอบแห้งสาหร่ายเตา
3. เพื่อศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งที่เหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของสาหร่ายเตา และเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งด้วยวิธีต่างๆ
4. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อนโดยใช้วิธีพื้นผิวดอบสนอง (RSM) ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสี สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS และ DPPH คลอโรฟิลล์ เอ และบี

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ความรู้ที่ได้จากการทำโครงการวิจัยจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการที่จะสามารถนำสภาวะและวิธีการอบแห้งที่เหมาะสมไปประยุกต์ใช้เพื่อลดการสูญเสียคุณภาพของสาหร่ายเตาอบแห้ง โดยผลิตภัณฑ์และสารสกัดจากสาหร่ายเตาอบแห้งสามารถนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตเครื่องสำอางและอาหารเสริม ซึ่งเป็นแนวทางการเพิ่มมูลค่าในอุตสาหกรรมการอบแห้งสาหร่ายเตา

ขอบเขตของการวิจัย

1. การทดลองใช้สาหร่ายเตาชนิด *Spirogyra neglecta* (Hassall) Kützing จากบ้านนาภูหา ตำบลสวนเขื่อน อำเภอเมือง จังหวัดแพร่
2. ทดลองอบแห้งสาหร่ายเตาในระดับห้องปฏิบัติการระหว่างการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

บทที่ 2

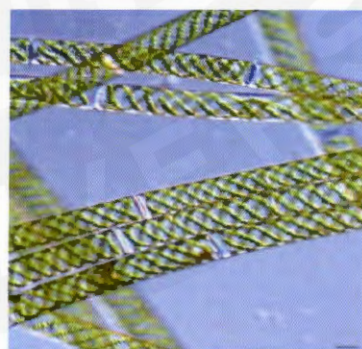
การตรวจเอกสาร

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสาหร่ายเตา

สาหร่ายเตา มีชื่อสามัญว่า “เตา” หรือ “เทา” และชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Spirogyra* sp. เป็นสาหร่ายชนิด *Spirogyra neglecta* (Hassall) Kützing (จิติกานต์, 2550) จัดอยู่ใน Division chlorophyta, Class zygnematophyceae, Order zygnematales, Family zygnemataceae เป็นสาหร่ายน้ำจืดสีเขียวขนาดใหญ่ ลักษณะของสาหร่ายชนิดนี้จะเป็นเส้นสายยาว ไม่แตกแขนง คล้ายเส้นผมสีเขียวสด เซลล์มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ความกว้างของเซลล์ 50-58 μm ความยาวเป็น 2-5 เท่าของความกว้าง ในแต่ละเซลล์ประกอบด้วย 3 คลอโรพลาสต์ ซึ่งจะหมุนวน 2.0-2.5 รอบภายในเซลล์ ส่วนการสืบพันธุ์เป็นแบบอาศัยเพศ มีการสร้างท่อ conjugation มาเชื่อมกันระหว่างเส้นสายทั้งสองเส้น เซลล์ที่สร้างไซโกสปอร์ (zygospore) มีลักษณะบวมเล็กน้อย โดยไซโกสปอร์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นรูปไข่หรือวงรี ผิวเรียบ สีน้ำตาลเข้ม ขนาดความกว้าง 54-58 μm และยาวเป็น 1.5 เท่าของความกว้าง (ภาพ 1) มักเกิดรวมกันเป็นกลุ่มในน้ำนิ่ง อาจอยู่ที่ก้นบ่อกับก้อนดิน ก้อนหิน หรืออาจจะลอยอยู่บริเวณผิวน้ำ สาหร่ายชนิดนี้เจริญในน้ำนิ่ง น้ำมีคุณภาพดีถึงปานกลาง น้ำใส มีความขุ่นไม่เกิน 10 NTU อุณหภูมิ 15-27°C ค่า pH 6.0-7.8 พบมากในแถบภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ชาวบ้านนิยมนำมารับประทานเป็นอาหารพื้นบ้านคือ ยำเตาสด หรือนำมาแปรรูปเป็นข้าวเกรียบเตา



(a)



(b)

ภาพ 1 สาหร่ายเตาชนิด *Spirogyra neglecta* (Hassall) Kützing; (a) ในธรรมชาติ, (b) ภายใต้อุปกรณ์จุลทรรศน์

ที่มา: ยวดี และคณะ (2555)

สาหร่ายเตามีคุณค่าทางโภชนาการสูง ดังแสดงในตาราง 1 มีโปรตีนอยู่ในระดับใกล้เคียงกับปลาน้ำจืด รวมทั้งยังมีรงควัตถุหลายชนิด เช่น คลอโรฟิลล์เอ และบี เบต้าแคโรทีน แซนโทฟิลล์ นอกจากนี้ยังพบว่ามีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งสารอนุมูลอิสระมีบทบาทสำคัญในการเกิดการอักเสบ การทำลายเนื้อเยื่อ มีผลต่อความเสื่อมหรือการแก่ของเซลล์ และยังเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดภาวะแทรกซ้อนในโรคเบาหวานอีกด้วย ฤทธิ์ลดน้ำตาลและไขมันในเลือดในภาวะเบาหวาน และยังมีฤทธิ์ต้านเอนไซม์ไทโรซิเนส ช่วยป้องกันการเกิดฝ้าและจุดด่างดำ ช่วยให้ผิวขาว มีสารเมือกหรือมอยเจอร์ไรเซอร์ ช่วยให้ความชุ่มชื้นแก่ผิวหนัง และกระตุ้นการสร้างโปรคอลลาเจนที่มีผลต่อการสร้างเนื้อเยื่อผิวหนัง

ตาราง 1 คุณค่าทางโภชนาการและสารอาหารในสาหร่ายเตา

สารอาหาร	%
โปรตีน	18.63
คาร์โบไฮเดรต	56.31
ไขมัน	5.21
เส้นใย	7.66
อื่นๆ	12.19

ที่มา: ชีระวัฒน์ และคณะ (2554)

สารต้านอนุมูลอิสระและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

ในปัจจุบันผู้บริโภคได้ให้ความสำคัญกับเรื่องสุขภาพ อาหาร และความสวยงามมากขึ้น โดยผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบของสารสกัดจากธรรมชาติและสมุนไพรที่มีสารต้านอนุมูลอิสระ จึงเป็นสารที่มีผู้บริโภคให้ความสนใจ เนื่องจากสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสามารถช่วยชะลอการเสื่อมสภาพของเซลล์ในร่างกาย รวมทั้งสามารถป้องกันกลิ่นหืนของอาหาร ซึ่งเป็นการเสื่อมเสียของอาหาร (food spoilage) เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี หรือการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในผักและผลไม้ เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวถึงสารต้านอนุมูลอิสระในกลุ่มของสารประกอบฟีนอลิกซึ่งเป็นสารต้านออกซิเดชันที่สำคัญชนิดหนึ่งที่พบในสาหร่ายเตา ซึ่งอาจใช้เป็นตัวกำหนดมาตรฐานในการนำสาหร่ายเตามาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารสุขภาพและเครื่องสำอาง

สารประกอบฟีนอลิก

สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compound) หรือสารประกอบฟีนอล เป็นสารต้านอนุมูลอิสระชนิดหนึ่งที่อยู่ในกลุ่ม polyphenolic ซึ่งสารที่อยู่ในกลุ่มสารประกอบฟีนอลิก ได้แก่ flavonoids, flavones, gallic acid, ellagic acid, lignin, tannin, anthocyanins, carotenoids และอนุพันธ์ของ cinnamic acid (Cowan, 1999; Helmja et al., 2007) เป็นสารที่ให้สีส้มแก่พืช สารประกอบฟีนอลิกมีมากกว่า 8,000 ชนิด จัดเป็นสารต้านอนุมูลที่ได้รับจากภายนอก พบได้มากในธรรมชาติและอาหารหรือเครื่องดื่มที่ผลิตจากพืชหลายชนิด เช่น ผัก ผลไม้ เครื่องเทศ สมุนไพร เมล็ดธัญพืชต่างๆ (Shahidi et al., 1992; Kinsella et al., 1993; Chen et al., 1996; วาริน, 2543; วาริน, 2546; ศรีจันทร์, 2546; โอภา และคณะ, 2549; ปริยานุช, 2551)

สารประกอบฟีนอลิกนอกจากจะมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระแล้วยังมีคุณสมบัติอื่นๆ เช่น ฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย ต้านไวรัส ต้านการอักเสบ ช่วยขยายหลอดเลือด ต้านโรคภูมิแพ้ ทำลายเชื้อโรคที่เข้าสู่ร่างกาย รวมถึงเป็นสารกระตุ้นให้สร้างภูมิคุ้มกัน ต้านมะเร็ง และยังช่วยในการถนอมอาหาร ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน โดยใช้เป็นสารกันหืนในอาหาร (lipid oxidation) การวิเคราะห์หาสารประกอบฟีนอลิกส่วนใหญ่นิยมหาออกมาในรูปของกรดแกลลิก (gallic acid)

การตรวจวิเคราะห์ความสามารถรวมในการต้านอนุมูลอิสระมีด้วยกันหลายวิธีการตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธี Trolox Equivalent Antioxidant Capacity Assay (TEAC) ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ โดยทั่วไปจะมีการสร้างอนุมูลอิสระที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน และวิเคราะห์ความสามารถในการยับยั้ง หรือขจัดอนุมูลอิสระของสารตัวอย่าง โดยวัดปริมาณอนุมูลอิสระที่ลดลงหรือที่เหลือ วิธี Scavenging activity of ABTS radical เป็นวิธีวัดทางอ้อมโดยใช้สาร 2,2'-azinobis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS) ทำให้เกิดอนุมูล $ABTS^{+•}$ เป็นการวัดความสามารถในการขจัดอนุมูล $ABTS^{+•}$ ที่มีสีเขียวปนน้ำเงิน ข้อดีของวิธีนี้คือสะดวก รวดเร็ว และง่ายต่อการวิเคราะห์ สามารถวิเคราะห์ปริมาณสารอนุมูลอิสระที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง ทำการวิเคราะห์ได้ทั้งในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ (โอภา และคณะ, 2549; เสาวนีย์ และคณะ, 2554) และวิธี DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) radical อนุมูล DPPH $^{•}$ เป็นอนุมูลไนโตรเจนที่คงตัว มีสีม่วง อยู่ในรูปอนุมูลอยู่แล้ว โดยไม่ต้องทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดอนุมูล การวิเคราะห์เป็นการวัดความสามารถของสารทดสอบในการกำจัดอนุมูลอิสระ โดยวิธีให้ไฮโดรเจนอะตอม การวัดทำได้โดยใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (spectrophotometer) วัดการลดลงของสี เมื่อเติมสารต้านออกซิเดชันลงไป โดยวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 nm DPPH radical ใช้ในการทดสอบความสามารถในการทำลายอนุมูลอิสระของสารตัวอย่าง

(scavenging activity) สารละลายของ DPPH มีสีม่วงในเอทานอล และเมื่อได้รับ H จะเปลี่ยนเป็น สารละลายสีเหลือง (Blois, 1958)

รงควัตถุหรือสารสีในอาหาร

สีเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการประเมินคุณภาพของอาหารทางประสาทสัมผัส เพราะผู้บริโภคจะพิจารณาคุณภาพของอาหารจากสีเป็นอันดับแรก สีของอาหารเกิดจากรงควัตถุหรือสารสี ซึ่งอาจเป็นรงควัตถุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ หรือเกิดจากการสังเคราะห์ที่เติมลงไป ในอาหารเพื่อให้อาหารมีสีทันตามที่ต้องการ รงควัตถุที่มีอยู่ในอาหารที่ได้จากพืช สามารถจำแนก ออกเป็น 4 กลุ่ม คือ คลอโรฟิลล์ (chlorophyll) แคโรทีนอยด์ (carotenoid) รงควัตถุทั้ง 2 ชนิด ละลายได้ในลิพิด ส่วนรงควัตถุที่ละลายได้ในน้ำ ได้แก่ แอนโทไซยานิน (anthocyanin) และบีตา เลน (betalain) (นิธิยา, 2545)

การศึกษาปริมาณรงควัตถุในสาหร่ายเตาของยูวดี และคณะ (2549) และจิตติกันต์ (2550) พบว่าสาหร่ายเตามีรงควัตถุหลายชนิด ได้แก่ คลอโรฟิลล์เอ และบี เบต้า-แคโรทีน (β -carotene) อัลฟา-แคโรทีน (α -carotene) แกมมา-แคโรทีน (γ -carotene) และแซนโทฟิล ซึ่งรงควัตถุ เหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ดังนั้นความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระอาจเกิดมา จากรงควัตถุ และสารอื่นๆ เช่น สารประกอบฟีนอลิก ที่มีอยู่ในสาหร่ายเตา (โอภา และคณะ, 2549)

คลอโรฟิลล์

คลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุสีเขียวที่พบมากในพืชซึ่งมีอยู่หลายชนิด ได้แก่ คลอโรฟิลล์ เอ บี ซี และดี ซึ่งพบอยู่ในคลอโรพลาสต์ คลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุที่ไม่คงตัว ดังนั้น การแปรรูปอาหารจะมีผลต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ โดยเฉพาะกระบวนการแปรรูปที่ใช้ความร้อนจะ ทำให้คลอโรฟิลล์เปลี่ยนเป็นสีเขียวอมน้ำตาล และเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลในที่สุด การวิเคราะห์ ปริมาณคลอโรฟิลล์ของสาหร่ายเตาสามารถวิเคราะห์ตามวิธีใน Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water ซึ่งเป็นวิธีการมาตรฐานที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์น้ำ น้ำเสีย และน้ำจากแหล่งต่างๆ เนื่องจากสาหร่ายเตาจัดเป็นแพลงก์ตอนพืช (phytoplankton) หรือพืช เซลล์เดียวที่มีลักษณะคล้ายพืช เนื่องจากมีคลอโรฟิลล์และผนังเซลล์เช่นเดียวกับพืช โดย คลอโรฟิลล์เอเป็นรงควัตถุสังเคราะห์แสงที่พบมากในแพลงก์ตอนพืชที่ยังมีชีวิตทุกชนิด จึงนิยมใช้ คลอโรฟิลล์เอเป็นตัวชี้ถึงมวลชีวภาพของแพลงก์ตอนพืชในแหล่งน้ำ (นิธิยา, 2545)

ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่สำคัญในการถนอมอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพให้มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้น โดยการลดความชื้นหรือปริมาณน้ำอิสระในอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพซึ่งมีผลต่อจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดเน่าเสียไม่สามารถเจริญเติบโตได้ รวมทั้งยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ หรือชะลอปฏิกิริยาต่างๆ ทั้งทางเคมีและทางชีวเคมี นอกจากนั้นการอบแห้งยังช่วยลดน้ำหนักหรือปริมาตรของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง และการเก็บรักษา (ฤทธิชัย และคณะ, 2554; สักกมน, 2555; วิไล, 2547; กิตติพงษ์, 2540)

หลักการอบแห้ง

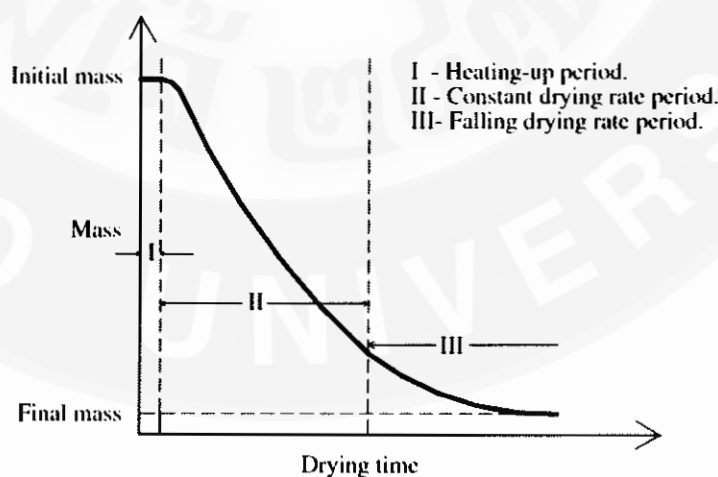
การอบแห้งเป็นหน่วยปฏิบัติการทางวิศวกรรมอาหารซึ่งเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนไปยังอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพที่มีความชื้นสูง เพื่อไล่ความชื้นหรือน้ำออกจากอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพโดยการระเหยน้ำ ทั้งนี้คุณภาพของอาหารจะขึ้นอยู่กับกลไกการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ทั้งนี้ความร้อนเกิดการถ่ายเทได้ 3 วิธี ได้แก่

1. การนำความร้อน (conduction) เป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการเคลื่อนที่โดยตรงจากพลังงานของโมเลกุลภายในของแข็ง
2. การพาความร้อน (convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยกลุ่ม โมเลกุลที่เกิดการเคลื่อนที่เนื่องจากความหนาแน่นที่แตกต่างกัน
3. การแผ่รังสี (radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อนออกรอบตัวทุกทิศทุกทาง โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง เป็นการถ่ายเทความร้อนในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การแผ่รังสีที่เกิดในช่วงความยาวคลื่น 0.1-100 μm จัดเป็นรังสีความร้อน (thermal radiation)

การเคลื่อนที่ของน้ำเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจากภายในชิ้นอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพออกมาบริเวณผิวประกอบไปด้วย การเคลื่อนที่ด้วยแรงผ่านช่องแคบ (capillary force) เป็นการเคลื่อนที่ในอาหารที่มีเซลล์โปร่ง และมีช่องว่างระหว่างเซลล์ต่อเนื่องกันเป็นทางแคบๆ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันของน้ำขึ้นมาตามท่อ การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นได้สะดวกรวดเร็ว แต่จะหยุดเมื่อน้ำในทางแคบๆ ขาดตอนลง และการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ (diffusion) ผ่านเซลล์ เป็นการเคลื่อนที่ในอาหารที่มีเนื้อแน่น ไม่มีช่องว่างระหว่างเซลล์หรือเกิดในอาหารที่อบแห้งไประยะหนึ่ง แรงที่ผ่านไปช่องแคบหมดไปแล้ว น้ำจะต้องแพร่ผ่านเซลล์จึงทำให้เคลื่อนที่ได้ช้า (วิไล, 2547; กิตติพงษ์, 2540)

อัตราการอบแห้ง

ฤทธิ์ชัย (2553) ได้อธิบายว่าอัตราการระเหยน้ำ หรืออัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ การพัฒนาวิธีการอบแห้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยรักษาคุณภาพของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพอบแห้งให้มีคุณภาพใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์สด โดยอัตราการอบแห้ง (drying rate) จะขึ้นอยู่กับสมบัติของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพ เช่น ความหนา ความชื้นเริ่มต้น ความชื้นสมดุล ภายใต้สภาวะการอบแห้งนั้นๆ ทั้งนี้ Idris et al. (2004) ได้อธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงมวลหรือความชื้นของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ออกเป็น 3 คาบเวลา (ภาพ 2) ได้แก่ คาบเวลาที่ 1 เกิดปรากฏการณ์ถ่ายเทพลังงานความร้อนให้อาหารหรือวัสดุทางชีวภาพจนถึงอุณหภูมิของการระเหย หรือเรียกว่าการให้ความร้อนช่วงต้น (heating up period) จากนั้นน้ำอิสระบริเวณผิวหน้าของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพจะเกิดการระเหย โดยถ่ายเทมวลไปยังตัวกลางทางความร้อน เมื่อน้ำหรือความชื้นที่ผิวลดลง น้ำในโครงสร้างชั้นในเซลล์จะเคลื่อนที่มาแทนที่ผิวหน้าเพื่อทดแทนความชื้นที่เสียไป โดยที่อัตราการระเหยน้ำที่ผิวหน้าจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำภายในโครงสร้างเซลล์ชั้นใน เรียกคาบเวลานี้ว่า คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period) ซึ่งจะดำเนินต่อเนื่องไปจนกระทั่งค่าความชื้นเข้าสู่ความชื้นวิกฤติ (critical moisture content) ซึ่งอัตราการถ่ายเทมวลของไอน้ำที่ผิวหน้าของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพมีค่าสูงกว่าอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำภายในโครงสร้างเซลล์ชั้นใน เกิดเป็นชั้นของความแห้ง (drying front) กระบวนการอบแห้งจะเข้าสู่คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period)



ภาพ 2 เส้นโค้งความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้ง
ที่มา: Idris et al. (2004)

ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง

การอบแห้งคือการเคลื่อนย้ายน้ำหรือความชื้นออกจากอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพ ปัจจัยใดๆ ที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายน้ำหรือความชื้นนี้จึงมีผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง ประกอบไปด้วย ลักษณะธรรมชาติของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพ วัสดุที่มีลักษณะเป็นรูพรุนหรือเนื้อโปร่ง (porosity) มักจะมีอัตราการอบแห้งเร็ว เนื่องจากน้ำในวัสดุสามารถเคลื่อนจากภายในออกมาภายนอกได้ง่าย รวมทั้งวัสดุที่มีน้ำตาลสูงจะเหนียวเหนอะหนะ ทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำเป็นไปได้ช้า แต่วัสดุที่มีการลวกนวดคลึงทำให้เซลล์แตกจึงแห้งได้เร็วกว่า ขนาด รูปร่าง ปริมาตร และพื้นที่ผิวของวัสดุก็ส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยวัสดุที่มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก จะมีพื้นที่ระเหยนํ้ามากทำให้มีอัตราการอบแห้งเร็วขึ้น ดังนั้นวัสดุที่มีความหนามากอัตราการอบแห้งจะช้ากว่าวัสดุที่หนาน้อยกว่า เนื่องจากอัตราการอบแห้งจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของวัสดุ ปริมาณของวัสดุที่นำมาอบแห้งก็เป็นปัจจัยหนึ่ง โดยวัสดุที่มีปริมาณมากๆ จะมีอัตราการอบแห้งที่ช้า เนื่องจากอากาศร้อนไม่สามารถสัมผัสกับวัสดุที่นำมาอบแห้งได้อย่างทั่วถึงจึงไม่สามารถถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุได้ ความดันนั้นเกี่ยวข้องกับการระเหยของน้ำ เนื่องจากในที่ความดันต่ำๆ น้ำจะเดือดได้ที่อุณหภูมิต่ำลง ดังนั้นการอบแห้งภายใต้ความดันต่ำๆ จะทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น รวมทั้งอุณหภูมิของอากาศร้อน การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการรับไอน้ำเพิ่มขึ้น จึงมีผลต่อการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และยังทำให้การแพร่กระจายน้ำได้ดีขึ้นเช่นกัน เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศจะให้ความแตกต่างของอุณหภูมิผิววัสดุและของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น ส่งผลเกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสารได้ดีขึ้น และความเร็วของลมร้อน เมื่อเพิ่มความเร็วลมจะทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำดีขึ้นนอกจากนั้นความเร็วลมทำให้เกิดกระแสปั่นป่วนของอากาศในเตาอบแห้ง จึงสัมผัสวัสดุได้ดีขึ้น (จิตรนา และคณะ, 2546)

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารหรือวัสดุชีวภาพเนื่องจากการอบแห้ง

การอบแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหาร เนื่องจากอาหารมีการสูญเสียไอน้ำและได้รับความร้อน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณภาพที่เห็นได้ชัดเจนระหว่างการอบแห้ง คือ การหดตัวของชิ้นอาหาร การอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้ผิวของอาหารแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ช่วยปิดกั้นการระเหยของน้ำจากภายในวัสดุไม่ให้ออกมาสู่ภายนอก เป็นผลให้อัตราการอบแห้งลดลง นอกจากการหดตัวแล้วยังมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้ง รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น สี กลิ่น เนื้อของผลิตภัณฑ์ คุณค่าทางสารอาหาร เมื่ออาหารได้รับความร้อนสูงผิวชั้นนอกจะเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) ส่วนใหญ่

แล้วปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้รสชาติไม่ดี ลักษณะภายนอกไม่น่าดู ทั้งนี้การเกิดสีน้ำตาลในอาหารมี 2 แบบ คือ ปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง โดยการเกิดสีน้ำตาลจะเกิดเนื่องจากเอนไซม์ที่ยังคงทำงานอยู่เมื่อสัมผัสกับอากาศจะเกิดสีน้ำตาล แต่ปฏิกิริยาที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้องแต่มีน้ำตาลเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งอาจแบ่งได้เป็นปฏิกิริยาเมลลาร์ด (caramelization reaction) ซึ่งเกิดขึ้นจากเมื่อวัสดุได้รับความร้อนที่สูงมากเกินไป ในขณะที่ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) จะเกิดขึ้นเมื่อมีส่วนสารประกอบไนโตรเจน เมื่อได้รับความร้อนสูง ผลต่อคุณค่าทางอาหาร พบว่าอาหารส่วนใหญ่จะเกิดการสูญเสียสารอาหารในระหว่างการอบแห้งโดยจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของอาหาร ดังนั้นสัดส่วนของพื้นที่ผิวดต่อปริมาตรจึงมีความสำคัญในการหาการสูญเสียสารอาหาร (นิธิยา, 2544; สมชาติ, 2540; งาม, 2550)

น้ำในอาหาร

น้ำในอาหารนับเป็นสารประกอบหลักที่มีอยู่ในอาหาร โดยเฉพาะอาหารสด เช่น ผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ ไข่ นม น้ำมีอิทธิพลต่อสมบัติ และคุณภาพด้านต่างๆ ของอาหาร ทั้งสมบัติทางกายภาพ (physical properties) ความหนืด (viscosity) สมบัติด้านเนื้อสัมผัส (textural properties) ซึ่งอาหารจะมีน้ำอยู่ระหว่าง 7-95% น้ำที่อยู่ในอาหารมักเรียกว่า ความชื้น โดยมีอยู่ในรูปน้ำอิสระ (free water) และน้ำที่เกาะเกี่ยวกับสารอื่น (bound water)

น้ำอิสระเป็นน้ำที่แทรกอยู่ในช่องว่างของอาหาร เป็นน้ำที่มีสารอื่นๆ ละลายอยู่หรือแขวนลอยอยู่ น้ำชนิดนี้จะอยู่รอบๆ เซลล์หรืออยู่ภายในเซลล์เป็นน้ำส่วนใหญ่ที่พบในอาหารสามารถละลายได้ แต่น้ำส่วนนี้ยังมีคุณสมบัติไม่เหมือนกับน้ำในธรรมชาติอย่างแท้จริง จึงมักเรียกน้ำส่วนนี้ว่า แอคทีฟวอเตอร์ (active water: a_w) ซึ่งหมายถึงน้ำที่ยังคงรักษาคุณสมบัติของน้ำอิสระไว้ได้ น้ำอิสระในอาหารมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสและการเก็บรักษาอาหารอย่างมาก เนื่องจากน้ำมีส่วนก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และทางชีวภาพของอาหาร รวมทั้งจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในเจริญเติบโต และการดำรงชีวิตซึ่งเป็นสาเหตุของการเน่าเสียในอาหาร ดังนั้นการเก็บรักษาอาหารจึงนิยมใช้การระเหยน้ำอิสระออกจากอาหารโดยการอบแห้ง อาหารแต่ละชนิดมีความชื้น หรือปริมาณน้ำอิสระไม่เท่ากัน โดยอาหารที่มีน้ำอิสระมาก (วอเตอร์แอคทีวิตีสูง) จะเน่าเสียง่ายเนื่องจากจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ดี การทราบปริมาณน้ำอิสระในอาหารจึงมีความจำเป็นมากในการที่จะคาดเดาได้ว่าอาหารจะเสียด้วยจุลินทรีย์หรือไม่ และสามารถบอกถึงอายุการเก็บรักษาได้ (ณรงค์, 2538; วิไล, 2547)

การวัดค่าวอเตอร์แอคทีวิตีจะทำโดยการวัดค่าความชื้นของอากาศแวดล้อม ซึ่งสามารถแบ่งวิธีการวัดออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ วิธีแบบสถิต (isopiestic methods) และวิธีแบบพลวัต

(dynamic methods) โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการหาค่าวอเตอร์แอกทีวิตีแบบพลวัต ซึ่งสามารถทำได้โดยการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอาหารในภาชนะปิดด้วยเครื่องมือซึ่งสามารถวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของพื้นที่อากาศว่างที่มีการเคลื่อนที่ภายในภาชนะปิดบรรจุอาหารด้วยเซ็นเซอร์แบบต่างๆ

การวิเคราะห์ความชื้น (moisture content) หรือปริมาณน้ำมีความสำคัญในกระบวนการแปรรูปอาหารหรือวัสดุชีวภาพ และการวิเคราะห์ทางเคมีของอาหาร เช่น อาหารที่มีความชื้นหรือน้ำมากจะเสื่อมเสียอย่างรวดเร็วเนื่องจากความร้อน สำหรับการวิเคราะห์ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสมดุล เพื่อที่จะนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์สมดุลมวล และสมดุลความร้อนในระหว่างการอบแห้ง

1. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (initial moisture content) ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพ ซึ่งโดยทั่วไปจะบอกได้ 2 แบบ คือ เมื่อเทียบกับมวลทั้งหมดของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพ เรียกว่า ความชื้นน้ำหนักเปียก และเมื่อเทียบกับมวลแห้งของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพ เรียกว่า ความชื้นน้ำหนักแห้ง ซึ่งสมการ (1)-(2) แสดงการคำนวณค่าความชื้นทั้งสองมาตรฐาน ซึ่งความชื้นน้ำหนักแห้งนิยมใช้ในเอกสารวิชาการ เนื่องจากน้ำหนักแห้งจะมีค่าคงที่เสมอไม่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาการอบแห้ง ดังนั้นจึงง่ายในการอ้างอิง

ความชื้น (น้ำหนักเปียก)

$$MC_{wh} = \frac{M_w}{M_{w+d}} \quad (1)$$

ความชื้น (น้ำหนักแห้ง)

$$MC_{dh} = \frac{M_w}{M_d} \quad (2)$$

เมื่อ	MC_{wh}	คือ ความชื้นน้ำหนักเปียก (g_{water}/g_{weight})
	MC_{dh}	คือ ความชื้นน้ำหนักแห้ง ($g_{water}/g_{dry\ matter}$)
	M_w	คือ มวลของน้ำในอาหาร (g)
	M_d	คือ มวลของแข็งในอาหาร (g)
	M_{w+d}	คือ มวลทั้งหมดของอาหาร (g)

สำหรับหน่วยของความชื้นนั้นสามารถบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยการคูณด้วย 100 และตัวย่อด้านท้าย คือ %(wb.) หมายถึง เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักเปียก) และ %(db.) หมายถึง

เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักแห้ง) สำหรับการเปลี่ยนความชื้นจากมาตรฐานหนึ่งสู่อีกมาตรฐานหนึ่งสามารถทำได้โดยใช้สมการ (3)-(4)

$$MC_{wh} = \frac{MC_{dh}}{MC_{dh} + 1} \quad (3)$$

$$MC_{dh} = \frac{MC_{wh}}{1 - MC_{dh}} \quad (4)$$

การหาน้ำหนักของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพสุดท้ายเมื่อทราบความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้าย ในกรณีที่ทราบน้ำหนักเริ่มต้นของอาหารที่ต้องการอบแห้ง โดยสามารถหาน้ำหนักสุดท้ายของอาหารได้จากสมการ (5)

$$W_f = W_i \frac{(100 - MC_i)}{(100 - MC_f)} \quad (5)$$

เมื่อ	MC_i	คือ ความชื้นเริ่มต้น (%(wb.))
	MC_f	คือ ความชื้นสุดท้าย (%(wb.))
	W_i	คือ น้ำหนักอาหารเริ่มต้นก่อนการอบแห้ง (g)
	W_f	คือ น้ำหนักอาหารสุดท้ายหลังการอบแห้ง (g)

2. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) สามารถแบ่งวิธีการเข้าสู่สมดุลตามการเคลื่อนที่ของอากาศได้ 2 วิธี ได้แก่ วิธีเชิงสถิต (isopiestic methods) เป็นวิธีการวัดความชื้นสมดุลที่วัสดุเข้าสู่จุดสมดุลกับสภาพแวดล้อม โดยปราศจากการก่อควนด้านพลศาสตร์ของอากาศหรือวัสดุ โดยนิยมนำสารเคมีที่มีความสามารถในการดูดซับความชื้นส่วนเกินมาใช้ ได้แก่ สารละลายเกลืออิ่มตัวหรือสารละลายกรด และวิธีเชิงพลวัต (dynamic methods) เป็นการปล่อยให้อาหารหรือวัสดุทางชีวภาพสัมผัสกับอากาศแวดล้อม โดยทำให้อากาศหรือผลิตภัณฑ์เคลื่อนไหว วิธีนี้อาหารหรือวัสดุทางชีวภาพจะเข้าสู่สมดุลกับสิ่งแวดล้อมอย่างรวดเร็ว จึงเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ความชื้นสูง

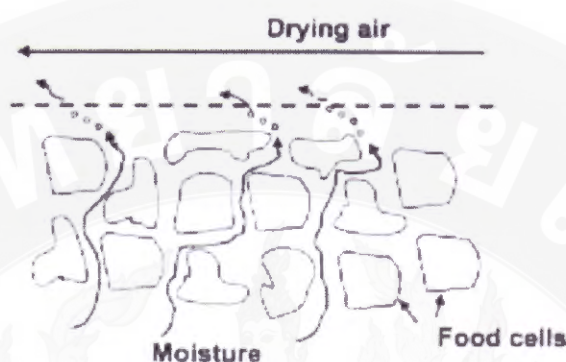
การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (open sun drying) เป็นวิธีหนึ่งของการถนอมอาหารแบบดั้งเดิมที่นิยมใช้กันในระดับครัวเรือนมาช้านาน เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความสะดวก มีต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบอื่นๆ และมีอุปกรณ์ไม่ยุ่งยากซับซ้อน โดยหลักการอบแห้งด้วยวิธีดังกล่าว คือการไล่ความชื้นออกจากวัสดุโดยการถ่ายเทความร้อนให้แก่วัสดุด้วยวิธีการพาด้วยอากาศ (convection) หรือการแผ่รังสี (radiation) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุให้ความชื้นกลายเป็นไอระเหยออกไป โดยเริ่มต้นที่พื้นผิวของวัสดุอบแห้งจนเกิดการแพร่ความชื้นภายในเนื้อวัสดุมาสู่พื้นผิว และจะถูกไล่ออกไปด้วยวิธีการพาด้วยอากาศต่อไป ให้ความชื้นโดยรวมของวัสดุลดลง โดยที่ความสามารถของอากาศในการทำให้เกิดการระเหยจากวัสดุ (drying potential) จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ รวมถึงความเร็วลมที่นำพาความร้อน ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะใช้เวลานาน อีกทั้งยังทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพไม่แน่นอน การควบคุมคุณภาพทำได้ยาก เนื่องจากคุณภาพของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับลักษณะอากาศและช่วงเวลาที่ใช้ในการตากแดด รวมทั้งอาจเกิดการปนเปื้อนฝุ่นละอองและอาจมีแมลงซึ่งเป็นสาเหตุของการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งอาจส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งไม่เป็นที่ยอมรับในด้านคุณภาพได้

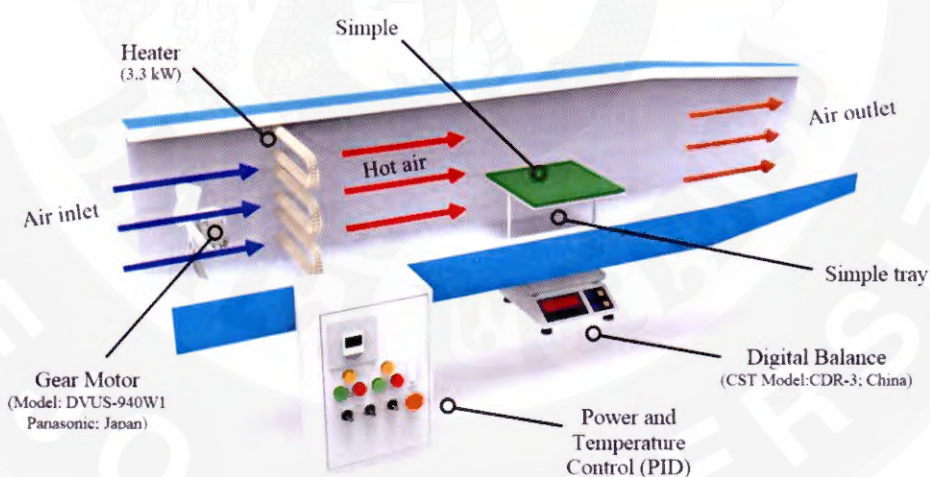
การอบแห้งด้วยลมร้อน

การอบแห้งด้วยลมร้อน (hot air drying) เป็นวิธีการอบแห้งที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากมีความสะดวกต่อการปฏิบัติงานและเป็นกระบวนการที่ควบคุมได้ง่าย และไม่ซับซ้อนรวมทั้งยังมีต้นทุนในการดำเนินงานที่ต่ำ ภาพ 3 แสดงกลไกการถ่ายเทมวลหรือความชื้นของการอบแห้งเมื่ออากาศหรือลมร้อนพัดผ่านหน้าอาหารที่เปียก ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปสู่ผิวของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพ และน้ำหรือความชื้นจะเกิดการระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอ (latent heat of vaporization) ส่วนความชื้นที่อยู่ภายในจะค่อยๆ แพร่กระจายมายังผิว โดยอัตราการแพร่กระจายความชื้นจะขึ้นอยู่กับศักยภาพของการถ่ายเทความร้อน และความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยไอน้ำจะแพร่ผ่านฟิล์มอากาศและถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่ สภาวะดังกล่าวจะทำให้ความดันไอที่ผิวหน้าของอาหารต่ำกว่าความดันไอด้านในอาหาร เป็นผลให้เกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำ ชั้นด้านในของอาหารจะมีความดันไอสองและค่อยๆ ลดต่ำลงเมื่อชั้นอาหารเข้าใกล้อากาศแห้ง ความแตกต่างนี้ทำให้เกิดแรงดันเพื่อไล่ไอน้ำออกจากอาหาร แต่อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยลมร้อน ต้องมีตัวกลางทางความร้อนเพื่อถ่ายเทพลังงานไปสู่ความชื้นภายในอาหาร ทำให้ต้องใช้เวลานานในการระเหยความชื้นออกจากชั้นในโครงสร้างเซลล์ยาวนาน จึงส่งผลต่อคุณภาพของ

อาหารในด้านต่าง ๆ เช่น อาหารเกิดการหดตัว การเกิดเปลือกแข็ง การสูญเสียคุณค่าทางอาหาร สารระเหย การเปลี่ยนแปลงสี และการเกิดสีน้ำตาล เป็นต้น (วิไล, 2547)



ภาพ 3 การถ่ายเทความชื้นออกจากอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพในระหว่างการอบแห้ง
ที่มา: วิไล (2547)



ภาพ 4 แผนภาพของเครื่องอบแห้งแบบถาด
ที่มา: ปองพล และ ฤทธิชัย (2557)

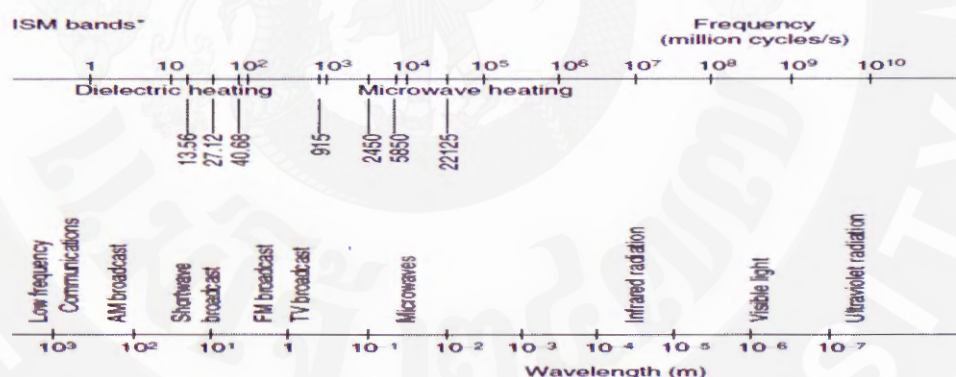
เครื่องอบแห้งที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมีฉนวนไว้เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน และทำให้สามารถนำอากาศมาหมุนเวียนใช้ใหม่เพื่อประหยัดพลังงาน โดยเครื่องอบแห้ง

ในปัจจุบันมีหลายชนิด ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงเครื่องอบแห้งแบบถาด (tray dryer) ภาพ 4 แสดงแผนภาพของเครื่องอบแห้งแบบถาด

เครื่องอบแห้งแบบถาดประกอบด้วยถาดเดี่ยวๆ ที่มีช่องตาข่ายอยู่ด้านล่างและบุด้วยฉนวน โดยอากาศร้อนจะไหลเวียนอยู่ในตู้ที่ความเร็วลม 0.5-5 m/s มีระบบท่อหรือแบฟเฟิล เพื่อนำลมร้อนขึ้นไปด้านบนผ่านแต่ละถาดเพื่อให้ลมร้อนกระจายอย่างสม่ำเสมอ อาจมีการติดตั้งเครื่องทำความร้อนเพิ่มด้านบนหรือด้านข้างของถาดเพื่อเพิ่มอัตราการอบแห้ง เครื่องอบแห้งชนิดนี้นิยมใช้ในการผลิตอาหารในปริมาณต่ำ ใช้เงินลงทุนและค่าดูแลรักษาต่ำ

การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟจัดเป็นนวัตกรรมการสร้างความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถสร้างความร้อนภายในตัวผลผลิตทางการเกษตรได้ดี และไม่มีผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลาง ดังนั้นการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟในกระบวนการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร จึงเป็นแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้ง (ฤทธิชัย, 2553)



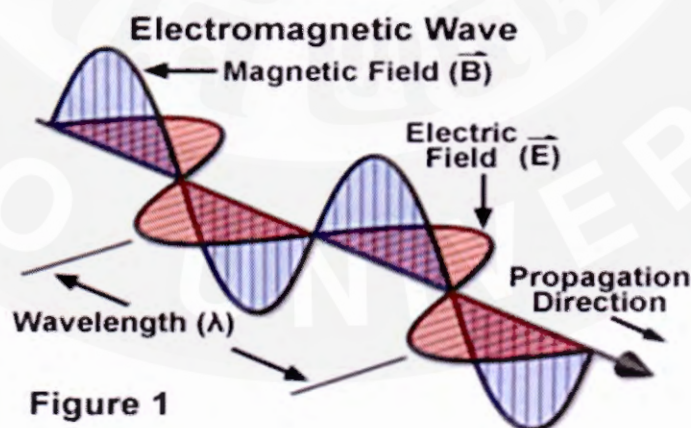
ภาพ 5 แถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา: ผดุงศักดิ์ (2551)

เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (microwave drying technology) เป็นนวัตกรรมการสร้างความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง คลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีลักษณะเฉพาะทั้งความยาวคลื่น (wavelength: λ) และความถี่ (frequency: f) ดังแสดงในภาพ 5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหนึ่งรอบคลื่นจะมีการผสมผสานกันของทั้ง

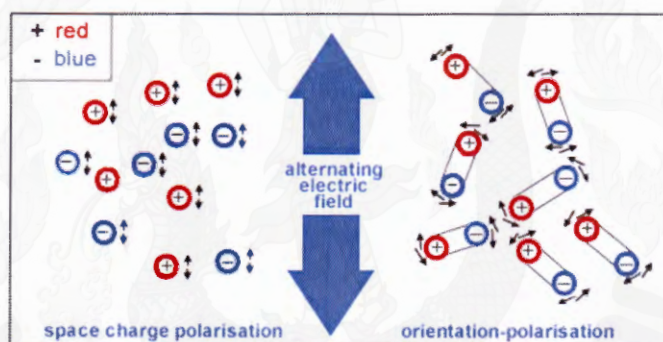
สนามไฟฟ้า (electric field) และสนามแม่เหล็ก (magnetic field) คลื่นไมโครเวฟใช้ย่านความถี่ตั้งแต่ 300 MHz ถึง 300 GHz อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 1 mm ถึง 1 m จากข้อตกลงของคณะกรรมการระดับนานาชาติว่าด้วยการจัดสรรคลื่นความถี่ด้วยวัตถุประสงค์ทางด้านอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และทางการแพทย์ (Industrial Scientific and Medical: ISM) ในทางปฏิบัติของการประยุกต์ใช้คลื่นเพื่อสร้างความร้อน เช่น ในกระบวนการอบแห้งซึ่งจะสามารถกระทำได้ที่ความถี่เท่ากับ 13.56, 27.12, 40.68, 915 และ 2,450 MHz

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงย่านความถี่ไมโครเวฟไม่ใช่พลังงานความร้อนแต่คลื่นเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นความร้อนได้เมื่อเกิดอันตรกิริยากับวัสดุ (lossy material) เมื่อพิจารณาประเด็นในภาพ 6 จะเห็นว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ คลื่นซึ่งมีพลังงานและแอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง ยกตัวอย่างเช่น เมื่อทำการพิจารณาแยกส่วนของสนามไฟฟ้า (E) จะพบว่าบางจุดบนคลื่นมีค่าเป็นศูนย์จากนั้นจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดและสลายลดลงกลับมาที่ศูนย์ และเริ่มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดอีกครั้งในทิศทางของขั้วตรงข้ามก่อนสลายกลับมาที่ศูนย์อีกครั้งโดยสิ่งเดียวที่เกิดขึ้นนี้ก็เช่นเดียวกับกรณีของสนามแม่เหล็ก (B) นอกจากนี้ค่าแอมพลิจูดตลอดแกน X ของคลื่นแทนกำลังของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กซึ่งวัดในหน่วยของโวลต์หรือแอมแปร์ต่อหน่วยระยะทาง ตามลำดับ และการเปลี่ยนแปลงแบบสลับขั้วไปมาและลดลงจนกระทั่งมีค่าเป็นศูนย์เป็นสาเหตุให้เกิดแรงเค้นกระทำต่อไอออน อะตอมและโมเลกุล ซึ่งสามารถเปลี่ยนไปเป็นความร้อนในที่สุด โดยหากกำลังของสนามมีค่ามากจะยิ่งส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงมากขึ้นตามไปด้วย (ผดุงศักดิ์, 2551)



ภาพ 6 ไดอะแกรมแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
ที่มา: ผดุงศักดิ์ (2551)

เมื่อคลื่นไมโครเวฟถูกดูดซับเข้าสู่อาหารจะเกิดความร้อน 2 แบบ ประกอบไปด้วย กลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออน (ionic conduction) และกลไกขบวนการหมุนของทั้งสองขั้ว (dipolar rotation) ภาพ 7 แสดงกลไกการเหนี่ยวนำเชิงประจุไอออนภายใต้สนามไฟฟ้า โดยผลจากการเหนี่ยวนำจะทำให้ประจุไอออนขั้วบวกกับขั้วลบเกิดการสั่นและการหมุน เกิดการเสียดสีกันระหว่างโมเลกุลจนเกิดเป็นพลังงานความร้อน การเกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟในผลผลิตทางการเกษตรสามารถอธิบายในลักษณะของการที่คลื่นไมโครเวฟเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของน้ำภายในวัสดุทางการเกษตรเกิดการหมุนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขั้วไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว ผลของการหมุนนี้ทำให้เกิดการเสียดสีของโมเลกุลของน้ำภายในวัสดุ ก่อให้เกิดความร้อนในผลผลิตทางการเกษตรได้อย่างรวดเร็ว (Assawarachan and Noomhorm, 2008)



ภาพ 7 กลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออนและกลไกขบวนการหมุนของทั้งสองขั้ว

ที่มา: PÜSCHNER Microwave Power System (no date)

การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (microwave drying) เป็นนวัตกรรมการสร้างความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถสร้างความร้อนทั้งบริเวณผิวนอกและภายในโครงสร้างเซลล์ของผลิตภัณฑ์จึงช่วยเร่งอัตราการอบแห้งได้เป็นอย่างดี โดยไม่มีผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อนในระหว่างการอบแห้ง การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของการอบแห้ง แต่อย่างไรก็ตามการอบแห้งที่มีอัตราการถ่ายเทมวลที่เร็วเกินไป บางครั้งอาจเกิดผลเสียคือเนื้อสัมผัสได้ในบางกรณี นอกจากนี้มักพบรอยไหม้ในบางตำแหน่งของผลิตภัณฑ์เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในของอาหารหรือวัสดุชีวภาพในระหว่างการอบแห้ง และบริเวณผิววัสดุจะเกิดการ

ไหม้เนื่องจากได้รับความร้อนมากเกินไป และยังมีข้อจำกัดเนื่องจากมีต้นทุนในการผลิตสูง (รุ่งนภา , 2549; น้ำฝน และคณะ, 2555)

การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งการอบแห้งแต่ละวิธีมีข้อได้เปรียบ และข้อจำกัดในลักษณะต่างกันไป โดยตาราง 2 จะเปรียบเทียบข้อได้เปรียบและข้อจำกัดในทางด้านต่างๆ ของวิธีการอบแห้งที่กล่าวมา

ตาราง 2 การเปรียบเทียบข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ

วิธีการอบแห้ง	ข้อได้เปรียบ	ข้อจำกัด
การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (open sun drying)	มีขั้นตอนการใช้งานง่าย มีอุปกรณ์ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และมีต้นทุนต่ำ	ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนาน คุณภาพไม้แน่นอน การควบคุมคุณภาพทำได้ยาก และอาจเกิดการปนเปื้อนฝุ่นละอองและแมลง
การอบแห้งด้วยลมร้อน (hot air drying)	เป็นวิธีที่ง่ายต่อการควบคุมกระบวนการ และมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการอบแห้งต่ำ	ใช้เวลาในการอบแห้งนาน อาจทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการสูญเสียคุณภาพได้
การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ (microwave drying)	มีอัตราการอบแห้งที่เร็ว ใช้เวลาในการอบแห้งสั้น และช่วยลดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ได้	มีความยุ่งยากในการควบคุมอุณหภูมิ การกระจายความร้อน เนื้ออาหารไม่สม่ำเสมอทำให้อาหารเกิดการไหม้เป็นจุดๆ ไม่เหมาะกับอาหารที่มีความหนามากเนื่องจากข้อจำกัดในการทะลุทะลวงของคลื่นมีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการลงทุนการใช้งานของเครื่องมือค่อนข้างสูง และสิ้นเปลืองพลังงาน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเป็นการจำลองสภาวะการอบแห้งและศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ของกระบวนการ ตลอดจนการทดลองและเปรียบเทียบเงื่อนไขของวิธีการอบแห้ง เพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมแทนการทดลองจริง เนื่องจากมีความสะดวกและช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดลอง ทั้งนี้การจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งจะช่วยให้ได้ข้อมูลจำนวนมาก ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการอบแห้งอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพได้อย่างรวดเร็ว (สักรกมน, 2555) โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ แบบจำลองทางทฤษฎี (theoretical model) แบบจำลองกึ่งทฤษฎี (semi-theoretical model) และแบบจำลองเอมพิริคัล (empirical model)

รายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งอาหารหรือวัสดุชีวภาพจำพวกผักและผลไม้ นิยมใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งในรูปของแบบจำลองเอมพิริคัล ซึ่งเป็นแบบจำลองอย่างง่าย สามารถใช้ทำนายจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงความชื้นของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพโดยอาศัยการปรับค่าคงที่ของแบบจำลองหรือการปรับเส้นโค้ง (curve fitting) ให้ผลการจำลองสอดคล้องกับผลการทดลอง เช่น แบบจำลองของ Newton, Henderson and Pabis, Page, Modified Page, Wang and Singh, Midilli et al. และ Logarithmic ตาราง 3 แสดงรูปแบบความสัมพันธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบต่างๆ (Alibas, 2007; Wang et al., 2007; Ozkan et al., 2007; สุเนตร และ ฤทธิชัย, 2554; Doymaz, 2006)

ตาราง 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งในรูปของแบบจำลองเอมพิริคัล

model name	model equation	reference
Newton	$MR = \exp(-kt)$	McMinn (2006)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Pongtong et al. (2011)
Modified Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$	Evin (2012)
Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Assawarachan and Noomhorm (2011)
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Assawarachan and Noomhorm (2011)
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Evin (2012)
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Evin (2012)

นอกจากนี้แบบจำลองเอมพิริคัลแล้วยังมีแบบจำลองที่นิยมใช้ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้ง ได้แก่ แบบจำลองกึ่งทฤษฎี ซึ่งมีความสัมพันธ์อยู่ในรูปกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) ในสภาวะการแพร่ความชื้นที่ไม่คงที่สามารถใช้ในการหาอัตราส่วนความชื้นดังแสดงในสมการ (6) สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นแผ่นระนาบที่มีความยาวมาก (infinite slab) และมีความหนาครึ่งหนึ่งของตัวอย่างอาหารหรือวัสดุชีวภาพ เช่น กล้วยฉาบสาหร่ายทะเลแผ่น (สุเนตร และ ฤทธิชัย, 2554; Wang et al., 2007)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D_{eff} \cdot t}{4L^2}\right) \quad (6)$$

เมื่อ	MR	คือ อัตราส่วนความชื้น
	D_{eff}	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m^2/s)
	L	คือ ความหนาครึ่งหนึ่งของตัวอย่าง (m)
	t	คือ เวลาในการอบแห้ง (s)

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสามารถคำนวณจากค่าความชัน (slope) ของกราฟเส้นตรงซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ และเวลาในการอบแห้ง (t) ดังแสดงในสมการ (7)

$$slope = -\frac{\pi^2 \cdot D_{eff}}{4L^2} \quad (7)$$

การวิเคราะห์พลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ (activation energy for diffusion: E_a) ด้วยสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ดังแสดงในสมการ (8) สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน และสมการ (9) สำหรับการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Pongtong et al., 2011; Özbek and Dadali, 2007; สุเนตร และ ฤทธิชัย, 2554)

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (8)$$

เมื่อ	D_0	คือ ปัจจัยก่อนเลขชี้กำลัง ($1/\min$)
	E_a	คือ พลังงานกระตุ้นของการอบแห้งด้วยลมร้อน (kJ/mol)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 0.008314 (kJ/mol K)

T คือ อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง (K)

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a \cdot m}{P}\right) \quad (9)$$

เมื่อ E_a คือ พลังงานกระตุ้นของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (W/g)

k คือ ค่าคงที่การอบแห้ง (1/min)

k_0 คือ แฟกเตอร์ความถี่ (1/min)

m คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (g)

P คือ พลังงานของคลื่นไมโครเวฟ (W)

ทั้งนี้ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน สามารถคำนวณจากค่าความชัน (slope) ของกราฟเส้นตรงที่พล็อตระหว่าง $\ln(D_{eff})$ และ $(1/T)$ ดังแสดงในสมการ (10) ในขณะที่ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ คำนวณจากค่าความชัน (slope) ของกราฟเส้นตรงที่พล็อตระหว่าง $\ln(k)$ และน้ำหนักของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพต่อพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ (m/P) ดังแสดงในสมการ (11)

$$slope = -\frac{E_a}{R} \quad (10)$$

$$slope = -E_a \quad (11)$$

การวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งด้วยวิธีทางสถิติ มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเข้ากันได้ของแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งจากรายงานวิจัยหลายๆ เรื่อง พบว่าพารามิเตอร์ที่นิยมใช้เพื่อประเมินความแม่นยำและความเหมาะสมของแบบจำลองในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้ง ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination: R^2) ค่าการลดลงไคกำลังสอง (chi square: χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean square error: RMSE) (Lin et al., 1998; Waewsak et al., 2006) โดยที่ค่า R^2 เป็นค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่สำคัญในการบ่งบอกคุณภาพของรูปแบบสมการในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การ

อบแห้ง แบบจำลองที่ยังมีค่าเข้าใกล้ 1.0 แสดงว่ามีความแม่นยำมาก ในขณะที่ค่า χ^2 และค่า $RMSE$ เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าของแบบจำลอง ดังนั้นแบบจำลองที่มีความแม่นยำและเหมาะสมในการทำนายจะให้ค่า R^2 สูง แต่ค่า χ^2 และค่า $RMSE$ มีค่าต่ำ โดยสมการ (12)-(14) แสดงการคำนวณหาพารามิเตอร์ดังกล่าว

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n MR_{i,exp} \times MR_{i,pre}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n MR_{i,exp}^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n MR_{i,pre}^2 \right)}} \right]^2 \quad (12)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{i,exp} - MR_{i,pre})^2}{N - n} \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{i,exp} - MR_{i,pre})^2}{N}} \quad (14)$$

เมื่อ	R^2	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
	χ^2	คือ	ค่าการลดลงไคกำลังสอง
	$RMSE$	คือ	ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย
	$MR_{i,exp}$	คือ	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง
	$MR_{i,pre}$	คือ	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง
	N	คือ	จำนวนค่าสังเกต
	n	คือ	จำนวนค่าคงที่ในแบบจำลอง

การวิเคราะห์สี

โดยทั่วไปการที่ผู้บริโภคจะยอมรับผลิตภัณฑ์อาหารหนึ่งๆ จะขึ้นอยู่กับปัจจัยคุณภาพที่สำคัญ คือ สีและลักษณะปรากฏ (color and appearance) กลิ่นรส (flavor) และลักษณะเนื้อสัมผัส (texture) สีและลักษณะปรากฏเป็นปัจจัยคุณภาพที่สำคัญมาก โดยเฉพาะกับการตัดสินใจซื้อ

ผลิตภัณฑ์ครั้งแรก เนื่องจากโดยปกติผู้บริโภคไม่มีโอกาสในการทดลองรับประทานผลิตภัณฑ์ ดังนั้นปัจจัยในการตัดสินใจซื้อส่วนใหญ่จะอยู่ที่คุณภาพด้านสีและลักษณะปรากฏเท่านั้น

การตรวจสอบสีด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์วัดสีที่นิยมใช้ใน ปัจจุบันซึ่งวัดสีของวัตถุโดยการวัดปริมาณแสงที่สะท้อน หรือแสงที่ถูกดูดกลืน หรือแสงที่ผ่านลอด มาจากวัตถุที่ความยาวคลื่นหนึ่งๆ ในช่วงที่ตามองเห็น (380-770 nm) ใช้ความสัมพันธ์ของปริมาณ สารให้สีกับปริมาณแสงที่บันทึกได้ นำมาคำนวณหาปริมาณสารที่ให้สีอยู่ในวัตถุนั้น การตรวจสอบ สีด้วยระบบ CIE เป็นวิธีการวัดสีที่กำหนดขึ้น โดยองค์กรที่มีบทบาทสำคัญในการกำหนดมาตรฐาน ด้านสีคือ Commission International de l'Eclairage (CIE) ซึ่งเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างในวงการ วิชาการและการวิจัย ซึ่งระบบ CIELAB เป็นกระบวนการบรรยายสีแบบ 3 มิติ คือ L^* หมายถึงค่า ความสว่าง (+) /ความมืด (-) ค่า a^* หมายถึง ความเป็นสีแดง (+) /ความเป็นสีเขียว (-) และค่า b^* หมายถึงความเป็นสีเหลือง (+) /ความเป็นสีน้ำเงิน (-) ในระบบนี้สามารถวัดค่าสีออกมาเป็นตัวเลข ถือเป็นการวัดค่าโดยใช้เครื่องมือ เข้าใจได้ง่ายและค่าสีมีความสม่ำเสมอมากกว่าค่าสีในระบบ Hunter Lab

ข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าสีระบบต่างๆ นั้นคือ ค่าสี แต่โดยทั่วไปในการใช้งาน ผู้ผลิตไม่ได้ต้องการทราบค่าสีของผลิตภัณฑ์เท่านั้น แต่ต้องการทราบว่าสีของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตใน รุ่นหนึ่งๆ นั้น ตรงตามที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่ และผู้ผลิตควรจะยอมรับผลิตภัณฑ์ในรุ่นนั้น หรือไม่ ดังนั้นผู้ผลิตจึงต้องการทราบ ค่าความแตกต่างสีโดยรวม (total color difference: ΔE) ระหว่างผลิตภัณฑ์และมาตรฐาน ต้องการทราบค่าความแตกต่างของสีที่สามารถนำไปกำหนด ค่า การยอมรับ (tolerance) เพื่อกำหนดขอบเขตในการยอมรับ/ปฏิเสธผลิตภัณฑ์หนึ่งๆนั่นเอง โดยการ วิเคราะห์ค่าความแตกต่างสีโดยรวม สามารถหาได้จากสมการ (15) (Vega-Gálvez et al., 2009; Therdthai and Zhou, 2009)

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (15)$$

เมื่อ L^* , a^* และ b^* คือค่าพารามิเตอร์สีของสำหรับตัวอย่างหลังการอบแห้ง และ L_0^* , a_0^* และ b_0^* คือค่าพารามิเตอร์สีของสำหรับตัวอย่างสด

การตรวจสอบสีด้วยการใช้ระบบมุนเซล (munsell color system) ระบบสีของมุนเซลเป็นระบบที่มีชื่อเสียงและได้รับนิยมสูง มีการจัดระเบียบตัวอย่างสีที่ทำไว้บนกระดาดชั้นเล็กๆ ตามระบบตัวเลขที่มุนเซลคิดขึ้นมาโดยขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 ตัว คือ

1. ค่าความสด (chroma) เป็นค่าที่บอกถึงความเข้มหรือความจางของสี (saturation) ในสัดส่วนของสี (hue) ที่มีอยู่ในสีเทา วัดค่าเปอร์เซ็นต์จาก 0% (สีเทา) จนถึง 100% ถ้าเราเติมสีเทาลงไปในสีใดๆ สีนั้นจะอึมทึมน้อยลงจนในที่สุดกลายเป็นสีเทา สมการแสดงค่าที่แสดงความบริสุทธิ์ของสี คือ

$$C^* = (a^2 + b^2)^{1/2} \quad (16)$$

2. ค่าสีตัน (hue angle) เป็นสีที่สะท้อนมาจากสีของวัตถุ ซึ่งแตกต่างกันตามความยาวคลื่นแสงที่กระทบวัตถุและสะท้อนกลับมายังตาเรา hue ในมุมเซล จึงเป็นชื่อเรียกชนิดของสี เช่น สีแดง สีเขียว เป็นต้น สมการแสดงค่ามุมของสีหลัก คือ

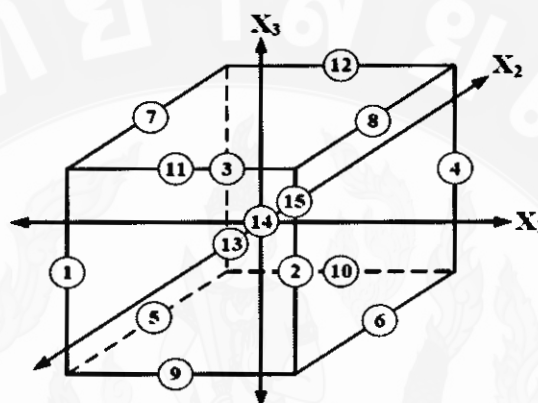
$$h^\circ = \tan^{-1}(b/a) \quad (17)$$

การหาสถานะที่เหมาะสมของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อน โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

ในทางปฏิบัติทางอุตสาหกรรม การทดลองที่ได้รับการออกแบบมาจะมีความทำงานอย่างเป็นระบบในการสืบค้นในตัวแปรในกระบวนการ (process variable) หรือตัวแปรของผลิตภัณฑ์ (product variable) หลังจากที่ทำการศึกษาเงื่อนไขของกระบวนการ หรือองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ จึงจะสามารถทำการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิต ความน่าเชื่อถือ คุณภาพ และ ประสิทธิภาพ เนื่องด้วยทรัพยากรมีจำนวนจำกัด ดังนั้น การทดลองแต่ละครั้งจะต้องให้สาระข้อมูลที่สำคัญที่สุด ซึ่งการทดลองที่มีการวางแผนที่ดีจะทำให้ได้สาระข้อมูลที่สำคัญ และมีคุณภาพมากกว่าการทดลองที่เกิดขึ้นจากงานที่ไม่ได้รับการวางแผนมาก่อน และโดยเฉพาะการทดลองตามแผนที่วางไว้จะสามารถวิเคราะห์เกี่ยวกับอิทธิพลของปัจจัยที่ต้องการศึกษาได้ดีกว่าด้วย การออกแบบการทดลองสามารถแบ่งออกได้หลายวิธี ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design: BBD)

การออกแบบการทดลองแบบ BBD เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขกระบวนการผลิตและเงื่อนไขในการผลิตที่เหมาะสม ซึ่งการออกแบบการทดลองแบบ BBD จะมีจำนวนครั้งในการทดลองที่น้อยรวมถึงมีต้นทุนที่ถูกกว่าเมื่อเทียบกับการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite: CCD) (ภณิกษา และคณะ, 2555; สมเกียรติ และ

ภูมินทร์, 2554; Pérez-Francisco et al., 2008) ภาพ 8 แสดงการออกแบบการทดลองแบบ BBD สำหรับ 3 ปัจจัย โดยอาศัยการทำการทดลองทั้งสิ้นจำนวน 15 การทดลอง โดยเป็นการทดลองที่ตำแหน่งกึ่งกลางซึ่งทำซ้ำจำนวน 3 การทดลอง ผลการทดลองที่ตำแหน่งกึ่งกลางจะถูกนำไปวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาความสมรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



ภาพ 8 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

ที่มา: สมเกียรติ และ ภูมินทร์ (2554)

การหาสถานะที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตาโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology: RSM) เป็นการรวบรวมเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์ และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลอง รวมทั้งช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบสนองที่สนใจจะขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนอง และนอกจากนี้การวิเคราะห์โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองยังสามารถทำให้ได้สมการทำนายกระบวนการอบแห้ง เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ และปริมาณสารสกัดต่างๆ ของสาหร่ายเตาอบแห้ง

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sripinyowanichi et al. (2012) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณความชื้นสุดท้าย ต่ออายุการเก็บรักษา คุณภาพและการดูดซับไอโซโทม ของการอบแห้งกามะพร้าวด้วยลมร้อน โดยความชื้นสุดท้าย มีค่าเท่ากับ 3, 10, 15, 20 และ 25 %(db.) ซึ่งเก็บไว้ที่สภาวะอุณหภูมิ 35°C ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (RH) 60-75% เป็นเวลา 140 days จากการศึกษาพบว่าที่ปริมาณ

ความชื้นสุดท้าย 3 % (db.) ตัวอย่างกากมะพร้าวมีคุณภาพดีที่สุดในด้านความขาว ปริมาณน้ำมัน และค่าเปอร์ออกไซด์ ไม่พบจุลินทรีย์ ยีสต์ และรา ในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 140 days ส่วนที่ระดับความชื้นอื่นๆ มีแนวโน้มลดลงของค่าความเป็นสีขาว และมีค่าเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความชื้น 20 และ 25 % (db.) ในขณะที่ปริมาณความชื้นสุดท้าย 15 % (db.) พบยีสต์และราในปริมาณที่ไม่เกินกำหนด แต่ไม่พบจุลินทรีย์ ทั้งนี้การอบแห้งที่ปริมาณความชื้นดังกล่าวกากมะพร้าวมีอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 63 days

Evin (2012) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของจลนพลศาสตร์การอบแห้งแบบชั้นบางของกันคิเลีย (*Gundelia tournefortii* L.) ระหว่างวิธีการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 90-800 W และการอบแห้งด้วยการตากแดดที่ระดับรังสีแสงอาทิตย์ 350-1100 W/m² พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli มีความเหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมรอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟได้ดีที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มากสุด มีค่าเท่ากับ 0.996 และมีค่าไคกำลังสอง (χ^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าความคลาดเคลื่อนเอนเอียงเฉลี่ย (MBE) น้อยที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.82×10^{-4} , 12×10^{-3} และ 1.4×10^{-4} ตามลำดับ ค่าคงที่การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟมีค่าอยู่ในช่วง 0.0098-0.2943 1/min และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น 5.5×10^{-8} - 3.5×10^{-7} m²/s แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Logarithmic สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งกันคิเลียด้วยการตากแดดได้ดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเท่ากับ 2.48×10^{-8} m²/s

Dadali et al. (2007) ศึกษาผลกระทบของระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟและปริมาณน้ำหนักรับของกระเจี๊ยบเขียวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความชื้น อัตราการอบแห้ง และเวลาที่ใช้ในการอบแห้งระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงานระหว่าง 180-900 W และปริมาณน้ำหนักรับของกระเจี๊ยบเขียว 25-100 g เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่เหมาะสม โดยใช้แบบจำลองเอมพิริคัลของ Lewis, Page, Henderson and Pabis และ Logarithmic เพื่อเปรียบเทียบหาความเหมาะสมในการอบแห้งกระเจี๊ยบเขียว ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองของ Page มีความแม่นยำในการทำนายมากที่สุด

Ozkan et al. (2007) ศึกษาการอบแห้งใบปวยเล้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ทำการอบแห้งใบปวยเล้งที่น้ำหนัก 50 g โดยมีความชื้นเริ่มต้น 9.01 kg/kg_{dry matter} อบแห้งจนเหลือความชื้น 0.1 kg/kg_{dry matter} โดยใช้พลังงานของคลื่นไมโครเวฟในช่วง 90-1000 W พบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ระหว่าง 290-4005 s แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งของ Page สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบปวยเล้งแบบชั้นบางได้เหมาะสมที่สุด ที่ระดับพลังงาน 750 W

สามารถรักษาคุณภาพด้านสีและวิตามินซีได้ดีที่สุด ซึ่งใช้เวลาในการอบแห้ง 350 s และใช้พลังงานในการอบแห้งต่ำที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.12 kW* hr

Harbourn et al. (2009) ศึกษาผลกระทบของการอบแห้งและสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมต่อการสลายตัวของสารฟีนอลิกของชาสมุนไพรจาก meadowsweet และ willow พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 30°C จะช่วยรักษาปริมาณสารฟีนอลิกได้ดีกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C และตรวจพบปริมาณสารเคอซีทินทั้งหมด (total quercetin) ที่ใกล้เคียงการอบแห้งแบบระเหิดและไม่มี ความแตกต่างเชิงสถิติ ที่มีต้นทุนการอบแห้งสูง

Jing et al. (2010) เปรียบเทียบวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ ในการอบแห้งมันฝรั่งหวาน (sweet potatoes) ที่เตรียมด้วยวิธีการลวกด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 min ด้วยวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ และการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เพื่อศึกษาอัตราการคงอยู่ของสารประกอบฟีนอลิก แคโรทีนอยด์ และกรดแอสคอร์บิก ผลการศึกษาพบว่าวิธีการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟมีอัตราการคงอยู่ของสารประกอบฟีนอลิก แคโรทีนอยด์ และกรดแอสคอร์บิก ได้เทียบเท่าวิธีการอบแห้งการอบแห้งแบบระเหิด แต่ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าถึง 40-50 เท่า ในขณะที่การอบแห้งด้วยลมร้อนจะใช้เวลาานาน และมีอัตราการคงอยู่ของสารอนุมูลอิสระที่มาก

Hossain et al. (2010) ศึกษาผลกระทบของวิธีอบแห้งระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งแบบระเหิด และการอบแห้งระบบสุญญากาศ ของพืชสมุนไพรในวงศ์ *Lamiaceae* (วงศ์กะเพรา หรือวงศ์มินต์) จำนวน 6 ชนิด ได้แก่ โรสแมรี่ (rosemary) โอริกาโน (oregano) เสจ (sage) ใบโหระพา (basil) มาร์จอรัม (marjoram) และไทม์ (thyme) เพื่อเปรียบเทียบปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่คงเหลือในผลิตภัณฑ์อบแห้งในแต่ละวิธี พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนจะมีอัตราการสูญเสียสารต้านอนุมูลอิสระในระหว่างการอบแห้งมากที่สุด แต่ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งระบบสุญญากาศ และการอบแห้งแบบระเหิดจะมีปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระคงเหลือในปริมาณที่มากในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน แต่หากประเมินต้นทุนการอบแห้งค่อนน้ำหนักของผลิตภัณฑ์อบแห้ง พบว่าการอบแห้งระบบสุญญากาศเป็นวิธีการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูง ในการรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ และมีข้อได้เปรียบในด้านเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

Assawarachan et al. (2013) ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นไมโครเวฟต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงสีในระบบ CIELAB และอัตราการสูญเสียของสารประกอบฟีนอลิก ผลการศึกษาพบว่าที่ระดับความเข้มข้นไมโครเวฟที่สูงมากเกินไปจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสีและอัตราการสูญเสียของสารประกอบฟีนอลิกมากเนื่องจากที่ระดับความเข้มข้นไมโครเวฟสูง จะมีอุณหภูมิสะสมในระหว่างการอบแห้งที่สูงมาก ในทางตรงข้ามที่ระดับความเข้มข้นไมโครเวฟต่ำ

จะใช้เวลาในอบแห้งที่ยาวนานกว่าส่งผลให้สาหร่ายเตาได้รับความร้อนเป็นเวลานาน และมีความร้อนสะสมในระบบมาก ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีและอัตราการสูญเสียน้ำของสารประกอบฟีนอลิกมากขึ้น โดยผลการวิจัยนี้พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของคลื่นไมโครเวฟ 1.55 W/g มีความเหมาะสมมากที่สุด

ธิดารัตน์ และ ศศิธร (2553) ศึกษาผลของวิธีการทำแห้งต่อปริมาณ 6-gingerol สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสมบัติการต้านออกซิเดชันของขิง (*Zingiber officinale*) โดยทำการอบแห้งขิงด้วยวิธีลมร้อน และการอบแห้งด้วยวิธีการแช่เยือกแข็ง ตรวจสอบ 6-gingerol ด้วยวิธี high performance thin layer chromatography จากผลการทดลองพบว่าขิงที่ผ่านการทำแห้งทั้งสองวิธีมีปริมาณ 6-gingerol ไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) โดยขิงที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีลมร้อนมีปริมาณ 6-gingerol เท่ากับ 18.41 ± 0.05 mg/g_{dry matter} ในขณะที่ขิงที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็งมีปริมาณเท่ากับ 18.10 ± 0.05 mg/g_{dry matter} อย่างไรก็ตามขิงที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีลมร้อนวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถต้านออกซิเดชันสูงกว่าขิงที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง 28.6 และ 23.0% ตามลำดับ

ปองพล และคณะ (2556) ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งขมิ้นชันด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองทางสถิติ ทั้งนี้ปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วยระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชันที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 164, 465 และ 752 W ความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิก ได้แก่ 3, 5 และ 7% และเวลาที่ใช้แช่ขมิ้นชันในกรดแอสคอร์บิก คือ 30, 60 และ 90 s โดยการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนองของบ็อกซ์-เบห์นเคน (BBD) ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งขมิ้นชัน คือที่ระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟ 475.75 W ความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิก 4.91% และเวลาที่ใช้แช่ 59.95 s ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งขมิ้นชันด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยสภาวะดังกล่าวให้ค่าความแตกต่างสีโดยรวม (ΔE) เท่ากับ 2.90 ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุด

Pérez-Francisco et al. (2008) ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง vegetal pear โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (BBD) และการหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งที่ใช้พลังงานต่ำ สามารถรักษาคุณภาพสี และปริมาณผลผลิตด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) โดยศึกษาปัจจัยที่ผลการทดลอง คือ อุณหภูมิในการอบแห้ง (60-70°C) ความหนาของชิ้นตัวอย่าง (4-7 cm) และความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิก (0-0.1%) จากผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการรักษาคุณภาพของ vegetal pear คือ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 63°C ที่ความหนาของตัวอย่างทดสอบ 5 cm และระดับความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิกที่ 0.075% ซึ่งจะ

ให้ค่าความชื้นเท่ากับ $0.052 \text{ g/g}_{\text{dry matter}}$ ค่าความแตกต่างสี มีค่าเท่ากับ 11.65 และอัตราผลผลิต 0.0073 kg/hr และค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง เท่ากับ $\$30.58 \text{ kg}_{\text{dry matter}}/\text{product}$

ผลการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า งานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาผลกระทบของสภาวะการอบแห้งและวิธีการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น การเปลี่ยนแปลงคุณภาพสี ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้ อัตราการคงเหลือของสารออกฤทธิ์ รวมทั้งการเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในอบแห้งในแต่ละวิธี โดยการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้งมีแนวทางในการศึกษาด้วยการเปรียบเทียบวิธีการอบแห้งอย่างน้อย 3 วิธี โดยการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งซึ่งจะเป็นวิธีการอบแห้งที่รักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดีที่สุดและถูกใช้เป็นวิธีสำหรับควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (control quality product) เทียบกับวิธีการอบแห้งลมร้อนที่สภาวะต่างๆ ซึ่งวิธีการการอบแห้งดังกล่าวเป็นวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม (traditional drying) ซึ่งจะถูกใช้ในการควบคุมคุณภาพของการอบแห้ง (control quality process) และการอบแห้งที่สนใจศึกษา เช่น การอบแห้งระบบสุญญากาศ (vacuum drying) การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (microwave drying) การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศ (microwave vacuum drying) หรือการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำยิ่งยวด (superheated steam drying)

นอกจากนี้ยังมีการใช้เทคนิคในการออกแบบการทดลองเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการทดลองจริง ซึ่งการออกแบบการทดลองแบบ BBD ถูกนำมาใช้เนื่องจากมีจำนวนครั้งในการทดลองที่น้อย รวมถึงช่วยลดต้นทุนที่ใช้ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่นำวิธีการออกแบบการทดลองดังกล่าวมาใช้ในการทดลอง รวมทั้งมีการนำเอาวิธี RSM เพื่อวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ มาใช้เพื่อช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นการรวบรวมเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์ และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลอง และวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบสนองที่เราสนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์และสารเคมี

1. สาหร่ายที่ใช้ในการศึกษา

สาหร่ายเตา *Spirogyra neglecta* (Hassall) Kützing จากบ้านนาอุหา ตำบลสวน
เขื่อน อำเภอเมือง จังหวัดแพร่

2. อุปกรณ์และเครื่องมือ

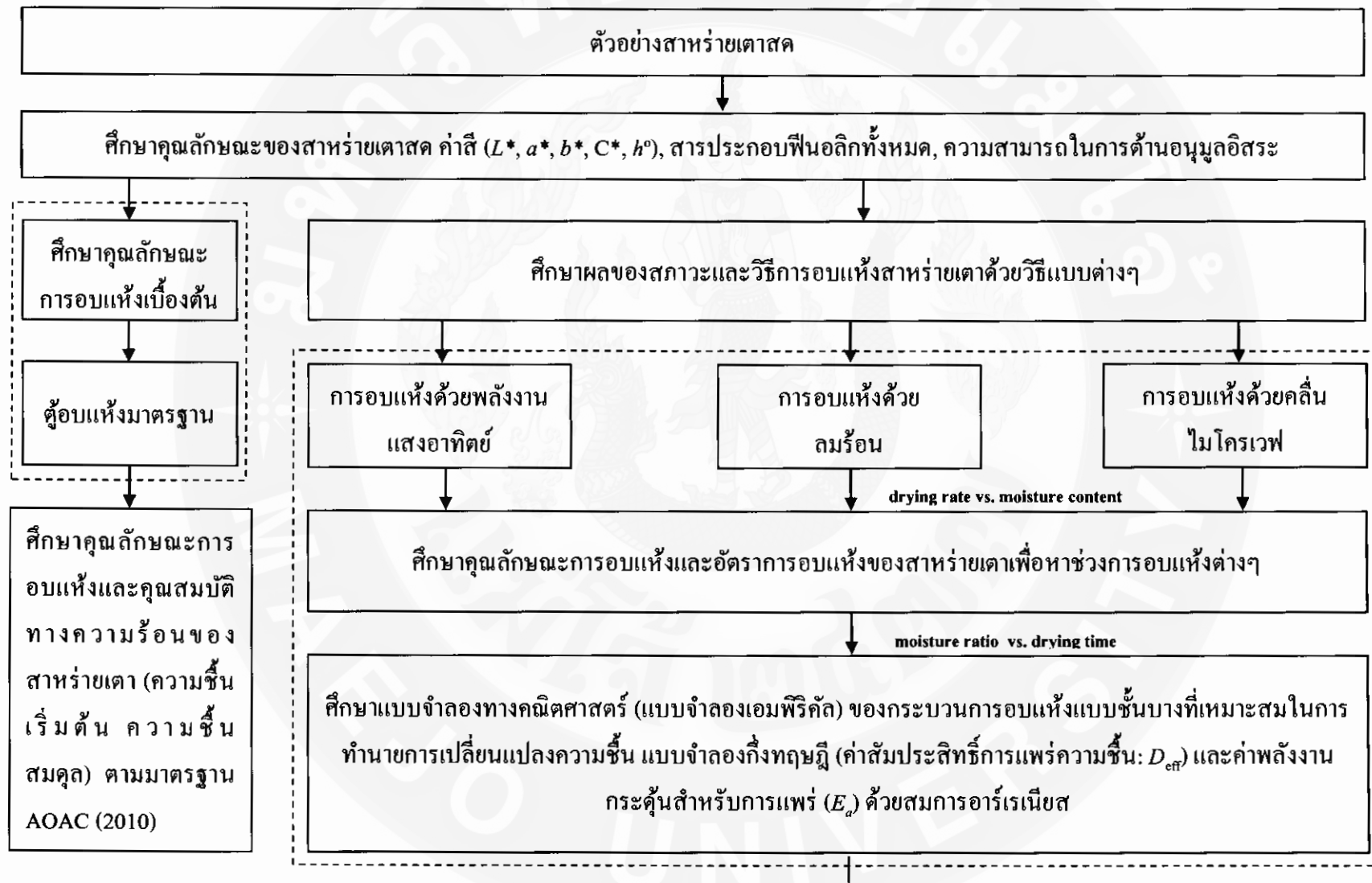
- 2.1 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน (Memmert model: LMZ500)
- 2.2 เครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ
- 2.3 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบพกพา (LD Didactic GmbH model: 524-0673)
- 2.4 เครื่องวัดค่าออกซิเจนละลายน้ำ (Aqua Lab model: Series 3 TE)
- 2.5 เครื่องวัดสี spectrophotometer (HunterLab model: MiniScan XE PLU)
- 2.6 เครื่องชั่งดิจิตอล 2 ตำแหน่ง (Sartorius model: CP 3202S)
- 2.7 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Wasino model: CE03)
- 2.8 พาวเวอร์มิเตอร์แบบตัวเลข (PRIMUS model: KM-16)
- 2.9 เครื่องลดขนาดแบบค้อน
- 2.10 ตู้แช่เยือกแข็ง (Sanyo model: SF-C997 (GYN))
- 2.11 ตู้เย็น (Haier model: HR-921)
- 2.12 ถ้วยอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิด
- 2.13 โถดูดความชื้น
- 2.14 บีกเกอร์ (Pyrex No.1000)
- 2.15 ถาดเซรามิก (Cuizimate)
- 2.16 ถาดตะแกรง
- 2.17 ถังซีปัส
- 2.18 ถังฟอยล์อะลูมิเนียม
- 2.19 กาลังดิจิตอล

3. สารเคมี

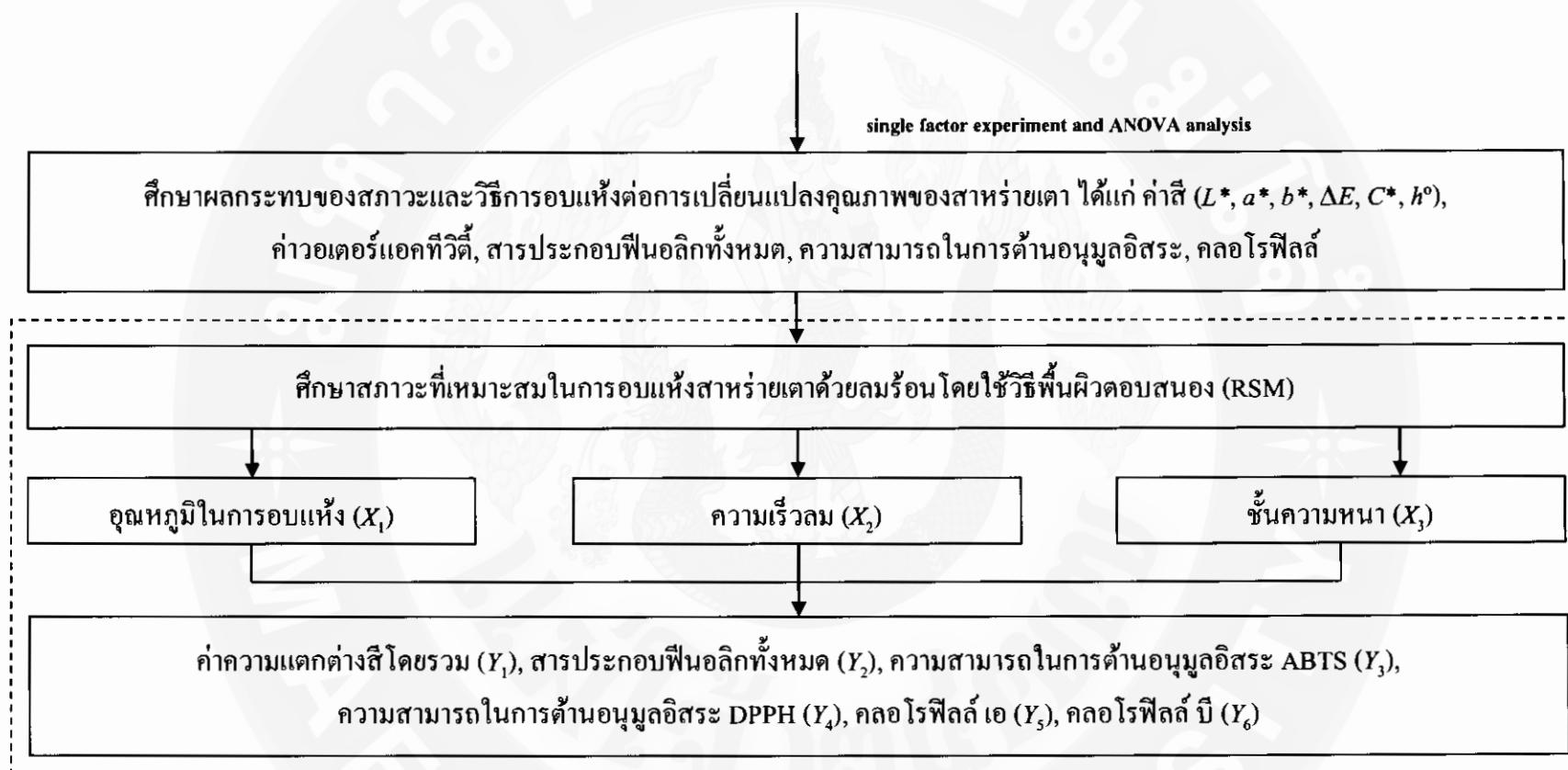
- 3.1 สารละลาย Folin-Ciocalteu
- 3.2 สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate: Na_2CO_3)
- 3.3 สารมาตรฐานกรดแกลลิก (gallic acid)
- 3.4 สารละลายแมกนีเซียมคาร์บอเนต (magnesium carbonate: MgCO_3)
- 3.5 สารละลายอะซิโตน (acetone)
- 3.6 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid: HCl)
- 3.7 2,2'-azino-bis 3-ethylbenzthiazoline -6-sulfonic acid (ABTS)
- 3.8 เอทานอล (ethanol)
- 3.9 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging activity
- 3.10 1 M Tris-HCl buffer (pH=7.9)
- 3.11 สารมาตรฐานโทลอกซ์ (Trolox Equivalent Antioxidant Capacity: TEAC)
- 3.12 น้ำกลั่น

วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะของสาหร่ายเตาสด และคุณลักษณะของสาหร่ายเตาอบแห้ง ได้แก่ ค่าความชื้นเริ่มต้น และค่าความชื้นสมดุลที่สภาวะการอบแห้งต่างๆ และเปรียบเทียบผลกระทบของสภาวะและวิธีการอบแห้งสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการอบแห้งสาหร่ายเตา รวมทั้งการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความชื้นของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยวิธีต่างๆ และเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งเพื่อวิเคราะห์ต้นทุนการอบแห้งเบื้องต้น รวมทั้งศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อนโดยใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสี สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และคลอโรฟิลล์ เพื่อให้โครงการวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ จึงได้มีแผนการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในภาพ 9



ภาพ 9 แผนภาพการดำเนินโครงการวิจัยทั้งหมด



ภาพ 9 (ต่อ)

1. การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างสาหร่ายเตาที่นำมาศึกษาเก็บมาจากบ้านนาควา ตำบลสวนเขื่อน อำเภอเมือง จังหวัดแพร่ ซึ่งทำการพิสูจน์เอกลักษณ์แล้วว่าเป็นชนิด *Spirogyra neglecta* (Hassall) Kützing (จิตติกันต์, 2550) โดยเก็บตัวอย่างสาหร่ายจำนวน 100 kg นำมาล้างทำความสะอาด จากนั้นนำไปบรรจุในถุงซิปล็อคเก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า -18°C เมื่อต้องการทดลองอบแห้งให้นำสาหร่ายแช่เยือกแข็งมาละลายโดยการแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 20°C จนน้ำแข็งละลายออกจนหมด นำสาหร่ายเตาเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยง (Wasino model: CE03) เพื่อไล่น้ำออก จากนั้นนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ $4\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 hr เพื่อให้สาหร่ายเตาเกิดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นแนวทางเดียวกับงานวิจัยของ Özbek and Dadali, 2007; Ozkan et al., 2007 และ Assawarachan et al., 2013 ก่อนนำไปศึกษาในขั้นตอนต่อไป

2. การวิเคราะห์ค่าความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสมดุล

การวิเคราะห์ค่าความชื้นเริ่มต้นของสาหร่ายเตา โดยนำสาหร่ายเตาจำนวน 2.5 g ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมขนาด 3 oz ที่ผ่านการอบเพื่อไล่ความชื้น นำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Memmert model: 500/108I) ที่อุณหภูมิ $105\pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 hr (AOAC, 2010) จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล (Sartorius model: CP 3202S) นำข้อมูลผลต่างของน้ำหนักสาหร่ายเตาก่อน และหลังการอบแห้งมาคำนวณหาความชื้นของสาหร่ายเตา

การวิเคราะห์ความชื้นสมดุลของสาหร่ายเตาด้วยวิธีเชิงพลวัตเป็นการปล่อยให้วัสดุสัมผัสกับอากาศแวดล้อม โดยทำให้อากาศหรือผลิตภัณฑ์เคลื่อนไหว วิธีนี้วัสดุจะเข้าสู่สมดุลกับสิ่งแวดล้อมอย่างรวดเร็วจึงเหมาะสมกับผลผลิตทางการเกษตรที่ความชื้นสูง โดยจำลองสภาวะการอบแห้งภายในตู้อบลมร้อน นำสาหร่ายเตาไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Memmert model: 500/108I) ที่อุณหภูมิ 60, 65, 70 และ 75°C เป็นเวลา 72 hr และการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นเวลา 45 h (ประมาณ 5 วัน) จนกระทั่งน้ำหนักของสาหร่ายเตาไม่มีการเปลี่ยนแปลง จากนั้นนำตัวอย่างสาหร่ายเตาไปวิเคราะห์ความชื้นสมดุลด้วยวิธีหาความชื้นตามมาตรฐาน AOAC (2010)

3. การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

นำตัวอย่างสาหร่ายเตาจำนวน 300 g วางบนตะแกรงรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $20\times 20\text{ cm}$ (ชั้นความหนา $3.70\pm 0.80\text{ mm}$) จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ทำการบันทึกน้ำหนักสาหร่ายเตาที่เปลี่ยนแปลงไปทุกๆ 30 min จนสาหร่ายเตาเหลือความชื้นสุดท้าย

$0.15 \pm 0.01 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องลดขนาดแบบค้อน (hammer mill) ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยประมาณ $250 \mu\text{m}$

4. การอบแห้งด้วยลมร้อน

เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนแบบถาดถูกออกแบบและสร้างโดยสาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ระบบสร้างลมร้อนซึ่งประกอบด้วยขดลวดไฟฟ้าขนาด 1.1 kW จำนวน 3 ขด และพัดลมระบายอากาศ (PANASONIC model: DVUS-940W1) ควบคุมอุณหภูมิของอากาศร้อนด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิระบบ PID (TOHO model: TTM J4/J5) ถาดสำหรับวางตัวอย่างติดตั้งจากระบบดิจิทัลสำหรับวัดและบันทึกค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของสาหร่ายเตา ทำการบันทึกค่าผ่านจากช่องสัญญาณ RS-485 ซึ่งเชื่อมต่อกับอุปกรณ์แปลงสัญญาณและเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูล

นำตัวอย่างสาหร่ายเตาจำนวน 300 g (ชั้นความหนา $3.70 \pm 0.80 \text{ mm}$) ใส่ในถาดตะแกรงรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $20 \times 20 \text{ cm}$ จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 65, 70 และ 75°C บันทึกน้ำหนักสาหร่ายเตาที่เปลี่ยนแปลงไปทุกๆ 10 min โดยทำการอบแห้งสาหร่ายเตาจนเหลือความชื้นสุดท้าย $0.15 \pm 0.01 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องลดขนาดแบบค้อน ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยประมาณ $250 \mu\text{m}$

5. การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

เครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้พัฒนาโดยสาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยติดตั้งระบบใบกวนคลื่น (mode stirring) ที่เตาไมโครเวฟขนาด 800 W (Panasonic model: NN-S235WF) วางบนฐานเหล็กโดยที่ฐานเหล็กจะติดเครื่องชั่งระบบดิจิทัล (Sartorius model: CP3202S) เพื่อบันทึกปริมาณน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง ทำการตรวจวัดระดับการดูดซับของพลังงานไมโครเวฟ (P) โดยใช้น้ำกลั่นจำนวน 1,000 g ในปิกรอร์ขนาด 1,000 ml (Pyrex No.1000) แล้วให้ความร้อนโดยเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นเวลา 60 s ที่ระดับพลังงานไมโครเวฟต่างๆ แล้ววัดอุณหภูมิของน้ำก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบพกพาที่มีความแม่นยำในระหว่างการวัดอุณหภูมิเท่ากับ $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ (LD Didactic GmbH model:

524-0673) นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณค่า P โดยมีสมการความสัมพันธ์ตามที่แสดงในสมการ (18) (Wei Cui et al., 2004; Ozkan et al., 2007; Maskan, 2001)

$$P = \frac{mC_p\Delta T}{t} = \frac{4,187\Delta T}{t} \quad (18)$$

เมื่อ P คือ การดูดซับพลังงานไมโครเวฟ (W) และ m คือ น้ำหนักของน้ำ (1,000 g), C_p คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำ มีค่าเท่ากับ 4.187 kJ/g K, ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิน้ำก่อนและหลังการได้รับความร้อนด้วยคลื่น (°C หรือ K) และ t คือ เวลาที่น้ำกลั่นได้รับความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (60 s) โดยเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟดังกล่าวสามารถปรับพลังงานคลื่นไมโครเวฟได้ 5 ระดับ คือ 164, 231, 465, 605 และ 752 W

เมื่อทราบระดับการดูดซับพลังงานไมโครเวฟทำการศึกษาการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยนำสาหร่ายเตาจำนวน 300 g วางในถาดเซรามิกรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 20×20 cm และสาหร่ายเตามีชั้นความหนา 3.70 ± 0.80 mm อบแห้งที่ระดับความเข้มของคลื่นไมโครเวฟ 4 ระดับ ได้แก่ 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W/g ทำการบันทึกน้ำหนักที่ลดลงทุกๆ 30 s จนเหลือความชื้นสุดท้ายที่ 0.15 ± 0.01 g_{water}/g_{dry matter} จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องลดขนาดแบบค้อนจนมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 250 μ m

6. การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งใช้การวิเคราะห์แบบสมการถดถอยที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear regression) ซึ่งการประเมินข้อมูลและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ค่าอัตราส่วนความชื้น (MR) ของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้ง สามารถหาได้จากสมการ (19) และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินความแม่นยำและความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกคุณภาพของรูปแบบสมการในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง ในขณะที่ค่าโคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนาย ทั้งนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่มีความแม่นยำและเหมาะสมในการทำนายจะให้ค่า R^2 สูงที่สุด แต่ขณะที่ค่า χ^2 และค่า RMSE มีค่าต่ำที่สุด โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งสาหร่ายเตา ได้แก่ Newton,

Henderson and Pabis, Page, Modified Page, Midilli et al., Wang and Singh และ Logarithmic ซึ่งรูปแบบสมการแสดงในตาราง 3

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (19)$$

เมื่อ	MR	คือ อัตราส่วนความชื้น
	M_t	คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ ($g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$)
	M_e	คือ ความชื้นสมดุล ($g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$)
	M_i	คือ ความชื้นเริ่มต้น ($g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$)

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของสาหร่ายเตา (effective diffusivity: D_{eff}) ด้วยแบบจำลองกึ่งทฤษฎี ซึ่งมีความสัมพันธ์อยู่ในรูปกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) ในสภาวะการแพร่ความชื้นที่ไม่คงที่สามารถใช้ในการหาอัตราส่วนความชื้นดังแสดงในสมการ (6) และการวิเคราะห์ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ (activation energy for diffusion: E_d) ด้วยสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ดังแสดงในสมการ (8) สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน และสมการ 9 สำหรับการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

7. การวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอคทีวิตี

นำสาหร่ายเตาอบแห้งในแต่ละสภาวะ จำนวน 3 g วัดค่าวอเตอร์แอคทีวิตี (a_w) โดยใช้เครื่องวัดแบบพลวัต (Aqua Lab model: Series 3 TE) โดยเครื่องจะใช้เวลาในการวัดค่า a_w ภายใน 5 min จากนั้นเครื่องจะแสดงผลบนหน้าจอพร้อมบันทึกค่า

8. การวิเคราะห์สี

นำสาหร่ายเตาอบแห้งมาวัดสีโดยใช้เครื่อง spectrophotometer (HunterLab model: MiniScan XE PLUS) เพื่อวัดค่าความสว่าง/ความมืด (lightness/darkness: L^*) ค่าความเป็นสีแดง/สีเขียว (redness/greenness: a^*) ค่าความเป็นสีเหลือง/สีน้ำเงิน (yellowness/blueness: b^*) จากนั้นนำค่าสีที่วัดได้มาคำนวณหาค่าความแตกต่างสีโดยรวม (total color difference: ΔE) ค่าความสด

(chroma: C^*) และค่าสีส้ม (hue angle: h°) ของสาหร่ายเตา โดยมีสมการความสัมพันธ์ตามที่แสดงในสมการ (15)-(17) ตามลำดับ

9. การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

เตรียมสาหร่ายเตาอบแห้งที่ผ่านการบดจำนวน 0.5 g ละลายในน้ำกลั่น จำนวน 5 ml ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอน ที่ความเร็วรอบ 2,500 rpm เป็นเวลา 10 min นำสารสกัดน้ำของสาหร่ายเตามาทดสอบโดยวิธี Folin-Ciocalteu ตามวิธีการของ Sachindra et al. (2010) ดังนี้ใช้ตัวอย่างสารสกัดน้ำของสาหร่ายเตาที่ละลายในน้ำกลั่น ความเข้มข้น 10 mg/ml จำนวน 0.2 ml ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย Folin-Ciocalteu ความเข้มข้น 10% จำนวน 1 ml และเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ความเข้มข้น 7.5% จำนวน 0.8 ml ผสมให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 hr ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นอ่านค่าจากการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 nm คำนวณปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดโดยเทียบกับสารมาตรฐานกรดแกลลิก (gallic acid) รายงานผลปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ($\text{mg GAE}/100 \text{ g}_{\text{dry matter}}$)

10. การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

10.1 วิธี Scavenging activity of ABTS radical

นำสาหร่ายเตาอบแห้งที่ผ่านการบด ชั่งน้ำหนักแห้งประมาณ 0.5 g เติมน้ำกลั่นปริมาตร 10 ml ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2,500 rpm เป็นเวลา 10 min ดูดตัวอย่างสารสกัดน้ำของสาหร่ายเตาไว้ การทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระวิธี ABTS ได้ดัดแปลงจากวิธีของ Re et al. (1999) ดังนี้ เตรียมสาร ABTS [2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)] ที่มีความเข้มข้น 7 mM ปริมาตร 5 ml และสาร potassium persulfate ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) ที่มีความเข้มข้น 140 mM ปริมาตร 88 ml จากนั้นผสมสารละลาย 7 mM ABTS และ 140 mM $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ในขวดสีชา ตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 16 hr ที่อุณหภูมิห้อง จะได้ ABTS radical cation stock solution หลังจากนั้นทำการเจือจาง ABTS radical cation stock solution ด้วยน้ำกลั่นให้ค่าดูดกลืนแสงที่ 734 nm เท่ากับ 0.700 ± 0.020 เติมสารละลาย ABTS radical cation ปริมาตร 1 ml ลงในหลอดทดลองและใช้น้ำกลั่นเป็นชุดควบคุม จากนั้นเติมตัวอย่างสารสกัดน้ำของสาหร่ายเตา ความเข้มข้น 1 mg/ml ปริมาตร 10 μl ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 min จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 734 nm นำค่าที่ได้ไปคำนวณหา %inhibition หรือการยับยั้งอนุมูลอิสระดังสมการ (20) จากนั้นนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS ของ

สำหรับตัวอย่างที่สภาวะต่างๆ เทียบกับความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระมาตรฐาน Trolox ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของวิตามินอี หรือเรียกว่าค่า TEAC (Trolox Equivalent Antioxidant Capacity) รายงานผลความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS (mg TEAC/100 g_{dry matter})

$$\%inhibition = [(A_{734 \text{ control}} - A_{734 \text{ test sample}}) / A_{734 \text{ control}}] \times 100 \quad (20)$$

เมื่อ	$A_{734 \text{ control}}$	คือ ค่าการดูดกลืนแสงของชุดควบคุม
	$A_{734 \text{ test sample}}$	คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างทดสอบ

10.2 วิธี 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging activity

วิธี DPPH radical scavenging ดัดแปลงมาจาก Hou et al. (2001) ดังนี้ ทำการเจือจาง DPPH radical ด้วยเอทานอลให้ค่าดูดกลืนแสงที่ 517 nm เท่ากับ 1.40 ± 0.05 นำสำหรับตัวอย่างอบแห้งที่ผ่านการบด จำนวน 0.5 g ละลายในน้ำกลั่น ปริมาตร 10 ml ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2,500 rpm เป็นเวลา 10 min แล้วดูดตัวอย่างสารสกัดน้ำของสำหรับตัวอย่าง ความเข้มข้น 0.1 mg/ml ปริมาตร 0.6 ml ลงในหลอดทดลอง เติมสาร 1 M Tris-HCl buffer (pH=7.9) ปริมาตร 0.2 ml และเติม 5 mM DPPH ในเอทานอลปริมาตร 1.2 ml ผสมให้เข้ากัน ตั้งไว้ในที่มืด 20 min วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 nm นำค่าที่ได้ไปคำนวณหา %inhibition ตามสมการ (20) จากนั้นนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสำหรับตัวอย่างอบแห้ง โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานของ Trolox รายงานผลความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (mg TEAC/100 g_{dry matter})

11. การวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์

นำสำหรับตัวอย่างอบแห้งที่ผ่านการบด ชั่งน้ำหนัก 0.5 g เติม 90% v/v เอทานอล ปริมาตร 10 ml บ่มที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 5 min จากนั้นกรองเพื่อแยกเศษเซลล์ ทิ้งให้สารละลายเย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วปรับปริมาตรให้ได้ 10 ml ด้วย 90% v/v เอทานอล จากนั้นนำตัวอย่างสารสกัดน้ำของสำหรับตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 rpm เป็นเวลา 15 min และวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 650 และ 665 nm คำนวณหาปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ดังสมการ (21)-(22) (Becker, 1994 อ้างโดย ชูวดี และคณะ, 2548)

$$\text{chlorophyll } A = \frac{[(16.5 \times A_{665}) - (8.3 \times A_{650})] \times 10}{\text{mg cell dry matter}} \quad (21)$$

$$\text{chlorophyll } B = \frac{[(33.8 \times A_{650}) - (12.5 \times A_{665})] \times 10}{\text{mg cell dry matter}} \quad (22)$$

12. การวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง

การวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าเป็นการวัดอัตราการใช้พลังงานสำหรับการสร้างความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งสาหร่ายเตาดด้วยลมร้อนและคลื่นไมโครเวฟ โดยการใช้พาวเวอร์มิเตอร์แบบตัวเลข (digital power meter) (Primus model: KM-16) เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ไหลผ่านสายไฟของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน และเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่สภาวะการอบแห้งต่างๆ โดยสมการ (23) ใช้คำนวณการใช้ไฟฟ้าต่อชั่วโมง จากนั้นนำค่าดังกล่าวไปคำนวณค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งสาหร่ายเตาดที่สภาวะต่างๆ

$$P = IV \cos \phi \quad (23)$$

เมื่อ	P	คือ กำลังไฟฟ้า (kW)
	I	คือ กระแสไฟฟ้า (A)
	V	คือ ความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (V)
	$\cos \phi$	คือ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 0.85
		(การไฟฟ้านครหลวง, ม.ป.ป.)

การคำนวณค่าไฟฟ้า = การใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชั่วโมง (kW) $\times$ ชั่วโมงการทำงาน (hr) $\times$ ราคาต่อหน่วย (3 baht/kW* hr)

13. การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

การทดลองทั้งหมดทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ครั้ง ($n=3$) และหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\pm S.D.$) จากนั้นนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติ ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (one-way ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p<0.05$)

14. การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์เคน และการหาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งสาหร่ายเตาโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

งานวิจัยนี้อาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology: RSM) และการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์เคน (Box Behken design: BBD) สำหรับ 3 ปัจจัย อาศัยการทำการทดลองทั้งสิ้นจำนวน 15 การทดลอง โดยเป็นการทดลองที่ตำแหน่งกึ่งกลางซึ่งทำซ้ำจำนวน 3 การทดลอง ผลการทดลองที่ตำแหน่งกึ่งกลางจะถูกนำไปวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาความสมบูรณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลการทดลองโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถแสดงดังสมการ (24) (Zafer and Filiz, 2009; ภณิกษา และ คณะ, 2555; สมเกียรติ และ ภูมิรินทร์, 2554; Montgomery, 2006)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i,j=1}^n \beta_{ij} X_i X_j \quad (24)$$

โดยที่ $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ X_i คือ ตัวแปรต้น ปัจจัยที่ต้องการศึกษาในกระบวนการอบแห้งสาหร่ายเตา ประกอบไปด้วยอุณหภูมิในการอบแห้ง (X_1) ความเร็วลม (X_2) และชั้นความหนา (X_3) โดยมีระดับความสำคัญของปัจจัยต่างๆ 3 ระดับ ได้แก่ ระดับต่ำ (-1) กลาง (0) และสูง (1) ดังแสดงรายละเอียดของตัวแปรต้นที่ใช้ในการออกแบบการทดลองในตาราง 4 ซึ่งค่าตัวแปรต้นเหล่านี้ได้ทำการศึกษาเบื้องต้น (preliminary) และตัวแปรตามที่ต้องการศึกษา ได้แก่ ความแตกต่างสีโดยรวม (Y_1) ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Y_2) ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS (Y_3) ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (Y_4) คลอโรฟิลล์ เอ (Y_5) คลอโรฟิลล์ บี (Y_6)

ตาราง 4 ค่าตัวแปรต้นที่ใช้ในการทดลอง

independent variables	coded	coded variables		
		-1	0	1
อุณหภูมิในการอบแห้ง (°C)	X_1	65	70	75
ความเร็วลม (m/s)	X_2	1.0	1.5	2.0
ชั้นความหนา (mm)	X_3	2.0	3.0	4.0

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

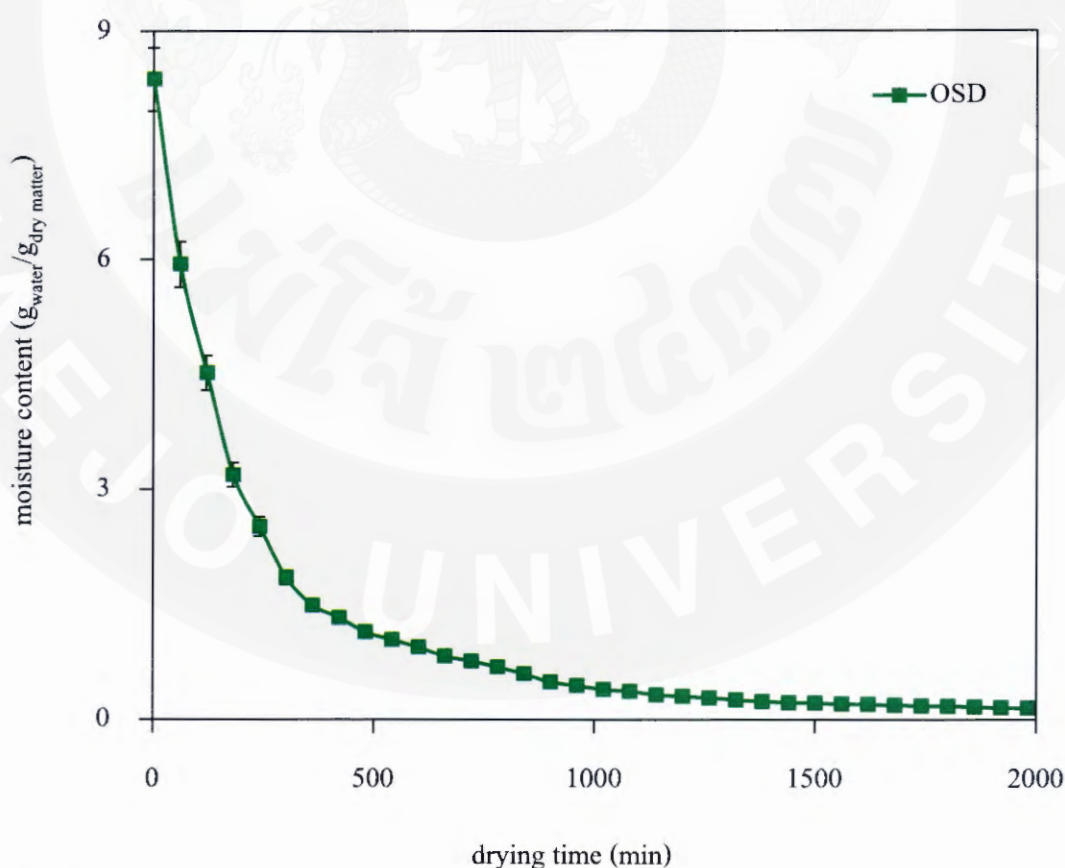
การทดลองเพื่อศึกษาหาสภาวะวิธีการอบแห้งที่เหมาะสมและสามารถลดการสูญเสียคุณภาพของสาหร่ายเตาอบแห้ง ซึ่งผลิตภัณฑ์และสารสกัดจากสาหร่ายเตาสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องสำอางและอาหารเสริม โดยงานวิจัยนี้ทำการศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งเบื้องต้น ได้แก่ ค่าความชื้นเริ่มต้น (M_i) และค่าความชื้นสมดุล (M_e) ที่สภาวะการอบแห้งแบบต่างๆ โดยนำค่าพารามิเตอร์ของคุณลักษณะการอบแห้งสาหร่ายเตาเพื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้น (MR) ในระหว่างวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ ได้แก่ การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อนและการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองถูกนำไปวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งในรูปแบบสมการเอมพิริคัลและสมการกึ่งทฤษฎี เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งที่เหมาะสมในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้งสาหร่ายเตา รวมทั้งการทวนสอบความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งโดยทำการเปรียบเทียบผลจากการทำนายโดยแบบจำลองกับผลจากการทดลอง และศึกษาผลกระทบของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ ได้แก่ การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สามารถลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสี ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด คลอโรฟิลล์ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และหาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งเพื่อนำมาวิเคราะห์ต้นทุนการอบแห้ง นอกจากนี้ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อนโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) เพื่อหาสภาวะที่สามารถรักษาคุณภาพของสาหร่ายเตาอบแห้งได้ดีที่สุด ซึ่งจากการวิเคราะห์ได้ผลดังต่อไปนี้

ผลการศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งของสาหร่ายเตา

สาหร่ายเตาที่ใช้ในการทดลองมีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $8.55 \pm 0.20 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ และความชื้นสมดุลของการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เท่ากับ $0.0736 \pm 0.0023 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 65, 70, 75°C มีค่าเท่ากับ 0.0641 ± 0.0020 , 0.0635 ± 0.0020 , 0.0629 ± 0.0020 , $0.0621 \pm 0.0020 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ ตามลำดับ ในขณะที่การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ความชื้นสมดุลมีค่าเท่ากับศูนย์ ($M_e = 0$) เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟมีประสิทธิภาพในการส่งถ่ายพลังงานเข้าสู่สาหร่ายเตาสูง ส่งผลให้สาหร่ายเตาเกิดระเหยน้ำในโครงสร้างเนื้อเยื่อชั้นในและน้ำ

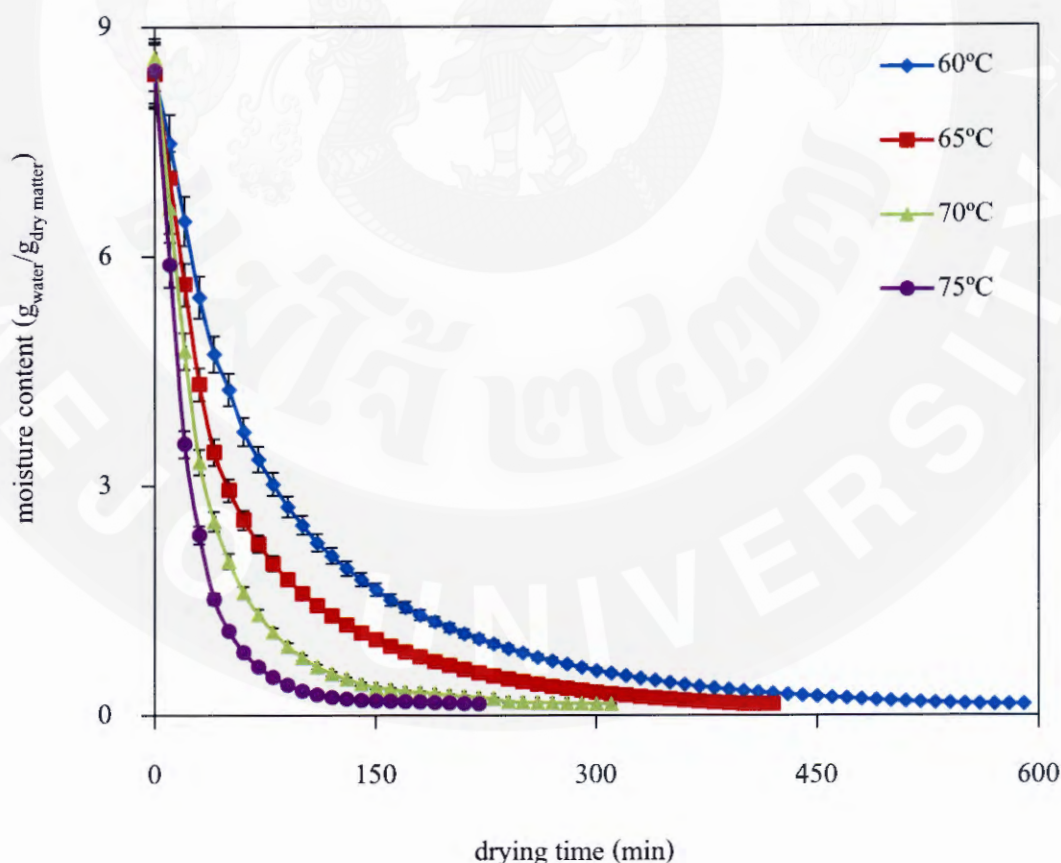
อิสระที่ผิวบนออกอย่างรุนแรง ค่าความชื้นสมดุลของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟจึงมีค่าเท่ากับศูนย์ สอดคล้องกับงานวิจัยของน้ำฝน และคณะ (2555); Dadali et al. (2007a); Demirhan and Özbek (2009); Therdtthai and Zhou (2009); Alibas (2007); Evin (2012) ซึ่งศึกษาการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรและวัสดุชีวภาพชนิดต่างๆ ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ภาพ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นของสาหร่ายเตาที่เวลาใดๆ ในระหว่างการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสาหร่ายเตาจนเหลือความชื้น $0.15 \pm 0.01 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ ใช้เวลาเท่ากับ 1,980 min ซึ่งจะสังเกตว่าการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในช่วงแรกมีแนวโน้มลดลงในลักษณะเป็นเส้นตรง หลังจากนั้นความชื้นจะลดลงในลักษณะเอกโปแนนเชียลกับระยะเวลาในการอบแห้ง โดยที่ความชื้นของสาหร่ายเตาจะลดลงตลอดเวลาจนถึงสุดกระบวนการอบแห้ง จากปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าสาหร่ายเตาได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยตรง ส่งผลทำให้ปริมาณน้ำอิสระในโครงสร้างเซลล์ที่บริเวณผิวเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวระเหยกลายเป็นไอน้ำ และไอน้ำถูกถ่ายเทมวลไปกับอากาศร้อน จากนั้นปริมาณน้ำอิสระในโครงสร้างชั้นในจะเกิดการเคลื่อนที่มาทดแทนบริเวณผิว



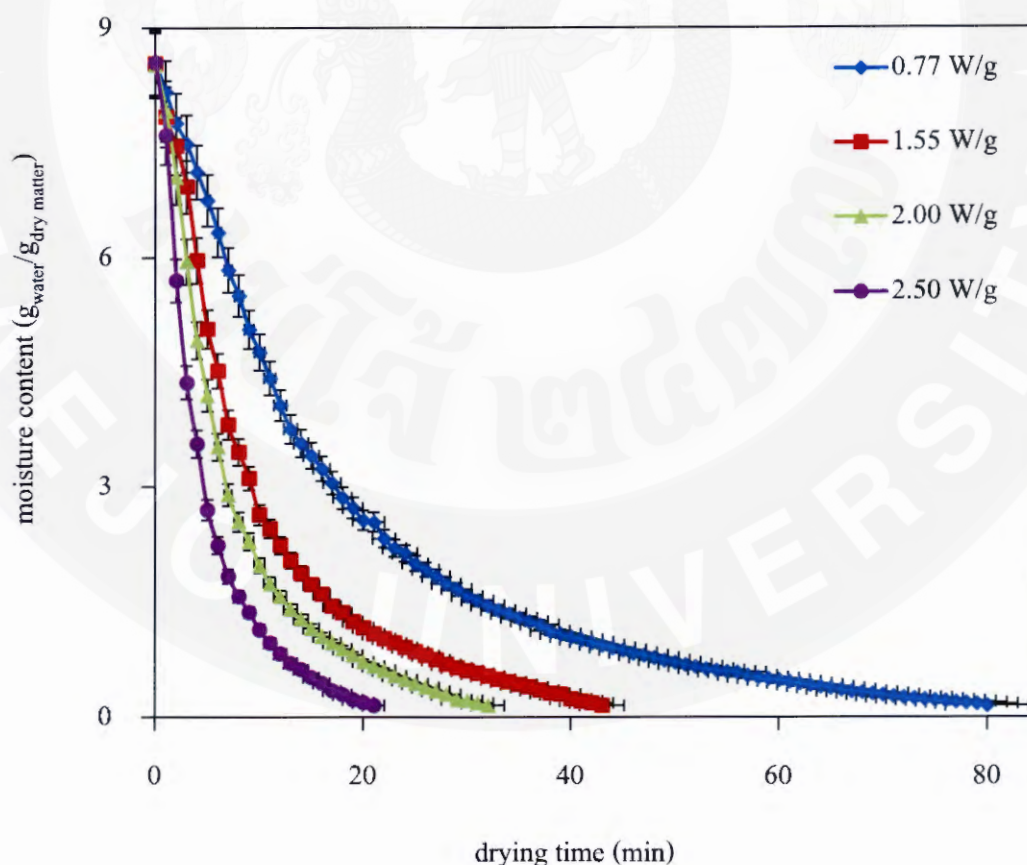
ภาพ 10 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

การศึกษาผลของอุณหภูมิลมร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้ง โดยอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มี 4 ระดับ ได้แก่ 60, 65, 70 และ 75°C ด้วยความเร็วลมคงที่ 2.0 m/s พบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสาหร่ายเตาจนเหลือความชื้น $0.15 \pm 0.01 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ ใช้เวลาเท่ากับ 590, 420, 310 และ 220 min ที่ระดับอุณหภูมิ 60, 65, 70 และ 75°C ตามลำดับ (ภาพ 11) ทั้งนี้การอบแห้งสาหร่ายเตาที่อุณหภูมิ 75°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการทดลองจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 60°C ถึง 2.59 เท่า เนื่องจากอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งสูงสามารถลดความชื้นของสาหร่ายเตาได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอากาศร้อนกับสาหร่ายเตา ในกรณีที่ใช้อุณหภูมิลมร้อนสูงจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิลมร้อนดังกล่าวระเหยน้ำได้เร็วกว่า เช่นเดียวกับผลงานวิจัยของ Pardeshi et al. (2009); Kumar et al. (2012); จินตนาพร และคณะ (2555) ซึ่งศึกษาการอบแห้งถั่วเขียว กากแครรอต และกากมะพร้าว พบว่าเวลาในการอบแห้งลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น



ภาพ 11 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อน

ผลการทดลองวัดค่าพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงานต่างๆ พบว่า เตาไมโครเวฟที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีระดับกำลังงานการดูดซับพลังงานเท่ากับ 231.18 ± 5.83 , 465.15 ± 9.08 , 605.81 ± 4.92 และ 752.04 ± 14.77 W หรือที่ระดับความชื้น 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W/g ตามลำดับ ภาพ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นของสาหร่ายเตาที่เวลาใดๆ ในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งสาหร่ายเตาจนเหลือความชื้น $0.15 \pm 0.01 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ มีค่าเท่ากับ 80, 43, 32 และ 21 min ที่ระดับความชื้น 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W/g ตามลำดับ ที่ระดับความชื้น 2.50 W/g ซึ่งเป็นระดับพลังงานสูงสุดใช้เวลาน้อยสุด เท่ากับ 21 min แต่ในขณะที่ระดับ 0.77 W/g ใช้เวลาในการอบแห้งมากที่สุด โดยใช้เวลาเท่ากับ 80 min ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสาหร่ายเตาจะขึ้นอยู่กับระดับความชื้นของคลื่นไมโครเวฟ สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ ปองพล และ ฤทธิชัย (2555); Dadali et al. (2007a) และ Özbek and Dadali (2007) ได้ทดลองอบแห้งใบกะเพรากระเจียบเขียว และใบสะระแหน่ด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่าเมื่อเพิ่มระดับความชื้นของคลื่นไมโครเวฟสูงขึ้นจะทำให้เวลาในการอบแห้งลดลง

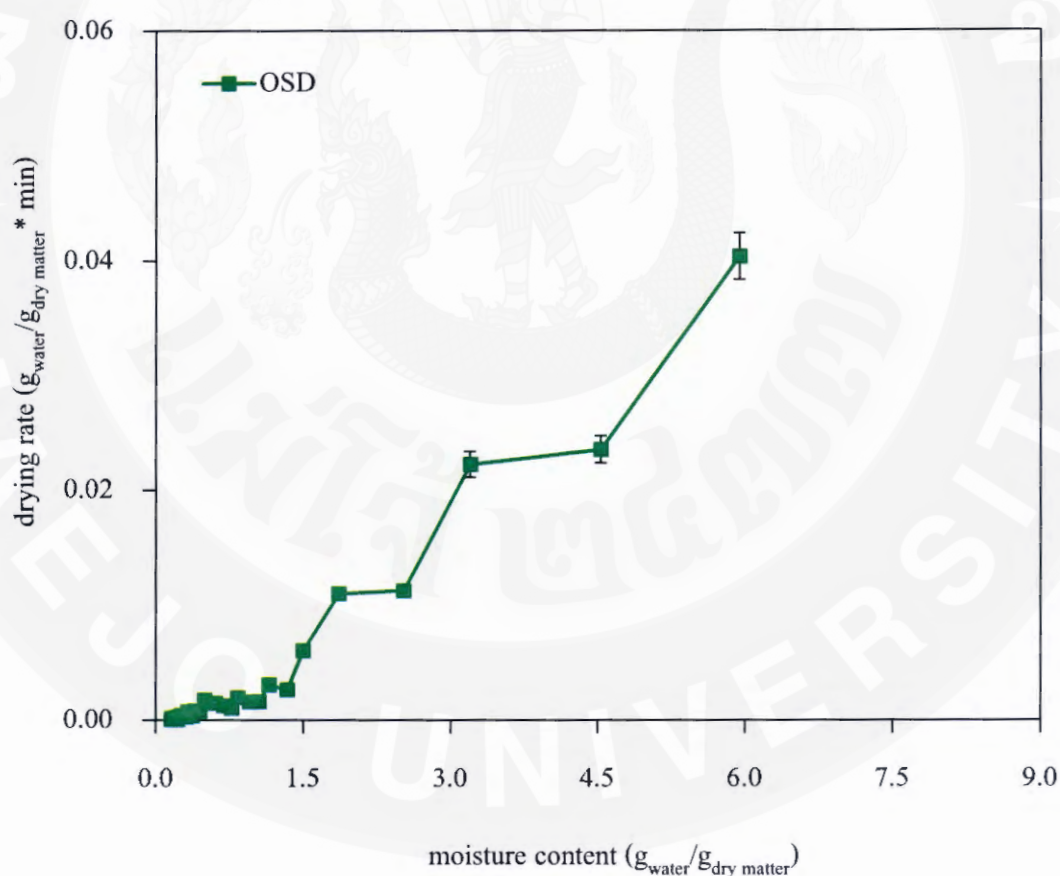


ภาพ 12 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟ

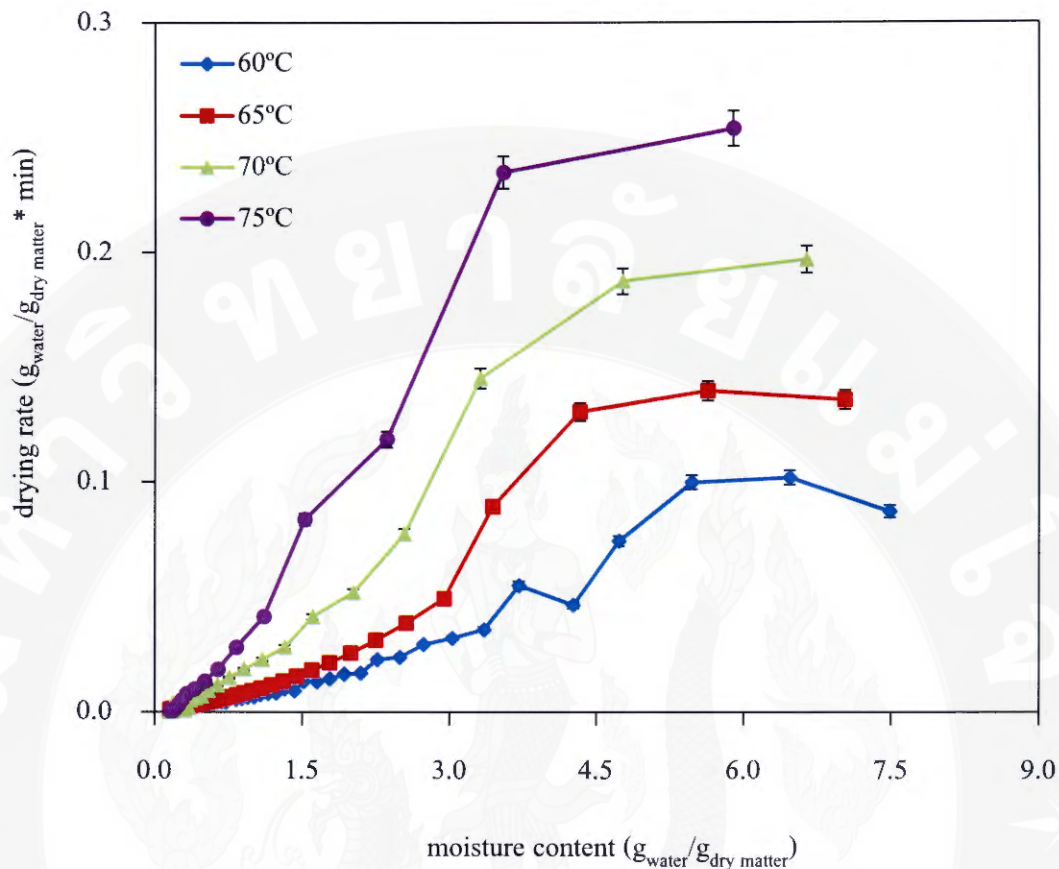
ผลการศึกษาอัตราการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ มีค่าเท่ากับ $0.0005 \pm 0.0001 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}} \cdot \text{min}$ (ภาพ 13) และภาพ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งที่ระดับความชื้นต่างๆ ของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อน โดยอัตราการอบแห้งสาหร่ายเตาจะขึ้นอยู่กับระดับของอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง อัตราการอบแห้งของสาหร่ายเตา มีค่าเท่ากับ 0.0139 ± 0.0015 , 0.0196 ± 0.0008 , 0.0273 ± 0.0026 และ $0.0376 \pm 0.0017 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}} \cdot \text{min}$ ที่อุณหภูมิ 60, 65, 70 และ 75°C ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิลมร้อนมีค่าสูง ทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ผลต่างของความดันไอระหว่างสาหร่ายเตากับอากาศมีค่าสูง จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนและมวลได้ดีขึ้น เมื่อโมเลกุลของน้ำภายในวัสดุได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นมากพอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวโมเลกุลได้ จึงส่งผลให้น้ำระเหยออกจากสาหร่ายเตาได้เร็วขึ้น โดยกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลความชื้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งของสาหร่ายเตาแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกตัวอย่างสาหร่ายเตาจะสัมผัสกับลมร้อน จะเกิดปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน จนอุณหภูมิมียุคสูงขึ้นและมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของลมร้อน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นในช่วงดังกล่าว เป็นค่าความร้อนจำนวนหนึ่งที่ทำให้มวลความชื้นมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง โดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำ (sensible heat) จากนั้นเมื่อน้ำที่ผิวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะไอน้ำและถูกถ่ายเทมวลความชื้นและถูกพาออกไปกับอากาศร้อนที่ไหลผ่าน โดยพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในช่วงนี้เรียกว่า ความร้อนแฝง (latent heat) มวลความชื้นที่ผิวดตัวอย่างสาหร่ายเตาจะสูญเสียสมดุลความชื้นและแห้ง ส่งผลให้มวลความชื้นในชั้นเนื้อเยื่อเคลื่อนที่มายังผิวน้ำเพื่อชดเชยมวลความชื้นที่สูญเสียไปในระหว่างการอบแห้ง จากปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงเกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำในโครงสร้างเซลล์และผนังเนื้อเยื่อชั้นใน จึงมีการแพร่มวลความชื้นมาทดแทนยังบริเวณผิวน้ำเซลล์เท่ากับอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวน้ำอาหาร การอบแห้งช่วงนี้จึงเรียกว่าอัตราการทำให้แห้งคงที่ (constant drying rate period) และเมื่อการอบแห้งดำเนินการต่อไปจนกระทั่ง อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในอาหารที่แพร่มาแทนที่ผิวน้ำช้ากว่าอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวน้ำของอาหาร (falling drying rate period) (ผดุงศักดิ์, 2551) และภาพ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งที่ระดับความชื้นต่างๆ ของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟทั้ง 4 ระดับ พบว่าอัตราการอบแห้งมีค่าเท่ากับ 0.1039 ± 0.0067 , 0.1929 ± 0.0273 , 0.2645 ± 0.0148 และ $0.4109 \pm 0.0226 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}} \cdot \text{min}$ ทั้งนี้อัตราการอบแห้งสาหร่ายเตาจะขึ้นอยู่กับระดับความเข้มของคลื่นไมโครเวฟ เมื่อเพิ่มระดับความเข้มของคลื่นไมโครเวฟทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น

จากภาพ 13-15 จะเห็นว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งเป็นไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ ความชื้นของสาหร่ายเตามีค่าลดลงต่อเนื่อง

อย่างรวดเร็ว หรือมีอัตราการอบแห้งที่สูงในช่วงแรก เนื่องจากการอบแห้งในช่วงแรกสาหร่ายเตายังมีปริมาณความชื้นสูง ซึ่งความชื้นหรือน้ำในส่วนนี้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำอิสระ (free water) ที่อยู่ในโครงสร้างเซลล์และผนังเนื้อเยื่อชั้นในเคลื่อนที่มายังผิวหน้าของสาหร่ายเตเพื่อทดแทนน้ำที่ระเหยออกไปจากผิวหน้า จากนั้นการเปลี่ยนแปลงความชื้นจะมีค่าลดลง อันเนื่องมาจากความชื้นของสาหร่ายเตมีปริมาณน้อยลงและน้ำในส่วนนี้ส่วนใหญ่เป็นน้ำที่ยึดเกาะอยู่กับโมเลกุลของสารอื่น (bound water) จึงส่งผลให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายใน โครงสร้างเซลล์ไปสู่ผิวหน้าของสาหร่ายเตเกิดขึ้นได้ช้ากว่าการระเหยของน้ำที่บริเวณผิวหน้าของสาหร่ายเต ซึ่งทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นในช่วงหลังมีค่าต่ำกว่าในช่วงแรก และหลังจากนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นจะมีค่าลดลงอย่างมาก เนื่องจากปริมาณความชื้นภายในของสาหร่ายเตที่แพร่มาทดแทนผิวหน้าเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าของสาหร่ายเต



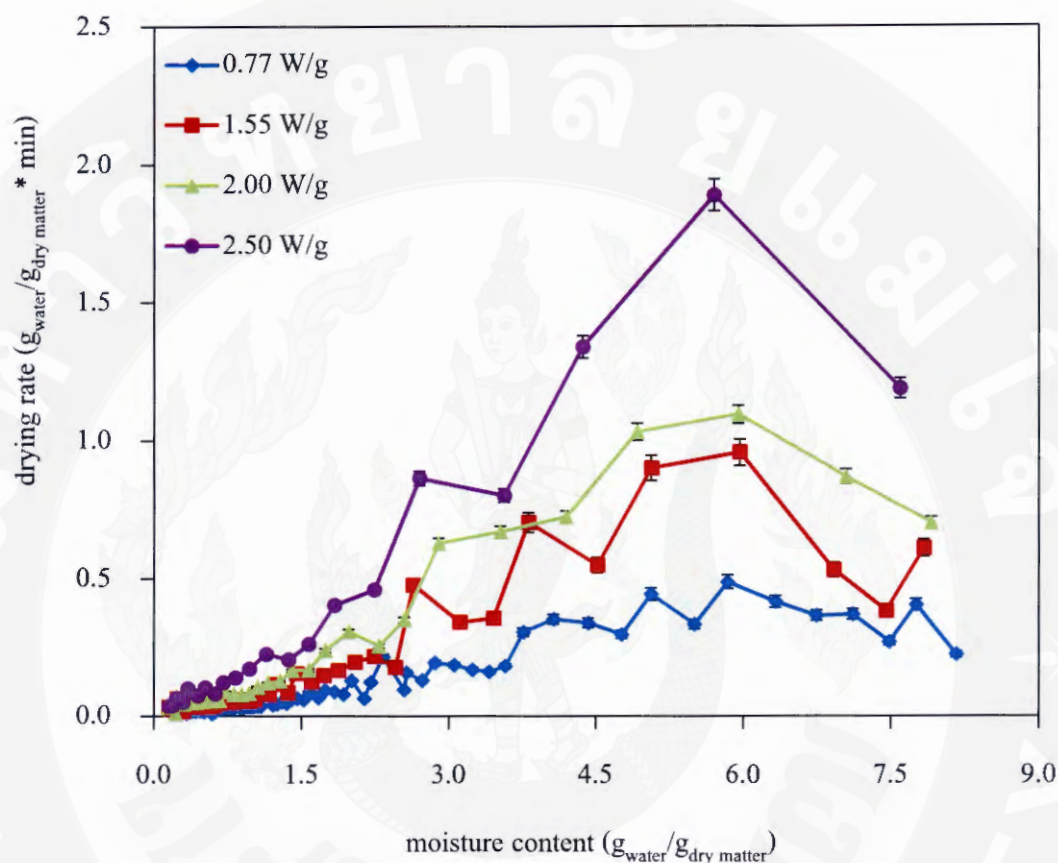
ภาพ 13 การเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งสาหร่ายเตด้วยพลังงานแสงอาทิตย์



ภาพ 14 การเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งสำหรับเตาด้วยลมร้อน

เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและอัตราการอบแห้งสำหรับเตา พบว่าการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟจะใช้เวลาน้อยกว่าและมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และการอบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากสำหรับเตาจัดเป็นวัสดุทางชีวภาพที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนสามารถดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟได้ดี โดยการเกิดความร้อนในสำหรับเตาจะประกอบไปด้วยกลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออน (ionic conduction) และกลไกชนิดการหมุนของทั้งสองขั้ว (dipolar rotation) ดังนั้นเมื่อสำหรับเตาได้รับคลื่นไมโครเวฟในระหว่างการอบแห้ง น้ำในสำหรับเตาก็จะถูกเหนี่ยวนำด้วยคลื่นไมโครเวฟจนเกิดความร้อนทั้งบริเวณผิวนอกและภายในโครงสร้างเซลล์อย่างรวดเร็ว และเมื่อปริมาณความร้อนสูงส่งผลให้เกิดการระเหยของน้ำที่บริเวณผิวน้ำและภายในสำหรับเตาเกิดการแพร่ความชื้นออกไปสู่ชั้นผิวอย่างรวดเร็ว พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวเร่งอัตราการระเหยของไอน้ำที่ผิวน้ำ และมีค่าเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำภายในโครงสร้างที่มาเติมเต็มที่ผิวน้ำสำหรับเตาทำให้มีอัตราการระเหยน้ำที่

สูงและคงที่ เมื่อการอบแห้งสาหร่ายเตาดำเนินการต่อไปเรื่อยๆ จนความชื้นของสาหร่ายเตาเข้าสู่ความชื้นวิกฤติกระบวนการอบแห้งจะเข้าสู่คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง



ภาพ 15 การเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง สาหร่ายเตาด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งสาหร่ายเตาในรูปของแบบจำลองเอมพิริคัล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งในรูปแบบของสมการเอมพิริคัลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบไปด้วย แบบจำลองของ Newton, Page, Modified Page, Midilli et al., Henderson and Pabis, Logarithmic และ Wang and Singh การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้การวิเคราะห์แบบสมการถดถอยที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear

regression) และใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าใดกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เป็นดัชนีบ่งชี้ความแม่นยำของแบบจำลองในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้ง โดยแบบจำลองที่มีความแม่นยำและเหมาะสมในการทำนายจะให้ค่า R^2 สูง แสดงถึงคุณภาพของรูปแบบสมการที่มีความเหมาะสมในการทำนาย แต่ในขณะที่ยังค่า χ^2 และค่า RMSE ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าต่ำ ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งสำหรับเตาด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ดังแสดงในตาราง 5 ซึ่งแสดงค่าคงที่ของการอบแห้งและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งทั้ง 7 แบบจำลอง โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Logarithmic สามารถอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งสำหรับเตาด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่า R^2 สูงที่สุด (0.9969) ในขณะที่ค่า χ^2 (2.7646×10^{-4}) และค่า RMSE (0.0159) มีค่าต่ำกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton, Page, Modified Page, Henderson and Pabis, Midilli et al. และ Wang and Singh โดยสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Afolabi (2014) ซึ่งศึกษาจลพลศาสตร์การอบแห้งแบบชั้นบางของกระเจี๊ยบเขียวด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เช่นเดียวกับผลงานวิจัยของ Akpinar and Bicer (2007) และ Akpinar (2008) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเซอร์รี่เปรี้ยวและใบหม่อนขาวในระหว่างเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ (solar dryer) และการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ จากผลการทดลองพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Logarithmic มีความแม่นยำในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกระเจี๊ยบเขียวและเซอร์รี่เปรี้ยวในระหว่างการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ได้เหมาะสมที่สุด

ตาราง 6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และการวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองของ Midilli et al. สามารถทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งสำหรับเตาด้วยลมร้อนได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่า R^2 โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.9993-0.9999 ซึ่งมีค่ามากกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton, Page, Modified Page, Henderson and Pabis, Logarithmic และ Wang and Singh นอกจากนี้ค่า χ^2 และค่า RMSE มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1174×10^{-4} - 0.6652×10^{-4} และ 0.0033-0.0074 ตามลำดับ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli et al. เป็นแบบจำลองที่มีรูปแบบสมการที่เหมาะสมที่สุดในการอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งสำหรับเตาด้วยลมร้อน และจากการศึกษางานวิจัยหลายฉบับยืนยันว่าแบบจำลองของ Midilli et al. เหมาะสำหรับการอธิบายเส้นโค้งการอบแห้งด้วยลมร้อนของวัสดุทางการเกษตรจำนวนมาก เช่น ผลงานวิจัยของ Thao and Noomhorm (2011); Pongtong et al. (2011); จินตนาพร และคณะ (2555) ซึ่งพบว่าแบบจำลองของ Midilli et al. มีความเหมาะสมในการทำนาย

การเปลี่ยนแปลงความชื้นของมันเทศ เปลือกทับทิม และกากมะพร้าว

ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งสำหรับเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่า แบบจำลองของ Logarithmic สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของสำหรับเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 ในช่วง 0.9962-0.9985 ซึ่งมีค่ามากกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบอื่นๆ และมีค่า χ^2 และค่า $RMSE$ ต่ำกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบอื่นๆ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1.7294×10^{-4} - 4.9047×10^{-4} และ 0.0129-0.0214 ตามลำดับ (ตาราง 7)

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งของสำหรับเตาแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นเทียบกับเวลาในการอบแห้งสำหรับเตาภายในการอบแห้งที่อุณหภูมิร้อน และระดับความเข้มของคลื่นไมโครเวฟที่ระดับต่างๆ โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้งนั้นเป็นกระบวนการที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-dependent process) ทั้งนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งที่ได้สามารถนำมาใช้ในการจำลองการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาใดๆ ในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งจะช่วยให้ได้ข้อมูลจำนวนมากอย่างละเอียดทั้งข้อมูลซึ่งอาจจะวัดได้ยากหรือวัดไม่ได้เลยในห้องปฏิบัติการ และยังสามารถประหยัดได้ทั้งเวลารวมทั้งค่าใช้จ่ายในการทดลอง ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ในรูปแบบจำลองที่จะนำไปสู่การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้ง (optimum condition) ได้อย่างแม่นยำ

ตาราง 5 ค่าคงที่การอบแห้งของสำหรับเตาด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

drying model	empirical drying model constants	analytical parameters		
		R^2	$\chi^2 \times 10^{-4}$	$RMSE$
Newton	$k = 0.0048$	0.9923	6.1099	0.0244
Page	$k = 0.0170, n = 0.7706$	0.9954	3.1478	0.0172
Modified Page	$k = 0.0051, n = 0.7706$	0.9956	2.9426	0.0166
Midilli et al.	$k = 0.0679, a = 1.4882, b = 2.88 \times 10^{-6}, n = 0.5787$	0.9640	83.0527	0.0856
Henderson and Pabis	$k = 0.0045, a = 0.9521$	0.9918	5.5929	0.0229
Logarithmic	$k = 0.0051, a = 0.9466, c = 0.0286$	0.9969	2.7646	0.0159
Wang and Singh	$a = -0.0017, b = 6.79 \times 10^{-7}$	0.8401	312.4044	0.1715

หมายเหตุ k คือค่าคงที่การอบแห้ง; n คือค่าดัชนีการอบแห้ง; a, b, c คือค่าคงที่ของแบบจำลอง

ตาราง 6 ค่าคงที่การอบแห้งของสาหร่ายเตาด้วยลมร้อน

drying model	temperature (°C)	empirical drying model constants	analytical parameters		
			R^2	$\chi^2 \times 10^{-4}$	RMSE
Newton	60	$k = 0.0116$	0.9908	8.0502	0.0281
	65	$k = 0.0181$	0.9849	11.9662	0.0342
	70	$k = 0.0285$	0.9947	3.9079	0.0195
	75	$k = 0.0412$	0.9971	2.4145	0.0152
Page	60	$k = 0.0279, n = 0.8127$	0.9981	1.5993	0.0124
	65	$k = 0.0460, n = 0.7780$	0.9953	3.7329	0.0189
	70	$k = 0.0425, n = 0.8938$	0.9964	2.7771	0.0161
	75	$k = 0.0427, n = 0.9897$	0.9971	2.5196	0.0152
Modified Page	60	$k = 0.0122, n = 0.8127$	0.9980	1.6024	0.0124
	65	$k = 0.0191, n = 0.7780$	0.9952	3.7332	0.0189
	70	$k = 0.0292, n = 0.8938$	0.9964	2.7771	0.0161
	75	$k = 0.0413, n = 0.9896$	0.9971	2.5198	0.0152
Midilli et al.	60	$k = 0.0693, a = 1.2407, b = -5.65 \times 10^{-6}, n = 0.6578$	0.9999	0.1174	0.0033
	65	$k = 0.1059, a = 1.6649, b = -1.65 \times 10^{-5}, n = 0.5141$	0.9994	0.4444	0.0063
	70	$k = 0.1432, a = 1.4824, b = 3.11 \times 10^{-5}, n = 0.6569$	0.9993	0.5606	0.0070
	75	$k = 0.1713, a = 1.6175, b = 5.47 \times 10^{-5}, n = 0.6918$	0.9993	0.6652	0.0074
Henderson and Pabis	60	$k = 0.0108, a = 0.9375$	0.9928	5.8140	0.0237
	65	$k = 0.0169, a = 0.9417$	0.9873	9.9644	0.0308
	70	$k = 0.0282, a = 0.9894$	0.9948	3.9467	0.0192
	75	$k = 0.0415, a = 1.0066$	0.9971	2.4833	0.0151
Logarithmic	60	$k = 0.0123, a = 0.9382, c = 0.0280$	0.9959	3.2827	0.0177
	65	$k = 0.0199, a = 0.9421, c = 0.0346$	0.9937	4.9641	0.0215
	70	$k = 0.0306, a = 0.9824, c = 0.0208$	0.9982	1.4091	0.0113
	75	$k = 0.0437, a = 0.9984, c = 0.0148$	0.9989	1.0625	0.0096
Wang and Singh	60	$a = -0.0055, b = 7.02 \times 10^{-6}$	0.9147	165.7988	0.1266
	65	$a = -0.0078, b = 1.42 \times 10^{-5}$	0.8902	209.7056	0.1414
	70	$a = -0.0111, b = 2.78 \times 10^{-5}$	0.8629	243.8225	0.1512
	75	$a = -0.0158, b = 5.58 \times 10^{-5}$	0.8580	253.0057	0.1520

หมายเหตุ k คือค่าคงที่การอบแห้ง; n คือค่าดัชนีการอบแห้ง; a, b, c คือค่าคงที่ของแบบจำลอง

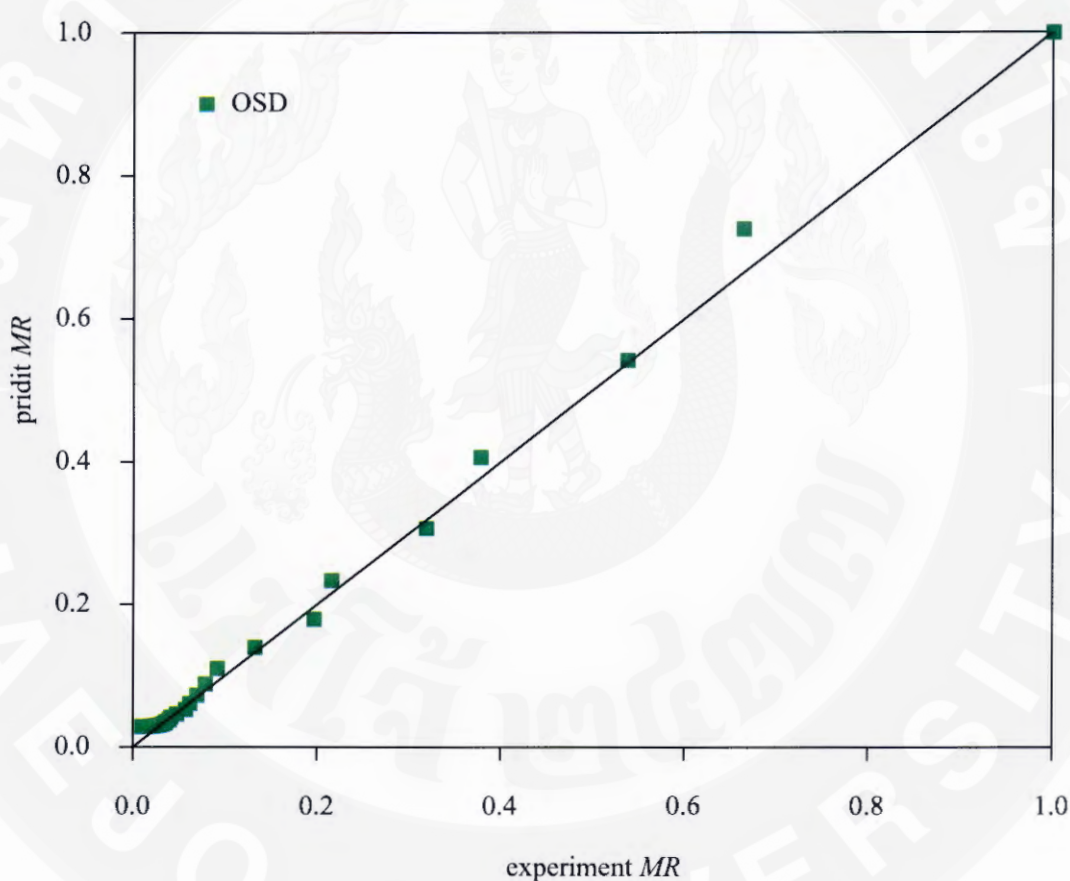
ตาราง 7 ค่าคงที่การอบแห้งของสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟ

drying model	microwave power (W/g)	empirical drying model constants	analytical parameters		
			R^2	$\chi^2 \times 10^{-4}$	RMSE
Newton	0.77	$k = 0.0549$	0.9966	3.8535	0.0195
	1.55	$k = 0.1004$	0.9937	8.3722	0.0286
	2.00	$k = 0.1382$	0.9962	5.0429	0.0221
	2.50	$k = 0.2154$	0.9969	3.6676	0.0188
Page	0.77	$k = 0.0616, n = 0.9628$	0.9970	3.6093	0.0188
	1.55	$k = 0.0961, n = 1.0167$	0.9936	8.5043	0.0285
	2.00	$k = 0.1405, n = 0.9922$	0.9962	5.1834	0.0221
	2.50	$k = 0.2274, n = 0.9683$	0.9971	3.6306	0.0183
Modified Page	0.77	$k = 0.0553, n = 0.9628$	0.9970	3.6092	0.0188
	1.55	$k = 0.1002, n = 1.0167$	0.9936	8.4988	0.0285
	2.00	$k = 0.1384, n = 0.9923$	0.9962	5.1834	0.0221
	2.50	$k = 0.2167, n = 0.9683$	0.9971	3.6306	0.0183
Midilli et al.	0.77	$k = 0.0672, a = 1.0481, b = 0.0003, n = 0.9619$	0.9978	2.6110	0.0158
	1.55	$k = 0.0984, a = 1.0482, b = 0.0009, n = 1.0537$	0.9962	5.0560	0.0215
	2.00	$k = 0.1408, a = 1.0313, b = 0.0010, n = 1.0288$	0.9976	3.2400	0.0169
	2.50	$k = 0.2277, a = 1.0208, b = 0.0012, n = 1.0018$	0.9979	2.7458	0.0152
Henderson and Pabis	0.77	$k = 0.0557, a = 1.0141$	0.9966	3.7884	0.0192
	1.55	$k = 0.1051, a = 1.0450$	0.9944	7.3005	0.0265
	2.00	$k = 0.1417, a = 1.0242$	0.9963	4.7959	0.0213
	2.50	$k = 0.2175, a = 1.0099$	0.9969	3.7525	0.0186
Logarithmic	0.77	$k = 0.0625, a = 1.0094, c = 0.0310$	0.9985	1.7294	0.0129
	1.55	$k = 0.1178, a = 1.0370, c = 0.0324$	0.9962	4.9047	0.0214
	2.00	$k = 0.1562, a = 1.0158, c = 0.0277$	0.9978	2.9837	0.0165
	2.50	$k = 0.2327, a = 1.0000, c = 0.0189$	0.9981	2.4111	0.0146
Wang and Singh	0.77	$a = -0.0353, b = 0.0003$	0.9630	56.4758	0.0743
	1.55	$a = -0.0653, b = 0.0011$	0.9621	63.2153	0.0778
	2.00	$a = -0.0883, b = 0.0019$	0.9671	56.3133	0.0729
	2.50	$a = -0.1349, b = 0.0045$	0.9687	54.3522	0.0708

หมายเหตุ k คือค่าคงที่การอบแห้ง; n คือค่าดัชนีการอบแห้ง; a, b, c คือค่าคงที่ของแบบจำลอง

2. การทวนสอบความแม่นยำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งสาหร่ายเตา

การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งในรูปแบบของแบบจำลองเอมพิริคัลที่เหมาะสมในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อนและคลื่นไมโครเวฟ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli et al. มีความแม่นยำและเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นในการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อน ส่วนการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Logarithmic



ภาพ 16 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Logarithmic สำหรับการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

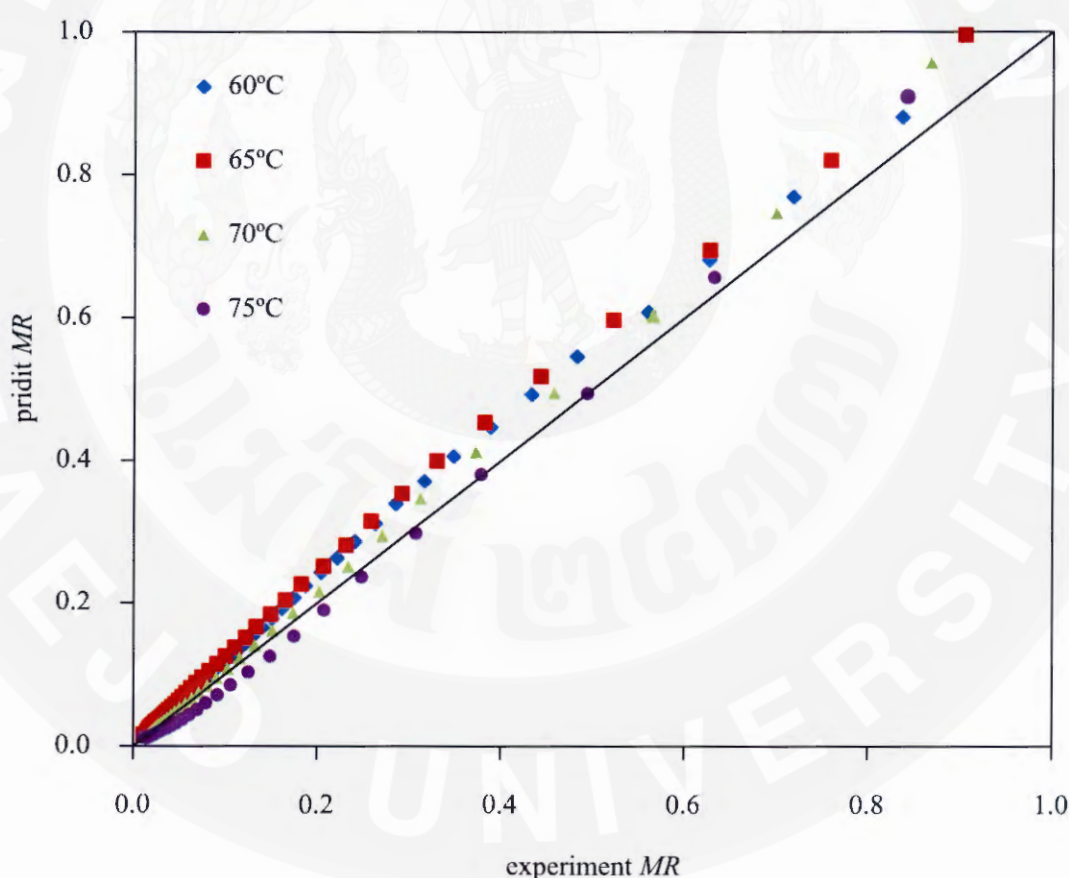
สมการทั่วไปสำหรับการคำนวณค่าคงที่การอบแห้ง (k) และค่าคงที่ของรูปแบบสมการ (a, b, n) ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของ Midilli et al. ในรูปแบบความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ โดยมีรูปแบบสมการดังแสดงในสมการ (25)-(28)

$$k = (9.00 \times 10^{-5})T^2 - 0.0078T + 0.2219 \quad (25)$$

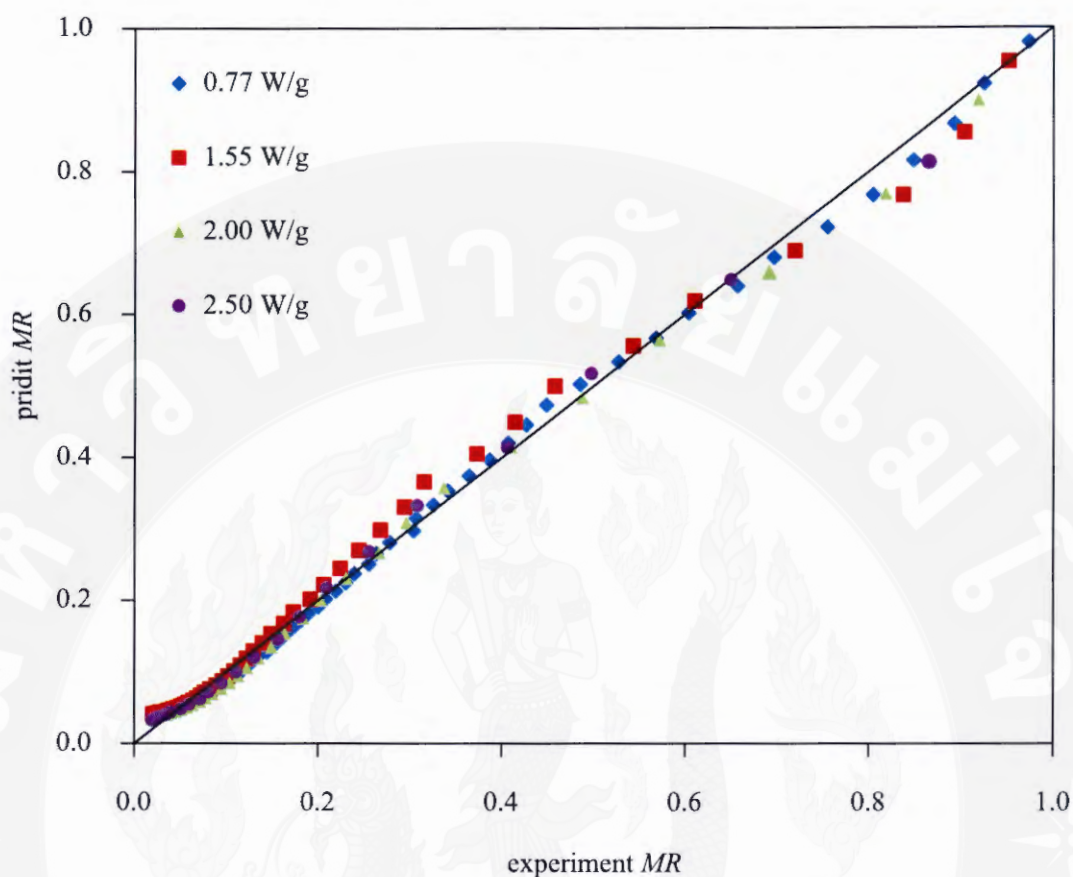
$$n = (1.67 \times 10^{-4})T^2 - 0.0201T + 1.3177 \quad (26)$$

$$a = 0.0004T^2 - 0.0440T + 2.5163 \quad (27)$$

$$b = (3.42 \times 10^{-6})T - 0.0002 \quad (28)$$



ภาพ 17 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli et al. สำหรับการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อน



ภาพ 18 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Logarithmic สำหรับการอบแห้งสำหรับเห็ดด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ในขณะที่สมการทั่วไปสำหรับการคำนวณค่าคงที่การอบแห้ง (k) และค่าคงที่ของรูปแบบสมการ (a , c) ของแบบจำลองของ Logarithmic ในรูปแบบความสัมพันธ์ของระดับความชื้นของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งมีรูปแบบของสมการดังแสดงในสมการ (29)-(31)

$$k = 0.0380P^2 - 0.0250P + 0.0602 \quad (29)$$

$$a = -0.0354P^2 + 0.1082P + 0.9483 \quad (30)$$

$$c = -0.0042P^2 + 0.0099P + 0.0261 \quad (31)$$

ภาพ 16-18 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Logarithmic สำหรับการอบแห้งสาหร่ายเตาดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli et al. สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 65, 70, 75°C และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Logarithmic สำหรับการอบแห้งสาหร่ายเตาดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความเข้ม 0.77, 1.55, 2.00, 2.50 W/g ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง โดยมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับเส้นทวนสอบความแม่นยำหรือเส้นตรงที่ความชัน 45° สามารถบอกได้ว่าค่าที่ได้จากรูปแบบสมการสามารถอธิบายหรือทำนายผลการทดลองได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นแนวทางเดียวกับผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการทวนสอบความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง (Ozkan et al., 2007; Wang et al., 2007; Assawarachan and Noomhorm, 2011; Pongtong et al., 2011; Thao and Noomhorm, 2011)

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งสาหร่ายเตาในรูปของแบบจำลองกึ่งทฤษฎี

การถ่ายเทความชื้นหรือมวลสารในระหว่างการอบแห้งสาหร่ายเตาสามารถอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองกึ่งทฤษฎี ซึ่งมีความสัมพันธ์อยู่ในรูปกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) จากผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ มีค่าเท่ากับ $0.48 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ และการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 65, 70, 75°C มีค่าเท่ากับ 1.72×10^{-10} , 2.32×10^{-10} , 3.24×10^{-10} , $4.51 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ตามลำดับ (ตาราง 8) ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 10^{-11} - $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ สำหรับการอบแห้งวัสดุอาหาร (Madamba et al., 1996; Sacilik and Elicin, 2006; Wang et al. 2006) และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Afolabi (2014) ซึ่งศึกษาจลพลศาสตร์การอบแห้งแบบชั้นบางของกระเจี๊ยบเขียวด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งด้วยเตาแสงอาทิตย์ และการอบแห้งด้วยลมร้อนในช่วงอุณหภูมิ 50-70 °C พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของกระเจี๊ยบเขียวในระหว่างการอบแห้งด้วยพลังงานอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 0.25×10^{-10} - $0.90 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ และการอบแห้งด้วยลมร้อนมีค่าอยู่ในช่วง 3.19×10^{-10} - $14.7 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ รวมทั้งรายงานวิจัยของ Pardeshi et al. (2009) ซึ่งได้ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของถั่วเขียวในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 55-75°C พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 3.95×10^{-10} ถึง $6.23 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ขณะที่งานวิจัยของ Kumar et al. (2012) มีค่าอยู่ระหว่าง 2.74×10^{-9} ถึง $4.64 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ของการอบแห้งกากแครอตด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60-75°C และการอบแห้งแอปเปิ้ลที่อุณหภูมิ 40-60°C มี

ค่าเท่ากับ 2.27×10^{-10} ถึง $4.97 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ (Sacilik and Elicin, 2006) เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟมีค่าเท่ากับ 2.74×10^{-7} , 5.02×10^{-7} , 6.92×10^{-7} และ $10.64 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ที่ระดับความเข้ม 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W/g ตามลำดับ (ตาราง 9) โดยที่ระดับความเข้มของคลื่นไมโครเวฟสูงจะส่งผลต่อการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของสาหร่ายเตา สอดคล้องกับผลงานวิจัยของปองพล และ ฤทธิชัย (2555) และงานวิจัยของ Özbek and Dadali (2007) ซึ่งศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของใบกะเพราในระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 164-752 W และการอบแห้งใบสะระแหน่ด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 180-900 W ตามลำดับ

ตาราง 8 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และการอบแห้งด้วยลมร้อน

drying method	temperature (°C)	slope $\times 10^{-4}$	$D_{eff} \times 10^{-10}$	R^2
OSD	-	0.3453	0.48	0.9563
HAD	60	1.2367	1.72	0.9898
	65	1.6722	2.32	0.9846
	70	2.3323	3.24	0.9351
	75	3.2540	4.51	0.8823

หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ($n=3$)

ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการอบแห้งด้วยลมร้อนและความเข้มของคลื่นไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้นจะเป็นตัวเร่งอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าของสาหร่ายเตา และมีค่าเท่ากับอัตราการเคลื่อนของน้ำภายในโครงสร้างที่มาเต็มเต็มบริเวณผิวหน้า ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทมวลสารในการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (surface diffusion) ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟจะมีมากกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟมีกลไกการเกิดความร้อนทั้งภายนอกและภายในเนื้อเยื่อของสาหร่ายเตา ส่งผลเกิดเป็นไออย่างรวดเร็วภายในวัสดุ โดยส่วนมากความชื้นเริ่มต้นสูงจะมีผลทำให้ความดันภายในเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วอันมีผลต่อเนื่องให้ของเหลวเคลื่อนที่

ออกจากวัสดุภายใต้อิทธิพลของความแตกต่างของความดันรวม นอกจากนี้กรณีนี้วัสดุมีค่าความชื้นเริ่มต้นที่สูงทำให้ความแตกต่างของความดันสูงขึ้นซึ่งมีผลอย่างมากต่อมวลความชื้นที่เคลื่อนที่ออกไปอย่างรวดเร็วกว่าปกติ ด้วยเหตุนี้จึงเรียกชนิดของปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์ปั๊มของเหลว (pumping effect) หรือการที่มีแรงซึ่งโดยปกติจะเป็นแรงดันไอกระทำให้ของเหลวเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวหน้าโดยตรงโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงสถานะ และปรากฏการณ์ดังกล่าวจะนำไปสู่การแห้งตัวอย่างรวดเร็วโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มการความร้อนเข้าไปอีก (ผดุงศักดิ์, 2551)

ตาราง 9 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟ

microwave power (W/g)	slope	$D_{eff} \times 10^{-7}$	R^2
0.77	0.0493	2.74	0.9915
1.55	0.0906	5.02	0.9875
2.00	0.1247	6.92	0.9901
2.50	0.1918	10.64	0.9945

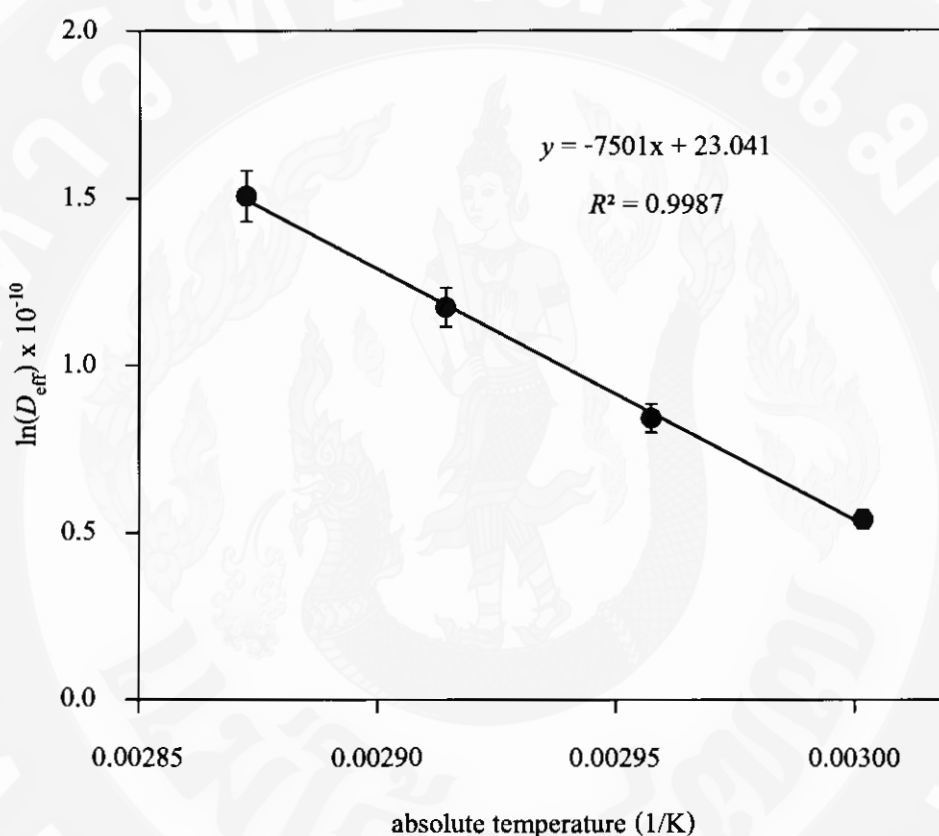
หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ($n=3$)

การหาค่าพลังงานกระตุ้นของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนสามารถคำนวณจากความสัมพันธ์ในรูปฟังก์ชันลอการิทึมของสมการอาร์เรเนียส (สมการ (8)) โดยสมการจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ดังแสดงในสมการ (32)

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \left(\frac{E_a}{RT} \right) \quad (32)$$

ค่าพลังงานกระตุ้นของการอบแห้งด้วยลมร้อน สามารถคำนวณจากค่าความชัน (slope) ของกราฟเส้นตรงที่พล็อตระหว่าง $\ln(D_{eff})$ และ $(1/T)$ จากการทดลองพบว่าค่า E_a ของสาหร่ายเตามีค่าเท่ากับ 62.36 kJ/mol ดังแสดงในภาพ 19 ในขณะที่ค่า E_a ของการอบแห้งมันเทศด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 45-65°C มีค่าเท่ากับ 35.88 kJ/mol ในขณะที่การอบแห้งกากแครอตที่

อุณหภูมิ 60-75°C มีค่า E_a เท่ากับ 23.05 kJ/mol เนื่องจากมันเทศและกากแครอตมีคุณลักษณะทางกายภาพ รวมทั้งโครงสร้างเซลล์และองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างจากสาหร่ายเตา ดังนั้นค่า E_a ของการอบแห้งอาหารหรือวัสดุชีวภาพด้วยลมร้อนจะขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารหรือวัสดุชีวภาพ และระดับอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง

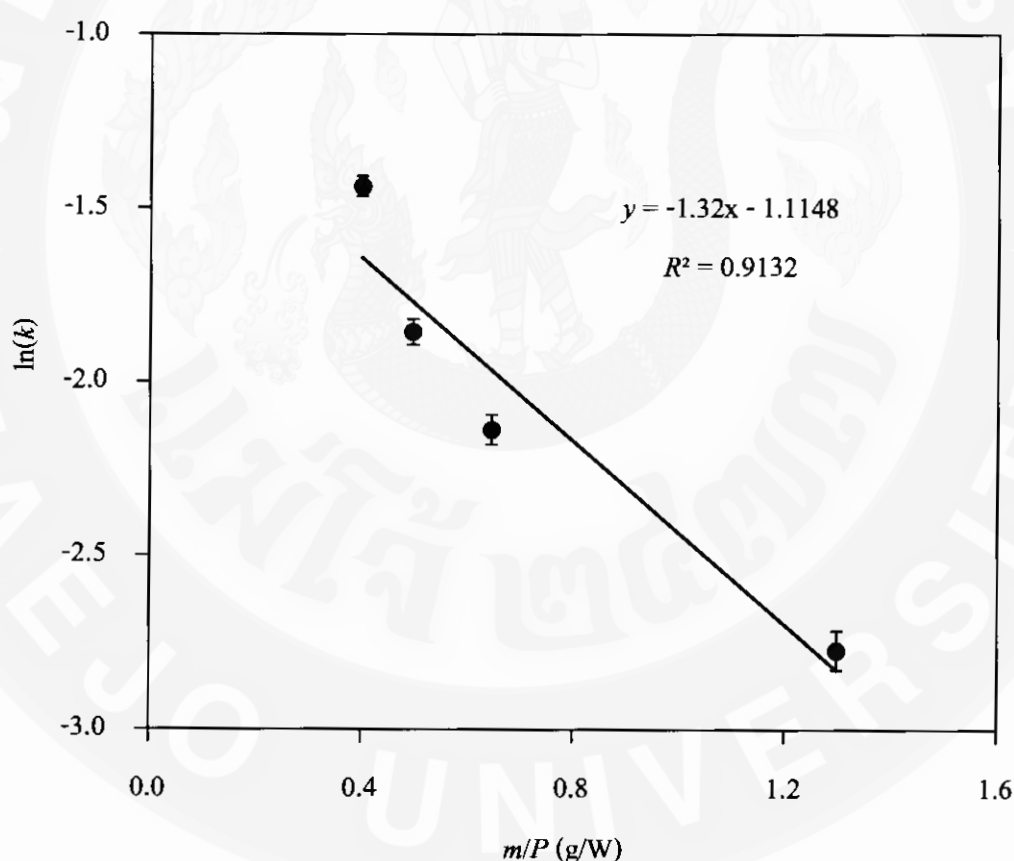


ภาพ 19 ความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียสระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและอุณหภูมิในการอบแห้ง

การหาค่าพลังงานกระตุ้นของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ สามารถคำนวณจากความสัมพันธ์ในรูปฟังก์ชันลอการิทึมของสมการอาร์เรเนียส (สมการ (9)) โดยสมการจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ดังแสดงในสมการ (33)

$$\ln k = \ln k_0 - \left(\frac{E_a \cdot m}{P} \right) \quad (33)$$

โดยค่าพลังงานกระตุ้นของสาหร่ายเตา (E_d) สามารถคำนวณจากค่าความชันของกราฟเส้นตรงที่พล็อตระหว่าง $\ln(k)$ และ น้ำหนักของสาหร่ายเตาต่อพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ (m/P) พบว่าค่า E_d มีค่าเท่ากับ 1.32 W/g (ภาพ 20) ในขณะที่ค่า E_d ของการอบแห้งใบสะระแหน่ด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 180-900 W (Özbek and Dadali, 2007) มีค่าอยู่ระหว่าง 11.05-12.28 W/g ซึ่งมีความมากกว่า เนื่องจากใบสะระแหน่มีคุณลักษณะทางกายภาพ รวมทั้งโครงสร้างเซลล์และองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างจากสาหร่ายเตา อีกทั้งใบสะระแหน่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่าสาหร่ายเตาจึงทำให้ต้องใช้พลังงานกระตุ้นเพื่อระเหยนํ้ามากกว่าสาหร่ายเตาถึง 9.23 เท่า ดังนั้น ค่า E_d ของการอบแห้งอาหารหรือวัสดุชีวภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟจะขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารหรือวัสดุชีวภาพ และระดับความชื้นของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในการอบแห้ง

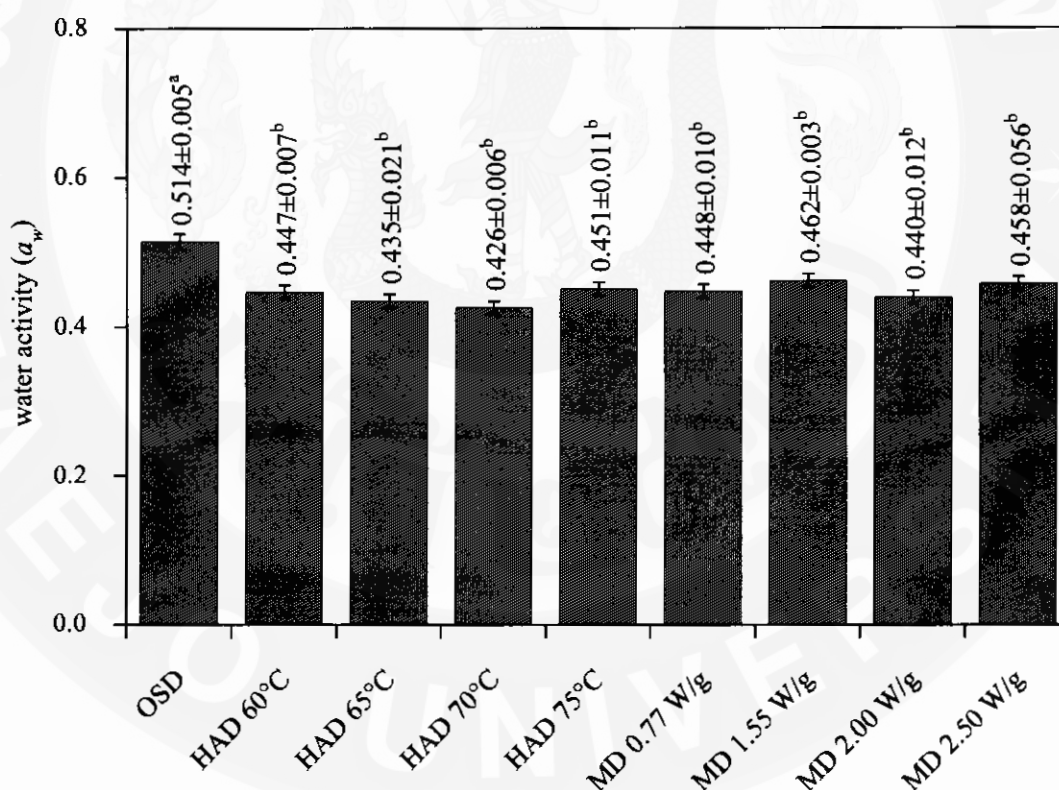


ภาพ 20 ความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียสระหว่างค่าคงที่การอบแห้งและน้ำหนักของสาหร่ายเตาต่อระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ

ผลการศึกษาสภาวะและวิธีการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลง คุณภาพของสาหร่ายเตา

1. ผลการวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอคทีวิตี (a_w)

การตรวจวัดค่า a_w ของสาหร่ายเตาอบแห้ง พบว่า ค่า a_w ที่ได้จากการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60-75°C และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความเข้ม 0.77-2.50 W/g มีค่าอยู่ในช่วง 0.426±0.006 ถึง 0.514±0.005 ซึ่งเมื่อพิจารณาวิธีการอบแห้งทั้ง 3 กระบวนการ พบว่า ค่า a_w อยู่ในระดับที่ต่ำกว่า 0.6 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ปลอดภัยจากจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเน่าเสีย หรือการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง (ภาพ 21)

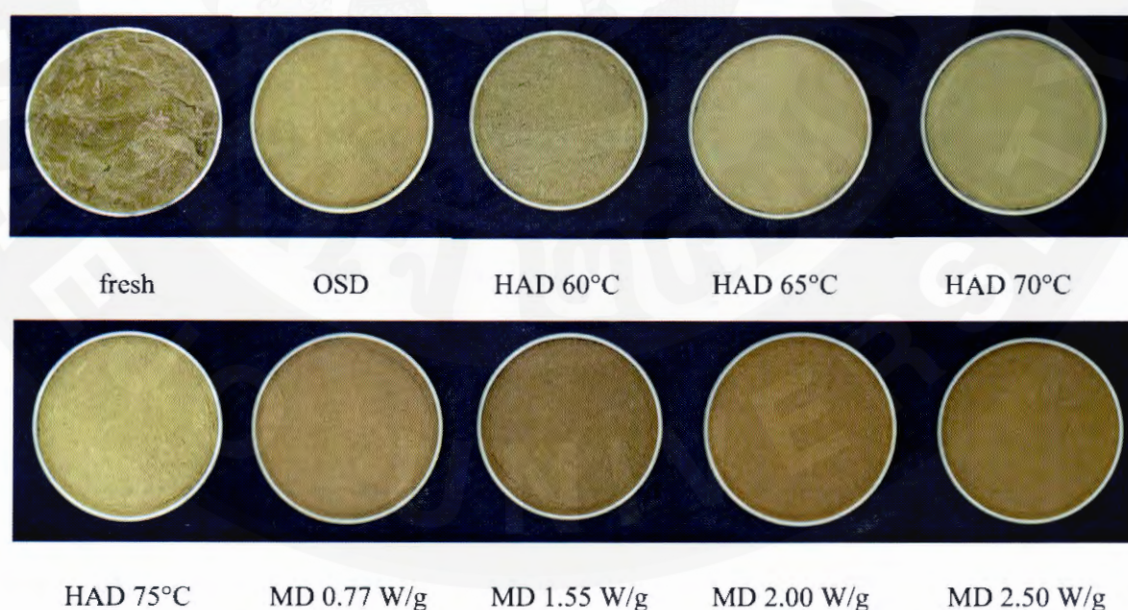


ภาพ 21 การเปรียบเทียบค่า a_w ของสาหร่ายเตา

- หมายเหตุ
- ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($n=3$)
 - ^{a-b} อักษรกำกับที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p \leq 0.05$)

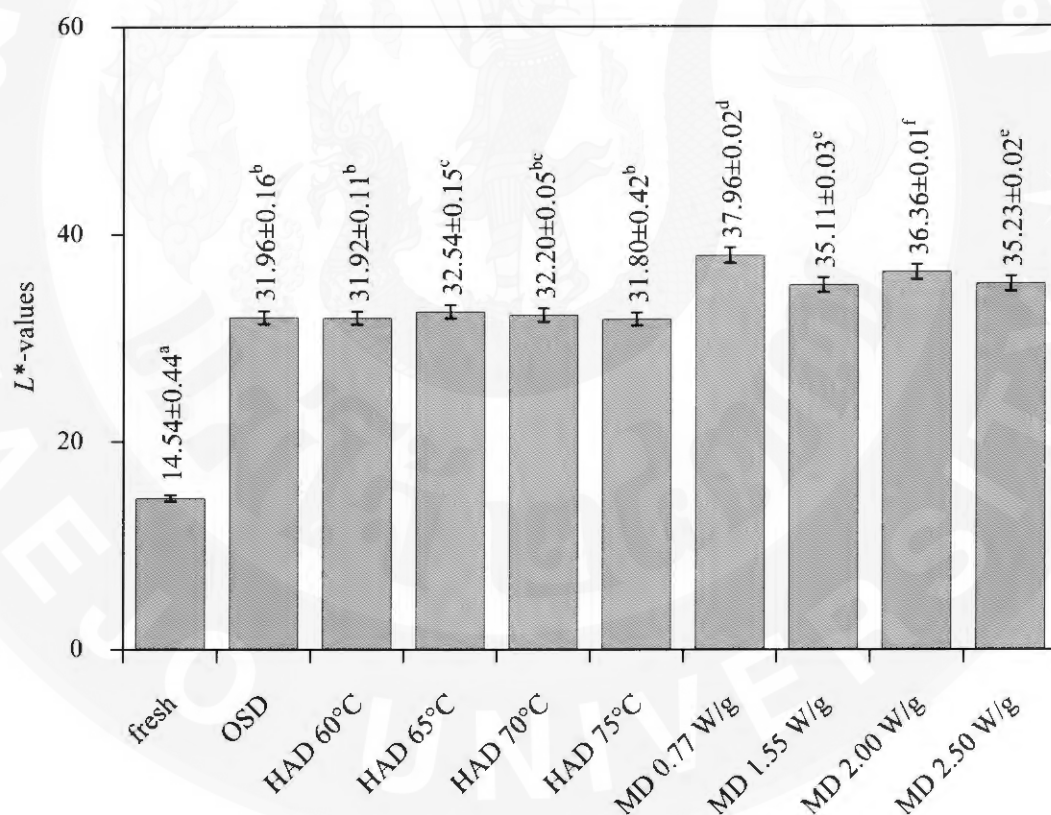
2. ผลการวิเคราะห์ค่าสี

คุณภาพสีเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งในการยอมรับของผู้บริโภคต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้ง จากการวิจัยพบว่า 40% ของผู้บริโภคจะพิจารณาคุณภาพสีเป็นเกณฑ์หลักในการตัดสินใจซื้อ (Assawarachan and Noomhorm, 2008) โดยสารให้สีในผลิตภัณฑ์อาหารเรียกว่า รงควัตถุ เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ทั้งในรูปแบบปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ (enzymatic browning reaction) และปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ (non-enzymatic browning reaction) ดังนั้นในการเปรียบเทียบคุณภาพสีของสาหร่ายเตาอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ ใช้ระบบสี CIB($L^*-a^*-b^*$) โดยจะเน้นการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง/ความมืด (L^*) ซึ่งเป็นผลกระทบโดยตรงของอัตราการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล และการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นสีแดง/สีเขียว (a^*) ซึ่งเป็นผลกระทบของการสูญเสียรงควัตถุสีเขียวในระหว่างการอบแห้ง นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีในระหว่างการอบแห้งอยู่ในรูปของค่าความแตกต่างสีโดยรวม (ΔE) โดยเป็นค่าที่บอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของสาหร่ายเตาอบแห้งที่วิธีการและสภาวะต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบกับค่าสีของสาหร่ายเตาสด และระบบมุนเซล ได้แก่ ค่าความสด (C^*) และค่าสีส้ม (h°) ภาพ 22 แสดงสีของสาหร่ายเตาอบแห้งที่สภาวะต่างๆ



ภาพ 22 การเปรียบเทียบสีของสาหร่ายเตาสดและสาหร่ายเตาอบแห้ง

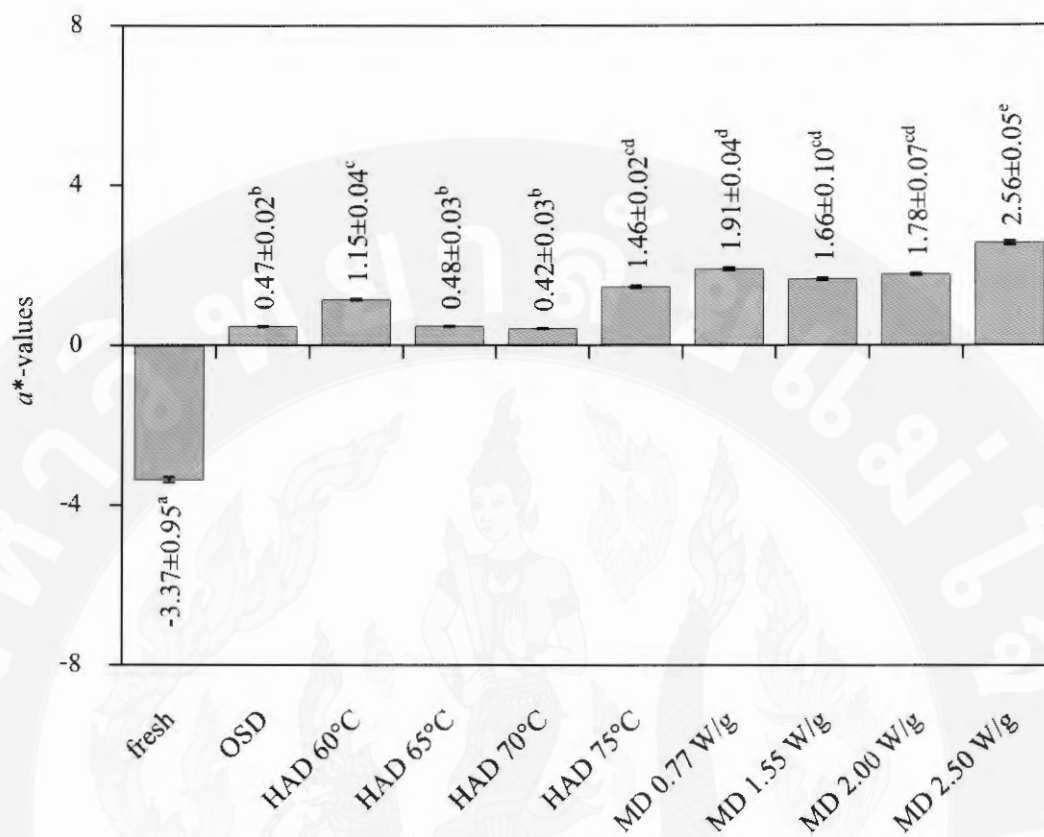
การเปลี่ยนแปลงสีต่างๆ ของสาหร่ายเตาที่เกิดขึ้นในระหว่างการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้นเป็นกระบวนการที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-dependent process) และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับสถานะการอบแห้ง เช่น อุณหภูมิลมร้อน ระดับความเข้มข้นของคลื่นไมโครเวฟหรืออุณหภูมิเฉลี่ยของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้ง ภาพ 23 - ภาพ 28 แสดงการเปรียบเทียบค่า L^* , a^* , b^* , ΔE , C^* และ h° ของสาหร่ายเตาสด สาหร่ายเตาที่ผ่านการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ผลการศึกษาพบว่าสาหร่ายเตาสดมีค่า L^* , a^* , b^* , C^* และ h° เท่ากับ 14.54 ± 0.44 , -3.37 ± 0.95 , 15.34 ± 4.86 , 15.69 ± 4.93 และ 102.40 ± 1.33 ตามลำดับ ในขณะที่การอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ มีค่า L^* , a^* , b^* , ΔE , C^* และ h° เท่ากับ 31.96 ± 0.16 , 0.47 ± 0.02 , 19.34 ± 0.07 , 18.29 ± 0.14 , 19.39 ± 0.06 และ 85.69 ± 0.29 ตามลำดับ



ภาพ 23 การเปรียบเทียบค่า L^* ของสาหร่ายเตา

- หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($n=3$)
 - ^{a-f} อักษรกำกับที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p \leq 0.05$)

การศึกษาผลของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีของสาหร่ายเตา พบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 65, 70 และ 75°C มีค่า L^* เท่ากับ 31.92 ± 0.11 , 32.54 ± 0.15 , 32.20 ± 0.05 และ 31.80 ± 0.42 ตามลำดับ และค่า b^* มีค่าเท่ากับ 17.77 ± 0.15 , 17.74 ± 0.14 , 15.71 ± 0.13 และ 18.48 ± 0.27 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิลมร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีของสาหร่ายเตาหลังการอบแห้ง พบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อค่า L^* และค่า b^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อสภาวะการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้นส่งผลทำให้สาหร่ายเตามีค่า L^* ลดลง ในขณะที่ค่า b^* เพิ่มขึ้น โดยสภาวะการอบแห้งที่มีค่า L^* มากบ่งบอกถึงสีขาวหรือความสว่างของสาหร่ายเตาอบแห้ง และสาหร่ายเตาอบแห้งที่มีค่า b^* มากขึ้นหรือมีค่าเข้าใกล้สีเหลืองแสดงถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ผลการศึกษาพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 65°C มีค่า L^* มากที่สุด แต่ในขณะค่า b^* มีค่าต่ำกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 75°C ทั้งนี้ อาจเกิดจากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C ใช้เวลาในการอบแห้งยาวนานที่สุดจึงทำให้สาหร่ายเตาจะสัมผัสอากาศร้อนเป็นเวลานานส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า L^* และค่า b^* เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ (enzymatic browning reaction) ทำให้เกิดปฏิกิริยาสารประกอบโมโนฟีนอลที่อยู่ในเซลล์พืชสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศและมีเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (PPO) ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชันได้เป็นออร์โท-ไดฟีนอล (o-diphenol) ถึงแม้ว่าสาหร่ายเตาอบแห้งที่ 60°C จะใช้ตัวกลางอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าสภาวะอื่น ๆ แต่ทำให้สาหร่ายเตาสัมผัสกับออกซิเจนเป็นเวลานาน ส่งผลทำให้เร่งปฏิกิริยาสีน้ำตาลด้วยเอนไซม์ PPO กับกรดอะมิโนได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำตาล สอดคล้องกับงานวิจัยของ Therdtthai and Zhou (2009) ซึ่งศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของใบสาระแหน่อบแห้ง พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่า L^* ที่อุณหภูมิต่ำและใช้เวลานานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเช่นเดียวกัน รวมทั้งผลงานวิจัยของ ฤทธิชัย และคณะ (2554) ซึ่งศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกทับทิมอบแห้งด้วยลมร้อน ส่วนสภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 75°C สาหร่ายเตาได้รับความร้อนสูงเกินไปจึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้สาหร่ายเตามีสีน้ำตาลเข้ม นั่นคือ ค่า L^* ลดลงและค่า b^* เพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากสาหร่ายเตามีองค์ประกอบของโปรตีนและน้ำตาล ส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ (non enzymatic browning reaction) ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง เรียกว่า ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) โดยในระหว่างกระบวนการอบแห้งจะเกิดการสูญเสีย น้ำ การสลายตัว (degradation) และมีการรวมตัวกัน (condensation) ของหมู่อะมิโนหรือโปรตีนกับสารประกอบรีดิวซิง โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนมีสีเหลืองจนเป็นสีน้ำตาล



ภาพ 24 การเปรียบเทียบค่า a^* ของสาหร่ายเตา

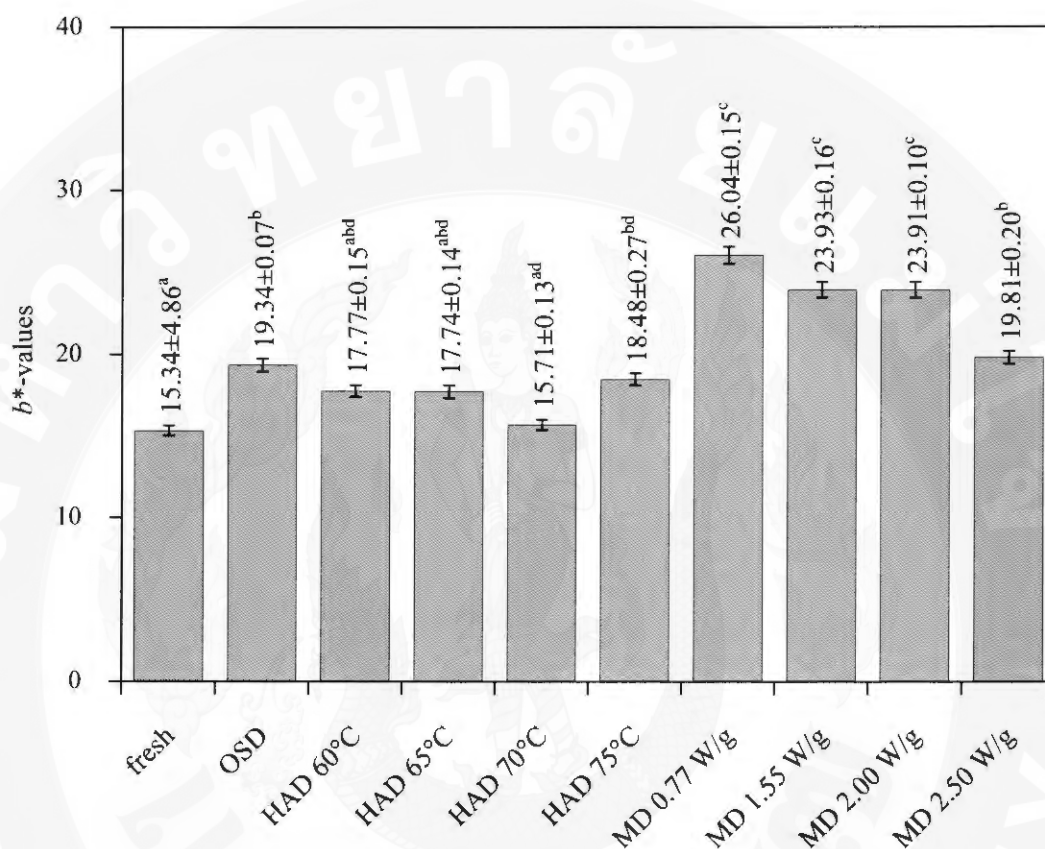
- หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($n=3$)
 - ^{a-c} อักษรกำกับที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p \leq 0.05$)

ค่า a^* เป็นค่าสีที่สามารถบ่งบอกถึงอัตราการสลายตัวของรงควัตถุหรือปริมาณคลอโรฟิลล์ที่หลงเหลือในระหว่างการอบแห้ง โดยสาหร่ายเตาอบแห้งมีค่า a^* เพิ่มขึ้น แสดงว่ามีปริมาณคลอโรฟิลล์น้อยลง ในขณะที่ค่า ΔE เป็นค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของสาหร่ายเตาอบแห้งโดยเปรียบเทียบกับค่าสีของสาหร่ายเตาสด ค่า a^* ของการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 65, 70 และ 75°C มีค่าเท่ากับ 1.15 ± 0.04 , 0.48 ± 0.03 , 0.42 ± 0.03 และ 1.46 ± 0.02 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า a^* ของสาหร่ายเตาที่สภาวะการอบแห้งต่างๆ พบว่า สภาวะที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อค่า a^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นมีผลทำให้สาหร่ายเตามีค่า a^* เพิ่มขึ้น ทั้งนี้การอบแห้งที่อุณหภูมิ 75°C มีค่า a^* มากที่สุด ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงทำให้สาหร่ายเตามีสีเหลืองน้ำตาลมากขึ้น โดยเกิดจาก

ปฏิกิริยาเมตลาร์ด ทั้งนี้สภาวะอบแห้งที่มีค่า a^* ต่ำที่สุด คือที่อุณหภูมิ 70°C ซึ่งอาจบ่งบอกอัตราการสูญเสียแรงกดหรือคอลลอยด์ในปริมาณต่ำ เช่นเดียวกับค่า ΔE คือ 18.13 ± 0.11 , 18.56 ± 0.14 , 18.07 ± 0.05 และ 18.21 ± 0.36 ที่อุณหภูมิ 60, 65, 70 และ 75°C ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า ΔE ของสภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า มีผลต่อค่า ΔE อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่อใช้อุณหภูมิต่างกันมีผลทำให้สาหร่ายเดามีค่า ΔE เพิ่มขึ้น โดยสาหร่ายเดอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 75°C มีค่า ΔE มากที่สุด อาจเป็นผลมาจากอุณหภูมิต่างกันที่สูงทำให้สาหร่ายเดได้รับความร้อนในปริมาณมากและเข้าไปทำลายแรงกดหรือสารให้สีในสาหร่ายเด และในขณะที่ยังการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C ใช้เวลาในการอบแห้งนาน ส่งผลกระทบต่อการสูญเสียแรงกดหรือสารให้สีในสาหร่ายเดเช่นกัน ดังนั้น การอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งสาหร่ายเดด้วยลมร้อน เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีต่ำที่สุด โดยค่า C^* มีค่า 17.81 ± 0.15 , 17.75 ± 0.14 , 15.72 ± 0.12 , 18.55 ± 0.27 ส่วนค่า h° มีค่าเท่ากับ 86.31 ± 0.16 , 88.45 ± 0.10 , 88.47 ± 0.12 , 85.48 ± 0.05 ของการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 65, 70 และ 75°C ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงสีของสาหร่ายเดจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และออกซิเจนในระบบ โดยการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูง เวลานาน หรือออกซิเจนในระบบในปริมาณมากจะเป็นการกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีได้มากขึ้น

การเปลี่ยนแปลงสีของสาหร่ายเดในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความเข้ม 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W/g มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีหลังการอบแห้ง โดยค่า L^* ของสาหร่ายเดอบแห้งที่ระดับความเข้ม 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W/g มีค่าเท่ากับ 37.96 ± 0.02 , 35.11 ± 0.03 , 36.36 ± 0.01 และ 35.23 ± 0.02 ตามลำดับ สอดคล้องกับค่า b^* มีค่าเท่ากับ 26.04 ± 0.15 , 23.93 ± 0.16 , 23.91 ± 0.10 และ 19.81 ± 0.20 ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าสภาวะที่ใช้ในการอบแห้งมีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ต่อค่า L^* และค่า b^* เมื่อใช้ความเข้มของคลื่นไมโครเวฟในการอบแห้งสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่า L^* และค่า b^* ของสาหร่ายเดอบแห้งมีค่าลดลง โดยสาหร่ายเดอบแห้งที่ระดับความเข้ม 2.50 W/g มีค่า L^* และค่า b^* น้อยที่สุด ในขณะที่สาหร่ายเดอบแห้งที่ระดับ 0.77 W/g มีค่า L^* มากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิจุดเดือดของสาหร่ายเดในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับ 2.50 W/g มีค่าประมาณ $84.5\text{--}96.7^{\circ}\text{C}$ แต่อุณหภูมิจุดเดือดของสาหร่ายเดอบแห้งที่ระดับ 0.77 W/g มีค่าประมาณ $78.4\text{--}86.9^{\circ}\text{C}$ โดยการอบแห้งที่ระดับ 2.50 W/g แม้ว่าจะใช้เวลาในการอบแห้งเพียง 25 min แต่สาหร่ายเดได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงเกินไป ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า L^* และค่า b^* ในขณะที่ยังการอบแห้งที่ระดับ 0.77 W/g แม้ว่า

สาหร่ายเตาจะได้รับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟเป็นเวลานาน แต่อุณหภูมิของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งไม่สูงมากจึงไม่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงค่า L^* และ b^* มาก

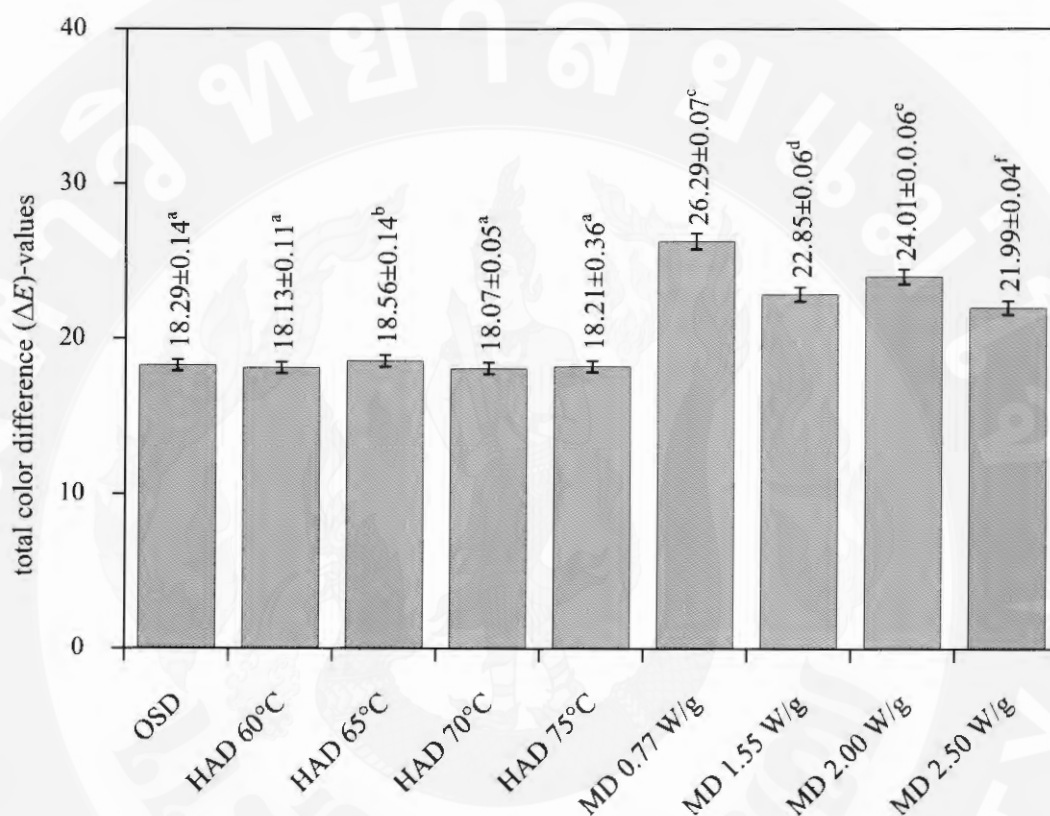


ภาพ 25 การเปรียบเทียบค่า b^* ของสาหร่ายเตา

- หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($n=3$)
 - ^{a-d} อักษรกำกับที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p \leq 0.05$)

ผลการศึกษพบว่าค่า a^* ของสาหร่ายเตาอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความเข้มข้น 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W/g มีค่าเท่ากับ 1.91 ± 0.04 , 1.66 ± 0.10 , 1.78 ± 0.07 และ 2.56 ± 0.05 ตามลำดับ โดยพบว่าสภาวะที่ใช้ในการอบแห้งมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ต่อค่า a^* กล่าวคือ เมื่อใช้สภาวะการอบแห้งที่ระดับความเข้มข้นของคลื่นไมโครเวฟสูงขึ้นส่งผลทำให้สาหร่ายเตามีค่า a^* เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าสภาวะการอบแห้งที่ระดับความเข้มข้นของคลื่นไมโครเวฟสูงขึ้นเป็นสาเหตุที่ทำให้สาหร่ายเตาอบแห้งมีสีแดงจนเป็นสีน้ำตาล อันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยา

สีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง จากภาพ 24 พบว่าที่ระดับพลังงาน 2.50 W/g มีค่า a^* มากที่สุด แต่ที่ระดับพลังงาน 1.55 W/g สำหรับเตาอบแห้งมีค่า a^* ต่ำที่สุด ซึ่งอาจบ่งบอกอัตราการสูญเสียแรงกดหรือคลอโรฟิลล์ที่ต่ำที่สุด

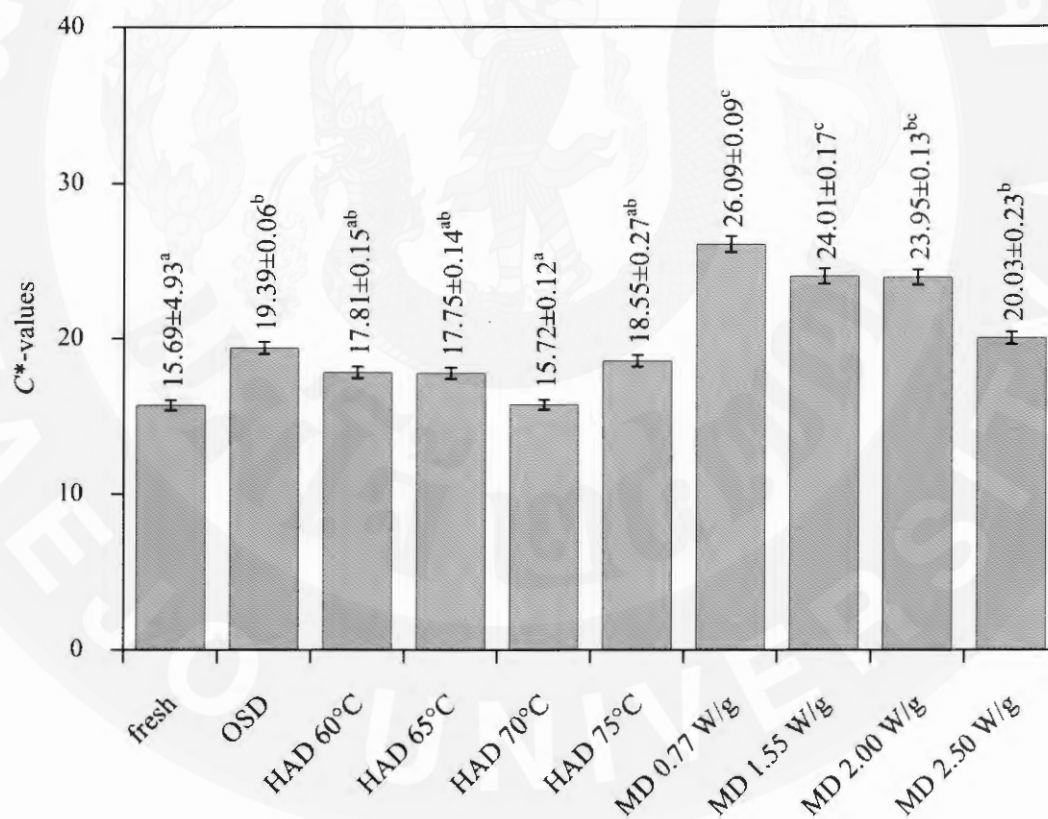


ภาพ 26 การเปรียบเทียบค่า ΔE ของสาหร่ายเตา

- หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($n=3$)
 - ^{a-f} อักษรกำกับที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p \leq 0.05$)

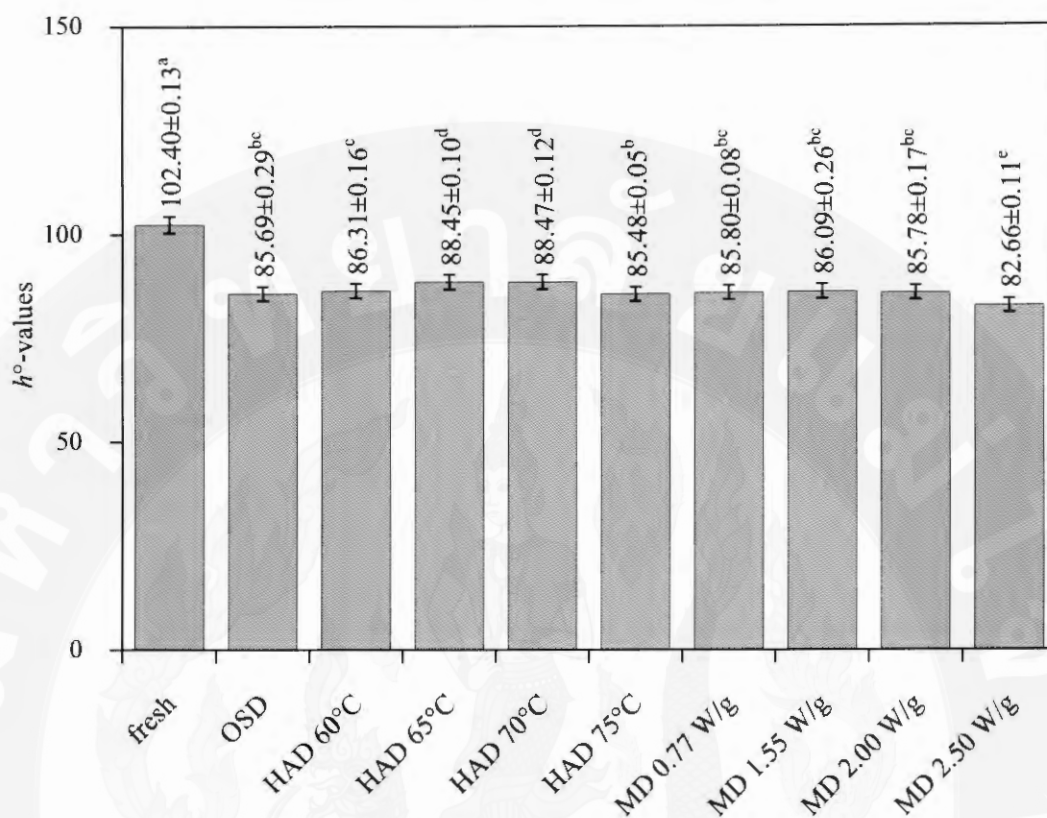
ค่า ΔE มีค่าเท่ากับ 26.29±0.07, 22.85±0.06, 24.01±0.06 และ 21.99±0.04 ที่ระดับความเข้มข้น 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W/g ตามลำดับ สาหร่ายเตาอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 2.50 W/g มีค่า ΔE มากที่สุด แต่ที่ระดับพลังงาน 1.55 W/g สาหร่ายเตาอบแห้งมีค่า ΔE น้อยที่สุด เนื่องจากที่ระดับพลังงาน 2.50 W/g คลื่นไมโครเวฟจะเหนี่ยวนำให้เกิดพลังงานความร้อนปริมาณมากในการอบแห้งจึงมีอัตราการอบแห้งที่รวดเร็ว แต่เนื่องจากสาหร่ายเตาได้รับพลังงานที่มากเกินไป ส่งผลให้ได้รับความร้อนในปริมาณมากและเข้าไปทำลายแรงกดหรือสารให้

สีในสาหร่ายเตา ในขณะที่การอบแห้งที่ระดับพลังงาน 0.77 W/g เป็นระดับพลังงานน้อยเกินไป ทำให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งนาน ส่งผลกระทบต่อการสูญเสียรงควัตถุหรือสารให้สีในสาหร่ายเตา เช่นกัน ดังนั้น การอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟจะต้องมีระดับพลังงานที่เหมาะสม โดยที่ระดับ 1.55 W/g สามารถลดการเปลี่ยนแปลงสีของสาหร่ายเตาได้เหมาะสม สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Demirhan and Özbek (2009); Therdthai and Zhou (2009); Dadali et al. (2007a) และ Dadali et al. (2007b) ซึ่งศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงสีของใบกะเพรา ใบสาระแน กระเจี๊ยบเขียว และผักขมในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่า C^* และค่า h^* ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ซึ่งมีค่า C^* และค่า h^* เท่ากับ 26.09 ± 0.09 , 24.01 ± 0.17 , 23.95 ± 0.13 , 20.03 ± 0.23 และ 85.80 ± 0.08 , 86.09 ± 0.26 , 85.78 ± 0.17 , 82.66 ± 0.11 ที่ระดับความเข้มข้นของคลื่นไมโครเวฟ 0.77, 1.55, 2.00, 2.50 W/g ตามลำดับ



ภาพ 27 การเปรียบเทียบค่า C^* ของสาหร่ายเตา

- หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($n=3$)
 - ^{a-c} อักษรกำกับที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p\leq0.05$)



ภาพ 28 การเปรียบเทียบค่า h° ของสาหร่ายเตา

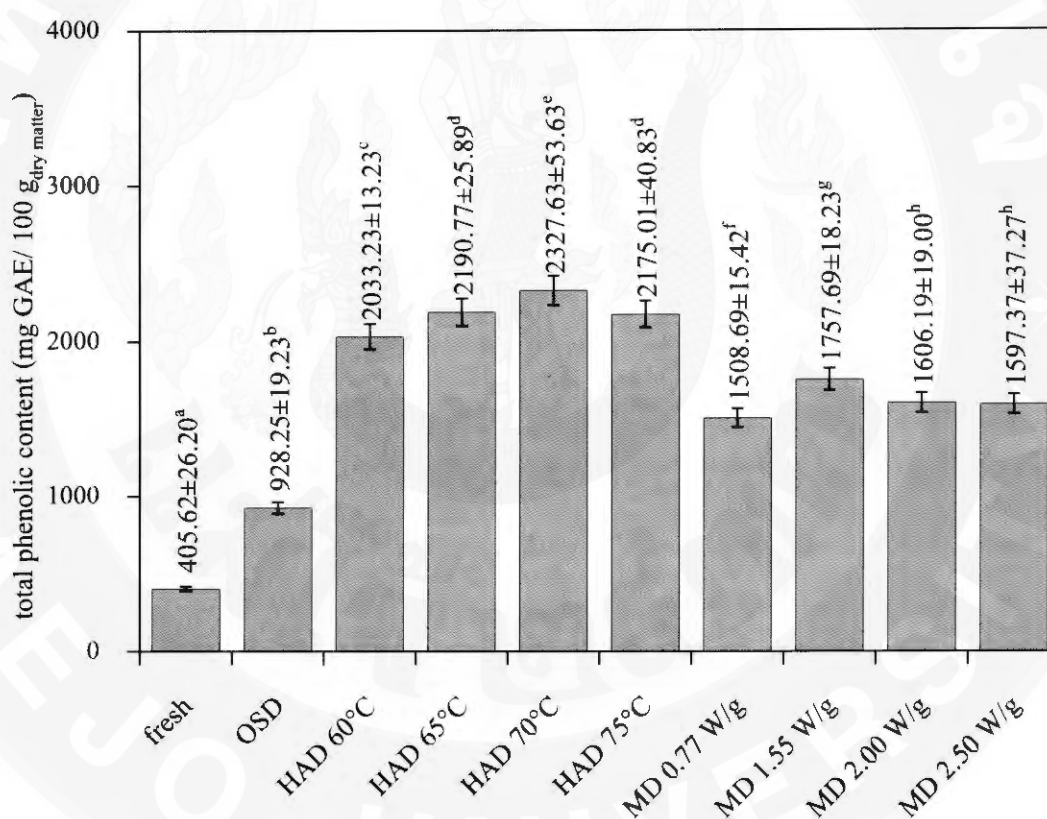
- หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($n=3$)
 - ^{a-c} อักษรกำกับที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาคุณภาพสีของสาหร่ายเตาอบแห้งที่ได้จากวิธีการอบแห้ง 3 วิธี พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนสามารถลดการสูญเสียคุณภาพสีของสาหร่ายเตาอบแห้งได้ดีที่สุด อาจเนื่องมาจากการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เกิดการถ่ายเทความร้อนและความชื้นระหว่างสาหร่ายเตากับอากาศร้อนเกิดได้ช้า จึงทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งนานส่งผลต่อการสูญเสียรงควัตถุหรือสารให้สีในสาหร่ายเตาอบแห้ง ในขณะที่การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟจะเหนี่ยวนำให้เกิดพลังงานความร้อนปริมาณมากในระหว่างการอบแห้งจึงทำให้สาหร่ายเตาได้รับพลังงานที่มากเกินไป ส่งผลให้ได้รับความร้อนในปริมาณมากและเข้าไปทำลายรงควัตถุหรือสารให้สีในสาหร่ายเตาเช่นกัน ดังนั้น สถานะที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่าย คือ การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C ซึ่งเป็นสถานะที่สามารถรักษาการเปลี่ยนแปลงสีของสาหร่ายเตาได้ดีที่สุด

3. ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

สารประกอบกลุ่มฟีนอลิกเป็นสารกลุ่มสำคัญซึ่งมีสมบัติในการต้านออกซิเดชัน โดยทำหน้าที่เป็นสารให้อิเล็กตรอนหรือเป็นตัวให้ไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระ จึงทำให้อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาจะถูกทำให้เป็นสารที่มีความเสถียรหรือมีความคงตัวมากขึ้น ซึ่งการหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสามารถคำนวณเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายกรดแกลลิก (gallic acid) จากภาพ 29 และภาพ 30 แสดงปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสาหร่ายเตาสดและสาหร่ายเตาอบแห้งทั้ง 3 วิธี ซึ่งจะเห็นว่าสภาวะและวิธีการอบแห้งสาหร่ายเตาที่แตกต่างกันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อนำค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสาหร่ายเตาอบแห้งที่ได้จากสภาวะการอบแห้งทั้ง 3 วิธี เปรียบเทียบกับสาหร่ายเตาสด พบว่า มีค่าเป็นไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ การอบแห้งมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ทั้งนี้อาจเกิดจากการอบแห้งหรือความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งอาจทำให้เยื่อหุ้มเซลล์และผนังเซลล์ของสาหร่ายเตาเกิดการแตกหรือฉีกขาดจึงทำให้เกิดการปลดปล่อยของค้ประกอบที่อยู่ภายในโครงสร้างเซลล์ออกมาได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้สามารถสกัดสารประกอบฟีนอลิกได้มากกว่า (ชนศักดิ์, 2552; Roy et al., 2007) นอกจากนี้การอบแห้งมีผลไปเร่งการแตกตัวทั้งแบบที่ใช้เอนไซม์และไม่ใช้เอนไซม์ของสารประกอบฟีนอลิกที่จับกับสารอื่น (bound form) ให้อยู่ในรูปของสารประกอบฟีนอลิกที่เป็นอิสระมากขึ้น จึงส่งผลให้สาหร่ายเตาเมื่อผ่านการอบแห้งมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Rangkadilok et al. (2005) อ้างโดย ศรัณยา (2550) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในลำไยอบแห้ง 9 สายพันธุ์ โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิร้อน 80°C เป็นเวลา 48 hr พบว่าโดยภาพรวมสารประกอบฟีนอลิกมีปริมาณเพิ่มขึ้นภายหลังการอบแห้ง เช่นเดียวกับผลงานวิจัยของรุ่งทิพย์ (2549) ได้ทดลองพบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของลำไยอบแห้งมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างสดอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของสาหร่ายเตาที่ผ่านการอบแห้งที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่า สาหร่ายเตาที่ผ่านการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดน้อยที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ $928.25 \pm 19.23 \text{ mg GAE}/100 \text{ g}_{\text{dry matter}}$ ในขณะที่การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 65, 70, 75°C มีค่าเท่ากับ และ $2,033.23 \pm 13.23$, $2,190.77 \pm 25.89$, $2,327.63 \pm 53.63$, $2,175.01 \pm 40.83 \text{ mg GAE}/100 \text{ g}_{\text{dry matter}}$ ตามลำดับ และสาหร่าย

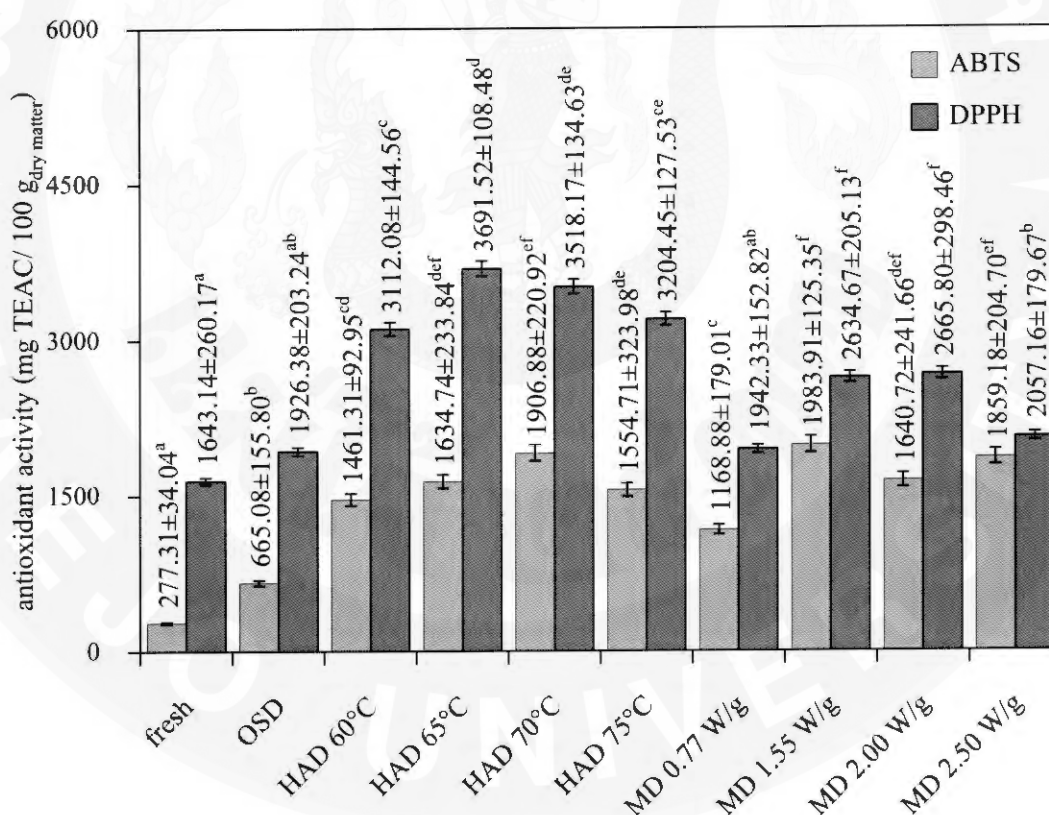
เตาที่ผ่านการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ มีค่าเท่ากับ $1,508.69 \pm 15.42$, $1,757.69 \pm 18.23$, $1,606.19 \pm 19.00$ และ $1,597.37 \pm 37.27$ mg GAE/100 g_{dry matter} ที่ระดับความเข้มข้นของคลื่นไมโครเวฟ 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W/g ตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดจากการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งทั้ง 2 วิธี โดยการอบแห้งเป็นเวลานานทำให้สารประกอบฟีนอลิกเกิดการสลายตัวในระหว่างการอบแห้งเนื่องจากการทำงานของเอนไซม์ (enzymatic reaction) ถึงแม้การอบแห้งด้วยวิธีการดังกล่าวทำให้สาหร่ายเตาได้รับความร้อนที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก แต่สาหร่ายเตาได้รับความร้อนเป็นเวลานานจึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบฟีนอลิก



ภาพ 29 การเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของสาหร่ายเตา

- หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($n=3$)
- ^{a-h} อักษรกำกับที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาระหว่างวิธีการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อนและการอบแห้งคลื่นไมโครเวฟ พบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมากกว่า ทั้งนี้อาจเกิดจากการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟเกิดความร้อนที่อุณหภูมิสูงเกินไปจึงทำลายสารประกอบฟีนอลิกบางชนิดที่ไม่ทนความร้อน ในขณะที่การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ใช้เวลาในการอบแห้งยาวนานจึงส่งผลต่อการสูญเสียสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเช่นกัน โดยการเพิ่มอุณหภูมิ ลมร้อนส่งผลให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิลมร้อนมีค่าสูงกว่า 70°C ทั้งนี้อาจเกิดจากการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูงเกินไปทำให้สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเกิดการสลายตัวในระหว่างการอบแห้งเนื่องจากความร้อนที่สูงเกินไป ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อน คือที่อุณหภูมิ 70°C เนื่องจากมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมากกว่าการอบแห้งที่สภาวะอื่นๆ



ภาพ 30 การเปรียบเทียบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสาหร่ายเตา

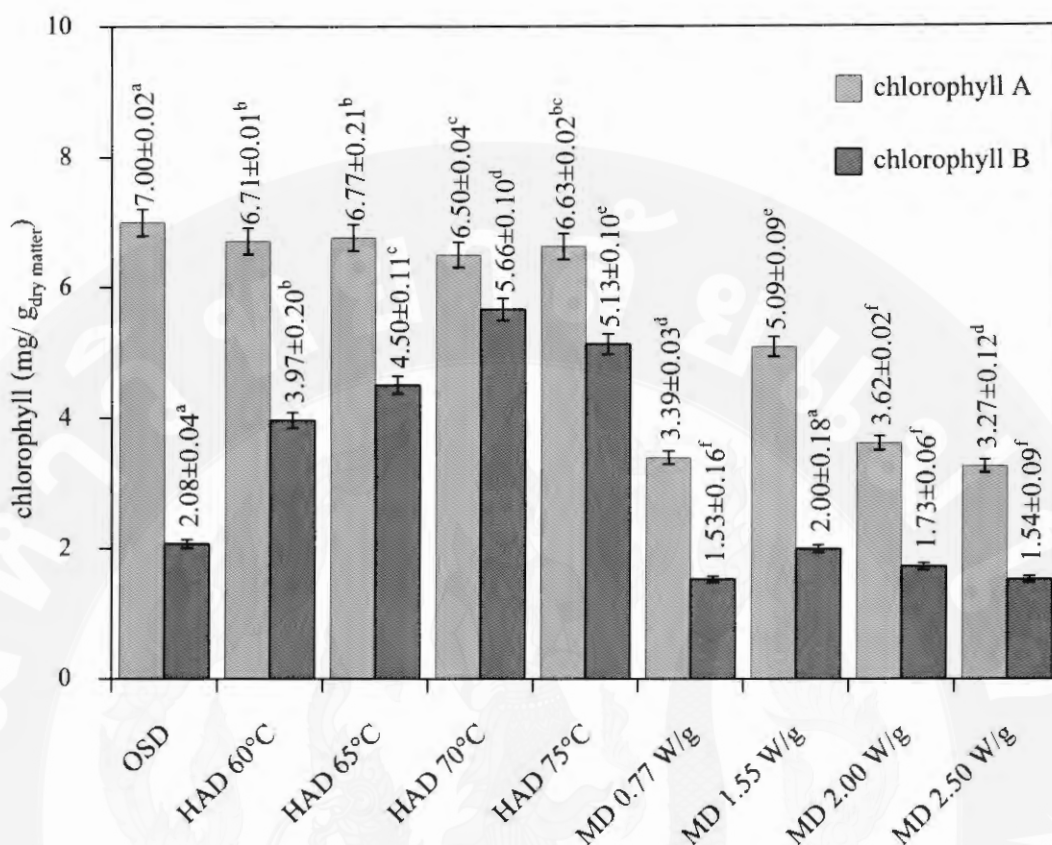
- หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)
 - ^{a-f} อักษรกำกับที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p \leq 0.05$)

ABTS radical cation (ABTS^{•+}) คือสารอนุมูลอิสระกึ่งสังเคราะห์ ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระที่นิยมใช้ในการวัดความสามารถในการต้านออกซิเดชันวิธีหนึ่ง เมื่อนำสาร ABTS ผสมกับสาร potassium persulfate ($K_2S_2O_8$) จะกลายเป็นสีน้ำเงินอมเขียว และเมื่อได้รับ hydrogen atom จากสารสกัดสำหรับเตาที่ใช้ในการทดสอบ จะทำให้ ABTS^{•+} ลดลง ทำให้สีจางลงซึ่งสามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ที่ความยาวคลื่น 734 nm และนำค่าที่วัดค่าการดูดกลืนแสงได้มาคำนวณหา % inhibition จากนั้นเทียบค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระกับกราฟมาตรฐาน Trolox (trolox) ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสาหร่ายเตาที่สภาวะต่างๆ แสดงดังภาพ 30 สาหร่ายเตาสดมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS เท่ากับ 277.31 ± 34.04 mg TEAC/100 g_{dry matter} และการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ มีค่าเท่ากับ 665.08 ± 155.80 mg TEAC/100 g_{dry matter} แต่ในขณะที่การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 65, 70, 75°C มีค่าเท่ากับ $1,461 \pm 92.95$, $1,634.74 \pm 233.84$, $1,906.88 \pm 220.92$, $1,554.71 \pm 323.98$ mg TEAC/100 g_{dry matter} ส่วนการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ มีค่า $1,168.88 \pm 179.01$, $1,983.91 \pm 125.35$, $1,640.72 \pm 241.66$, $1,859.18 \pm 204.70$ mg TEAC/100 g_{dry matter} ที่ระดับความเข้มข้น 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W/g ตามลำดับ โดยการอบแห้งทุกสภาวะทำให้สาหร่ายเตามีค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าสาหร่ายเตาสด ซึ่งอาจเกิดจากการที่ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดและสะสมของสารต้านอนุมูลอิสระที่เกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard-type antioxidant) ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน นอกจากนี้การอบแห้งยังทำให้ได้สารผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบบางชนิดที่มีความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่เกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดเพิ่มขึ้นด้วย โดยจะเกิดในช่วงของการปฏิกิริยาเมลลาร์ดขั้นต้น (early maillard reaction) (นิธิยา, 2545; ศรีธนา, 2550; Soong and Barlow, 2004) สอดคล้องกับผลการทดลองของ Antonio et al. (2003) อ้างโดย ศรีธนา (2550) ที่พบว่าผลพลั้มอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 และ 80°C มีปริมาณสารประกอบ hydroxymethylfural (HMF) ซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์จากการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดที่มีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ โดยการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความเข้ม 1.55 W/g มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมากกว่าการอบแห้งที่สภาวะอื่นๆ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากตัวอย่างสาหร่ายเตาที่อบแห้งในสภาวะดังกล่าว เกิดความร้อนในระดับที่เหมาะสมในการอบแห้ง ซึ่งที่สภาวะการอบแห้งนี้อาจทำให้สารที่มีสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระถูกปลดปล่อยออกมาจากโครงสร้างเซลล์ของสาหร่ายเตามากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มระดับของอุณหภูมิลมร้อนและความเข้มของคลื่นไมโครเวฟในการอบแห้งให้สูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระลดลง โดยอาจเกิดจากการสลายตัวของสารที่มีสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระเนื่องจากการได้รับความร้อนที่สูงเกินไป โดยปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากกลไกการเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบเดียวกัน โดยเป็นวิธีวัดสมบัติในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนเดี่ยว (single electron transfer reaction) (ชนศักดิ์, 2552; Huang et al., 2005) สอดคล้องกับความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ซึ่งพบว่ากรอบแห้งทุกสภาวะมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น สาหร่ายเตาสดมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับ $1,643.14 \pm 260.17$ mg TEAC/100 g_{dry matter} และการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ มีค่า $1,926.38 \pm 203.24$ mg TEAC/100 g_{dry matter} ขณะที่การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 65, 70 และ 75°C มีค่าเท่ากับ $3,112.08 \pm 144.56$, $3,691.52 \pm 108.48$, $3,518.17 \pm 134.63$ และ $3,204.45 \pm 127.53$ mg TEAC/100 g_{dry matter} ส่วนการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ มีค่า $1,942.33 \pm 152.82$, $2,634.67 \pm 205.13$, $2,665.80 \pm 298.46$ และ $2,057.16 \pm 179.67$ mg TEAC/100 g_{dry matter} ที่ระดับความเข้มข้น 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W/g ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าสาหร่ายเตาที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกับการความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS โดยข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนี้เป็นหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ที่แสดงถึงความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายเตา ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเป็นส่วนประกอบของเครื่องสำอางหรือนำไปใช้เป็นอาหารเสริมสุขภาพเพื่อป้องกันโรคต่างๆ ที่มีสาเหตุมาจากอนุมูลอิสระ

4. ผลการวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี

คลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุสีเขียวที่พบในพืช ผลไม้ และยังพบได้ในสาหร่ายทุกชนิด โดยในธรรมชาติมีคลอโรฟิลล์อยู่หลายชนิดด้วยกันซึ่งแต่ละชนิดมีโครงสร้างหลักที่เหมือนกันคือ วงแหวนไพโรล 4 วง แต่โซ่ข้าง (side chain) ของคลอโรฟิลล์แต่ละชนิดจะมีลักษณะที่ต่างกันออกไป เช่น คลอโรฟิลล์ เอ (chlorophyll A) และคลอโรฟิลล์ บี (chlorophyll B) มีโครงสร้างโมเลกุลที่ต่างกันเพียงตำแหน่งเดียวเท่านั้น นั่นคือ ที่วงแหวนไพโรล วงที่สองของคลอโรฟิลล์ เอ มีโซ่ข้างเป็นหมู่เมทิล (-CH₃) ส่วนของคลอโรฟิลล์ บี เป็นหมู่อัลดีไฮด์ (-CHO) ซึ่งการที่โครงสร้างที่ต่างกันนี้ทำให้มีคุณสมบัติแตกต่างกัน รวมทั้งคุณสมบัติการดูดกลืนแสงก็ต่างกันด้วย และทำให้คลอโรฟิลล์ทั้งสองชนิดนี้มีสีต่างกันเล็กน้อย โดยที่คลอโรฟิลล์ เอ มีสีเขียวเข้ม ส่วนคลอโรฟิลล์ บี มีสีเขียวอ่อน คลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ดังนั้นความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระอาจเกิดมาจากรงควัตถุและสารอื่นๆ



ภาพ 31 การเปรียบเทียบคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บีของสาหร่ายเตา

หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($n=3$)

- ^{a-f} อักษรกำกับที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p \leq 0.05$)

การศึกษาผลของวิธีการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ของสาหร่ายเตา พบว่า สาหร่ายเตาที่ผ่านการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี เท่ากับ 7.00 ± 0.02 mg/g_{dry matter} และ 2.08 ± 0.04 mg/g_{dry matter} ส่วนการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 65, 70, 75°C มีปริมาณคลอโรฟิลล์เอ เท่ากับ 6.71 ± 0.01 , 6.77 ± 0.21 , 6.50 ± 0.04 , 6.63 ± 0.02 mg/g_{dry matter} และคลอโรฟิลล์บี 3.97 ± 0.20 , 4.50 ± 0.11 , 5.66 ± 0.10 , 5.13 ± 0.10 mg/g_{dry matter} ตามลำดับ ในขณะที่การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ 3.39 ± 0.03 , 5.09 ± 0.09 , 3.62 ± 0.02 , 3.27 ± 0.12 mg/g_{dry matter} และคลอโรฟิลล์ บี 1.53 ± 0.16 , 2.00 ± 0.18 , 1.73 ± 0.06 , 1.54 ± 0.09 mg/g_{dry matter} ที่ระดับความชื้น 0.77, 1.55, 2.00, 2.50 W/g ตามลำดับ (ภาพ 31) เมื่อพิจารณาพบว่า การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มีคลอโรฟิลล์ เอ มากที่สุด ในขณะที่คลอโรฟิลล์ บี ของสาหร่ายเตาอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C มีค่ามากที่สุด โดยการอบแห้ง

สาหร่ายเตาด้วยคลิ่นไมโครเวฟที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี น้อยกว่าเมื่อเทียบกับสาหร่ายเตาที่ผ่านการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และการอบแห้งด้วยลมร้อน ทั้งนี้อาจเกิดจากอุณหภูมิเฉลี่ยของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยคลิ่นไมโครเวฟมีค่าสูงเกินไปจึงทำให้แมกนีเซียมในคลอโรฟิลล์หลุดออกไปและถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจน ทำให้คลอโรฟิลล์เปลี่ยนเป็นฟีโอไฟดิน (pheophytins) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้คลอโรฟิลล์เกิดการสลายตัวทำให้สีเขียวของสาหร่ายเตาหายไปและกลายเป็นสีน้ำตาลเมื่อผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง (Rudra et al., 2008)

ผลการศึกษาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง

การวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าของสาหร่ายเตาโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิร้อน 60, 65, 70, 75°C และเครื่องอบแห้งไมโครเวฟที่ระดับความเข้มข้น 0.77, 1.55, 2.00, 2.50 W/g โดยพลังงานที่ใช้ในการลดความชื้นสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนประกอบด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ชุดทำความร้อน (heater) เพื่อสร้างพลังงานความร้อนให้แก่อากาศที่ใช้เป็นตัวกลางในการอบแห้ง และพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่พัดลมเพื่อทำให้เกิดการไหลผ่านของอากาศในระบบ ในขณะที่พลังงานไฟฟ้าสำหรับการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลิ่นไมโครเวฟประกอบด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแมกนีตรอนซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวสร้างคลื่นไมโครเวฟ รวมไปถึงพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับพัดลมระบายความร้อนเพื่อป้องกันแมกนีตรอนไม่ให้มีอุณหภูมิสูงเกินไป พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับหลอดไฟและอุปกรณ์ควบคุม ผลการทดลองสรุปได้ดังแสดงในตาราง 10

ผลการทดลองพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งสาหร่ายเตามากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 65, 70 และ 75°C ทั้งนี้เนื่องมาจากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิอบแห้งต่ำสุด ความชื้นในอากาศสูง และความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอน้ำ ส่งผลทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศกับสาหร่ายเตาได้ไม่ดี จึงใช้เวลาในการลดความชื้นนานที่สุด ในขณะที่การทำงานของเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นระบบ ON-OFF ซึ่งควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดไฟฟ้าด้วยระบบ PID โดยการสร้างลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C จะมีคาบเวลาในช่วงการปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) สั้น และช่วงพักหรือช่วงที่ไม่มีการปล่อยกระแสไฟฟ้า (OFF) ที่ยาวกว่าการอบแห้งที่สถานะอื่น โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชั่วโมง เท่ากับ 1.02 kW และการอบแห้งที่อุณหภูมิ 65, 70 และ 75°C มีค่าเท่ากับ 1.10, 1.14 และ 1.54 kW ตามลำดับ จากข้อมูลพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ

65, 70 และ 75°C มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชั่วโมงมากกว่าที่อุณหภูมิ 60°C เท่ากับ 7.84, 11.76 และ 50.98% ตามลำดับ แต่ในขณะที่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C ใช้เวลาอบแห้งสาหร่ายเตา เท่ากับ 590 min ซึ่งมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 65, 70 และ 75°C ถึง 40.43, 90.14 และ 167.85% ตามลำดับ ถึงแม้ว่าที่สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อ ชั่วโมงต่ำกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิอื่น แต่ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่นานกว่าจึงทำให้มีค่าการใช้ พลังงานไฟฟ้ารวมในการอบแห้งที่มากกว่า เมื่อวิเคราะห์ต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้า พบว่า การ อบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 65, 70 และ 75°C มีค่าเท่ากับ 668.44, 513.33, 392.92 และ 376.79 บาท เช่นเดียวกับการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งพบว่าที่ระดับความเข้ม ระดับความเข้ม 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W/g มีต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้า เท่ากับ 46.11, 39.84, 37.10 และ 31.27 บาท ตามลำดับ เมื่อเพิ่มระดับความเข้มของคลื่นไมโครเวฟในกระบวนการ อบแห้งทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น และระยะเวลาในการอบแห้งลดลงส่งผลให้ต้นทุนค่า พลังงานไฟฟ้ามีค่าลดลง

ตาราง 10 การเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งสาหร่ายเตา (ต่อ 1,000 g_{dry matter})

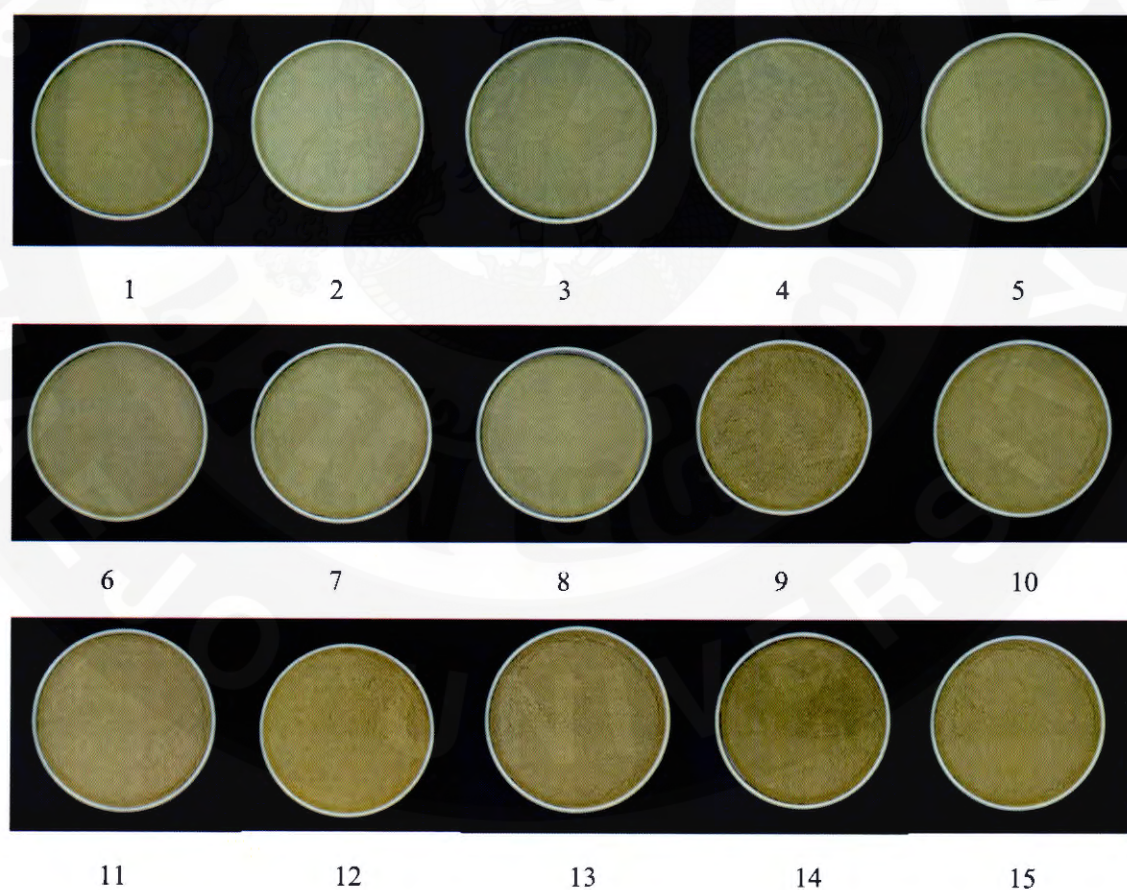
drying condition	working hours (hr)	power (kW×hr)	cost (baht)
OSD	33.00	-	-
HAD 60°C	9.83	10.03	668.44
HAD 65°C	7.00	7.70	513.33
HAD 70°C	5.17	5.89	392.92
HAD 75°C	3.67	5.65	376.79
MD 0.77 W/g	1.33	0.69	46.11
MD 1.55 W/g	0.72	0.60	39.84
MD 2.00 W/g	0.53	0.56	37.10
MD 2.50 W/g	0.35	0.47	31.27

ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลม ร้อนโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง

การพิจารณาคัดเลือกวิธีการอบแห้งสาหร่ายเตาระหว่างวิธีการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ เพื่อนำไปหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) และการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบ้น์เคน (BBD) ซึ่งพิจารณาจากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของสาหร่ายเตาอบแห้ง ได้แก่ ค่า ΔE , ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด, ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ, คลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี จากการทดลองพบว่าค่า ΔE ของสาหร่ายเตาที่อบแห้งด้วยลมร้อนมีค่าน้อยกว่าการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ รวมทั้งมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในด้านของการวิเคราะห์คลอโรฟิลล์ พบว่า การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มีคลอโรฟิลล์ เอ มากที่สุด ในขณะที่คลอโรฟิลล์ บี ของสาหร่ายเตาอบแห้งด้วยลมร้อนมีค่ามากที่สุด ($p \leq 0.05$) จากข้อมูลดังกล่าวจึงเลือกวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตาเพื่อนำไปออกแบบการทดลองและหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งที่สามารถรักษาคุณภาพของสาหร่ายเตาอบแห้งได้ งานวิจัยนี้ทำการออกแบบการทดลองแบบ BBD และการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้วิธี RSM สำหรับ 3 ปัจจัย อาศัยการทำการทดลองทั้งสิ้นจำนวน 15 การทดลอง โดยเป็นการทดลองที่ตำแหน่งกึ่งกลางซึ่งทำซ้ำจำนวน 3 การทดลอง ผลการทดลองที่จะถูกนำไปวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาความสมบูรณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง

การศึกษาผลของ 3 ปัจจัย ประกอบไปด้วย อุณหภูมิในการอบแห้ง (X_1) มีค่าอยู่ระหว่าง 65-75°C ความเร็วลมร้อน (X_2) อยู่ระหว่าง 1.0-2.0 m/s และความหนาของชั้นวัสดุ (X_3) อยู่ระหว่าง 2.0-4.0 mm ซึ่งค่าปัจจัยที่ศึกษาเหล่านี้ได้ทำการศึกษาเบื้องต้น (preliminary) และค่าผลตอบสนองที่ต้องการศึกษา ได้แก่ ความแตกต่างสีโดยรวม (Y_1) ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Y_2) ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS (Y_3) ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (Y_4) คลอโรฟิลล์ เอ (Y_5) และคลอโรฟิลล์ บี (Y_6) โดยสาหร่ายเตาอบแห้งจะถูกนำไปสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เนื่องจากสารสกัดที่ได้สามารถนำไปเป็นส่วนประกอบสำหรับการผลิตเครื่องสำอางและอาหารเสริมเพื่อสุขภาพต่างๆ ดังนั้นสาหร่ายเตาอบแห้งที่ได้จึงควรมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด, ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และคลอโรฟิลล์สูง และให้สีที่ใกล้เคียงกับสาหร่ายเตาสด โดยภาพ 32 แสดงการเปรียบเทียบสาหร่ายเตาอบแห้งด้วยลมร้อนที่ได้ในแต่ละสิ่งทดลอง

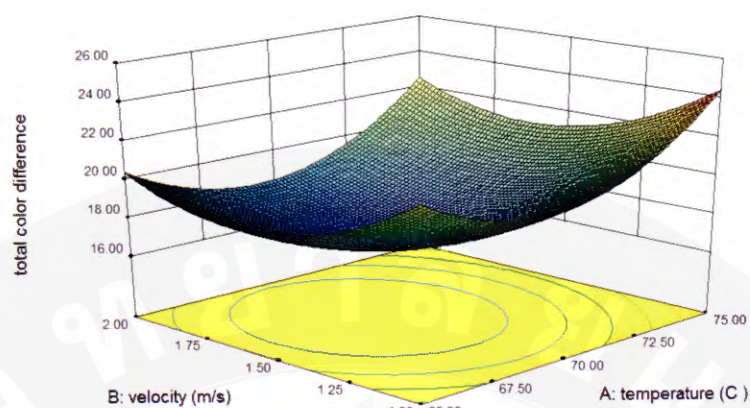
การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อนโดยใช้วิธี RSM และใช้การทดลองแบบ BBD เพื่อเลือกกระดับอุณหภูมิในการอบแห้ง ความเร็วลมร้อน และความหนาของชั้นวัสดุที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตาที่ทำให้มีค่า ΔE น้อยที่สุด ในขณะที่ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ คลอโรฟิลล์ เอ และ คลอโรฟิลล์ บี มีค่ามากที่สุด ตาราง 11 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าการตอบสนองของสาหร่ายเตาอบแห้งที่ได้ในแต่ละสิ่งทดลอง จากการทดลอง พบว่า ค่า ΔE มีค่าอยู่ระหว่าง 16.51-24.82 ในขณะที่ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS และ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH มีค่าอยู่ระหว่าง 1,466.10-2,597.14 mg GAE/100 g_{dry matter}, 982.93-2,039.11 mg TEAC/100 g_{dry matter} และ 3,031.66-3,721.54 mg TEAC/100 g_{dry matter} ตามลำดับ ส่วนคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี มีค่าอยู่ระหว่าง 4.10-6.85 และ 1.32-5.11 mg/g_{dry matter} ตามลำดับ



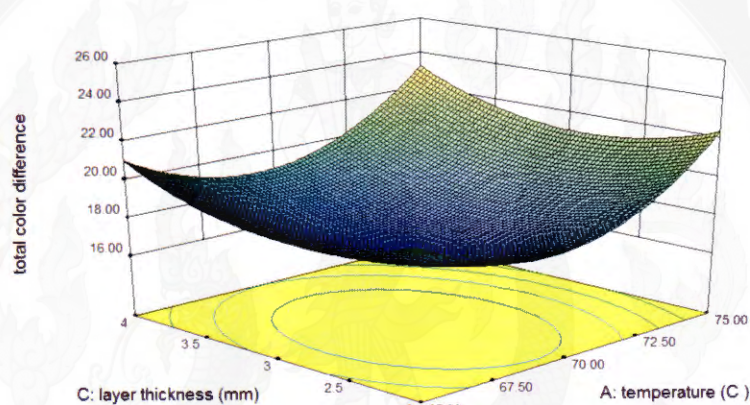
ภาพ 32 การเปรียบเทียบสีสาหร่ายเตาอบแห้งด้วยลมร้อนที่ได้ในแต่ละสิ่งทดลอง

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ศึกษากับค่าการตอบสนองของปัจจัยซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สมการการถดถอย (regression equation) ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ พบว่า แบบจำลองโพลิโนเมียลลำดับที่สอง (quadratic model) มีความเหมาะสมในการทำนายค่าการตอบสนองทุกค่าของการอบแห้งสาหร่ายเคดด้วยลมร้อน โดยตาราง 12-13 แสดงค่า F-value ของสมการ และค่า lack of fit ของแต่ละค่าการตอบสนอง จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า แบบจำลองที่สร้างขึ้นมีผลต่อค่าการตอบสนองที่ระดับนัยสำคัญ ($p\text{-value} < 0.05$) ได้แก่ ความแตกต่างสีโดยรวม ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH กลอโรฟิลล์ เอ และกลอโรฟิลล์ บี

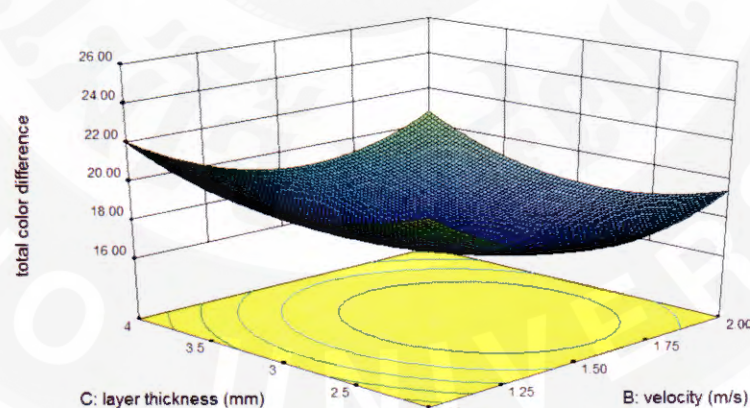
ภาพ 33 แสดงพื้นผิวตอบสนองในรูปแบบของกราฟ 3 มิติ (3D plot) และภาพ 34 แสดงกราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวตอบสนอง (contour plot) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยระหว่างอุณหภูมิในการอบแห้ง ความเร็วลมร้อน และความหนาของชั้นวัสดุต่อค่า ΔE ของสาหร่ายเคด พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า ΔE ของสาหร่ายเคดอบแห้งที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} < 0.01$) โดยอุณหภูมิลมร้อนที่สูงขึ้นจะทำให้มีค่า ΔE มากขึ้น ซึ่งอาจเนื่องมาจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลทำให้รังควัตถุหรือสารให้สีถูกทำลายและเกิดการสลายตัวจากความร้อนที่สูงเกินไปจึงทำให้เกิดการสูญเสียน้ำ รวมทั้งมีการสลายตัวและมีการรวมตัวกันของหมู่เอมิโนกับสารประกอบรีดิวซิง และพัฒนาการเป็นสารประกอบเชิงซ้อนมีสีเหลืองจนเป็นสีน้ำตาล ในขณะที่การเพิ่มความเร็วมในกระบวนการจะทำให้ค่า ΔE ของสาหร่ายเคดอบแห้งมีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเกิดจากการถ่ายเทมวลความชื้นและอากาศร้อนระหว่างตัวอย่างได้เร็วขึ้น จึงทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลงช่วยให้สาหร่ายเคดลดการสัมผัสอากาศร้อนเป็นเวลานานที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ ($p\text{-value} < 0.01$) เมื่อพิจารณาชั้นความหนาของวัสดุที่ใช้ในการอบแห้งไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า ΔE อย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} > 0.05$) เช่นกับการทดลองของปองพล และคณะ (2557) ที่ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ (50, 60 และ 70°C) และความหนาของชั้นวัสดุ (10, 15 และ 20 mm) ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของดอกคาโมมายล์อบแห้ง ได้แก่ ค่าความสว่าง/ความมืด (L^*) ค่าความแตกต่างสีโดยรวม (ΔE) และค่าความสดของสี (C^*) จากการทดลองอบแห้ง พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนและใช้ชั้นวัสดุหนาขึ้นทำให้ค่า L^* มีค่าลดลง แต่ในขณะที่ค่า ΔE มีค่าเพิ่มขึ้น และค่า C^* ของดอกคาโมมายล์อบแห้งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} > 0.05$) การทดลองสามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปัจจัยกับค่า ΔE ได้สมการความสัมพันธ์ดังแสดงในตาราง 14 โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีระดับนัยสำคัญ $p\text{-value} < 0.01$ และมีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (R^2) เท่ากับ 0.9745



(a)

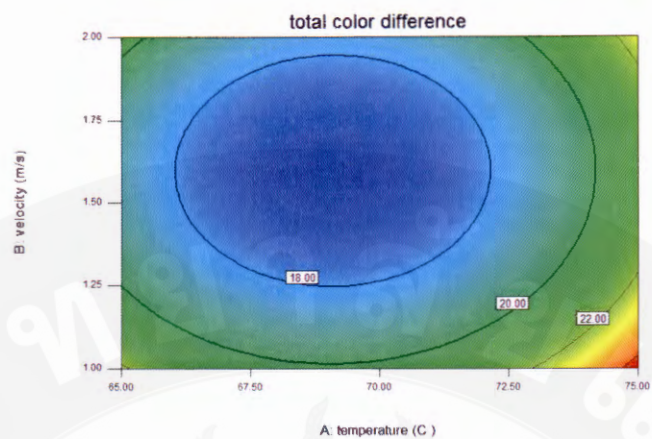


(b)

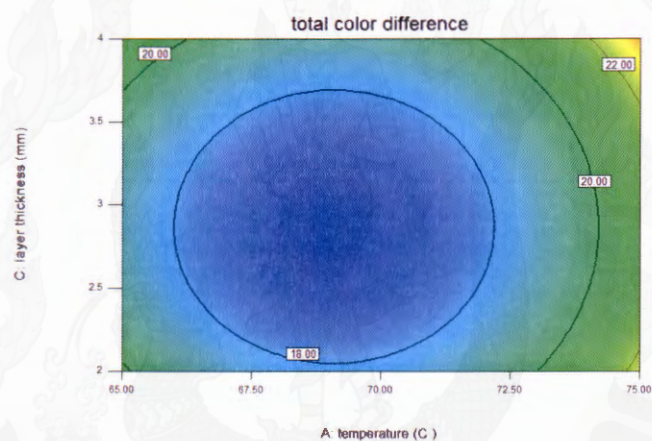


(c)

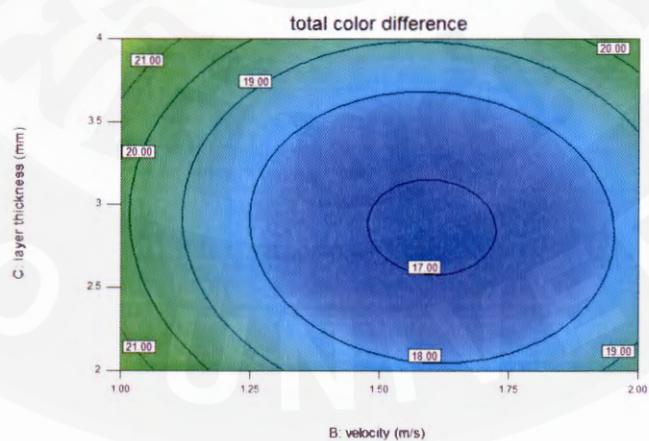
ภาพ 33 กราฟ 3 มิติของพื้นผิวตอบสนองต่อค่าความแตกต่างสีโดยรวม; (a) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วลมร้อน, (b) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับชั้นความหนา, (c) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมร้อนกับชั้นความหนา



(a)



(b)



(c)

ภาพ 34 กราฟโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองต่อค่าความแตกต่างสีโดยรวม; (a) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วลมร้อน, (b) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับชั้นความหนา, (c) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมร้อนกับชั้นความหนา

ตาราง 11 การวิเคราะห์ข้อมูลการอบแห้งสำหรับรายได้ด้วยลมร้อนโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบ้หันเคน

run	coded			response					
	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6
1	65 (-1)	1.0 (-1)	3 (0)	21.96	1,508.35	1,617.73	3,287.86	6.09	2.00
2	75 (+1)	1.0 (-1)	3 (0)	24.82	1,626.09	1,483.44	3,112.50	4.10	1.57
3	65 (-1)	2.0 (+1)	3 (0)	20.01	1,466.10	1,686.38	3,432.91	5.77	1.92
4	75 (+1)	2.0 (+1)	3 (0)	22.75	1,654.72	1,564.22	3,334.83	5.31	1.32
5	65 (-1)	1.5 (0)	2 (-1)	20.64	1,505.19	1,488.15	3,484.15	5.48	2.00
6	75 (+1)	1.5 (0)	2 (-1)	22.25	1,670.45	982.93	3,334.83	4.88	1.45
7	65 (-1)	1.5 (0)	4 (+1)	21.32	1,605.55	1,659.11	3,154.56	4.83	2.10
8	75 (+1)	1.5 (0)	4 (+1)	22.97	1,692.30	1,429.51	3,031.66	4.98	1.57
9	70 (0)	1.0 (-1)	2 (-1)	21.61	1,774.43	1,327.70	3,334.83	6.26	2.41
10	70 (0)	2.0 (+1)	2 (-1)	19.55	1,864.99	1,583.46	3,536.94	6.10	2.35
11	70 (0)	1.0 (-1)	4 (+1)	22.13	1,832.02	1,342.78	3,112.50	5.85	1.57
12	70 (0)	2.0 (+1)	4 (+1)	21.02	2,075.01	1,762.27	3,334.83	6.66	1.89
13	70 (0)	1.5 (0)	3 (0)	17.91	2,597.14	2,039.11	3,697.38	6.40	4.74
14	70 (0)	1.5 (0)	3 (0)	16.74	2,487.65	1,927.88	3,721.54	6.85	4.97
15	70 (0)	1.5 (0)	3 (0)	16.51	2,466.98	2,000.99	3,718.06	6.45	5.11

ตาราง 12 ANOVA สำหรับแต่ละค่าการตอบสนองของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อน

source	df	total color difference		total phenolic content		antioxidant activity ABTS	
		sum of square	F-value	sum of square	F-value	sum of square	F-value
model	9	74.43	21.24**	1.962×10^6	39.12**	9.838×10^5	5.94*
X_1 (temperature)	1	9.84	25.28**	38970.67	6.99*	1.228×10^5	6.68*
X_2 (velocity)	1	6.47	16.62	12795.23	2.30	85011.57	4.62
X_3 (layer thickness)	1	1.43	3.66	18994.38	3.41	82301.30	4.47
X_1^2	1	3.251×10^{-3}	8.348×10^{-3}	1256.11	0.23	36.79	2.000×10^{-3}
X_2^2	1	4.130×10^{-4}	1.061×10^{-3}	1540.68	0.28	18991.65	1.03
X_3^2	1	0.22	0.58	5808.88	1.04	6701.50	0.36
$X_1 X_2$	1	33.80	86.79	1.378×10^6	247.21	2.453×10^5	13.33
$X_1 X_3$	1	19.70	50.58	4.334×10^5	77.77	76170.32	4.14
$X_2 X_3$	1	10.87	27.91	3.064×10^5	54.97	4.310×10^5	23.42
residual	5	1.95		27864.55		91992.47	
lack of fit	3	0.81	0.48	18078.28	1.23	85602.26	8.93
pure error	2	1.13		9786.26		6390.21	
total	14	76.38		1.990×10^6		1.076×10^6	

หมายเหตุ * แสดงค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

** แสดงค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p < 0.01$)

ตาราง 13 ANOVA สำหรับแต่ละค่าการตอบสนองของการอบแห้งสาหร่ายเตาดด้วยลมร้อน

source	df	antioxidant activity DPPH		chlorophyll A		chlorophyll B	
		sum of square	F-value	sum of square	F-value	sum of square	F-value
model	9	6.954×10^5	62.58**	7.96	6.35*	23.97	32.89**
X_1 (temperature)	1	37218.41	30.15	1.06	7.60*	0.56	6.91*
X_2 (velocity)	1	78369.92	63.48	0.30	2.16	5.084×10^{-4}	6.279×10^{-3}
X_3 (layer thickness)	1	1.397×10^5	113.16	0.021	0.15	0.15	1.80
X_1^2	1	1492.59	1.21	0.58	4.20	6.389×10^{-3}	0.079
X_2^2	1	174.44	0.14	0.14	1.01	7.393×10^{-5}	9.131×10^{-4}
X_3^2	1	102.12	0.083	0.24	1.70	0.037	0.45
$X_1 X_2$	1	2.296×10^5	186.01	5.42	38.91	11.38	140.51
$X_1 X_3$	1	1.079×10^5	87.37	5.178×10^{-3}	0.037	8.10	100.05
$X_2 X_3$	1	1.654×10^5	133.96	0.36	2.60	7.25	89.54
residual	5	6172.67		0.70		0.40	
lack of fit	3	5831.52	11.40	0.57	3.04	0.33	3.07
pure error	2	341.16		0.13		0.072	
total	14	7.015×10^5		8.65		24.37	

หมายเหตุ * แสดงค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p < 0.05$)

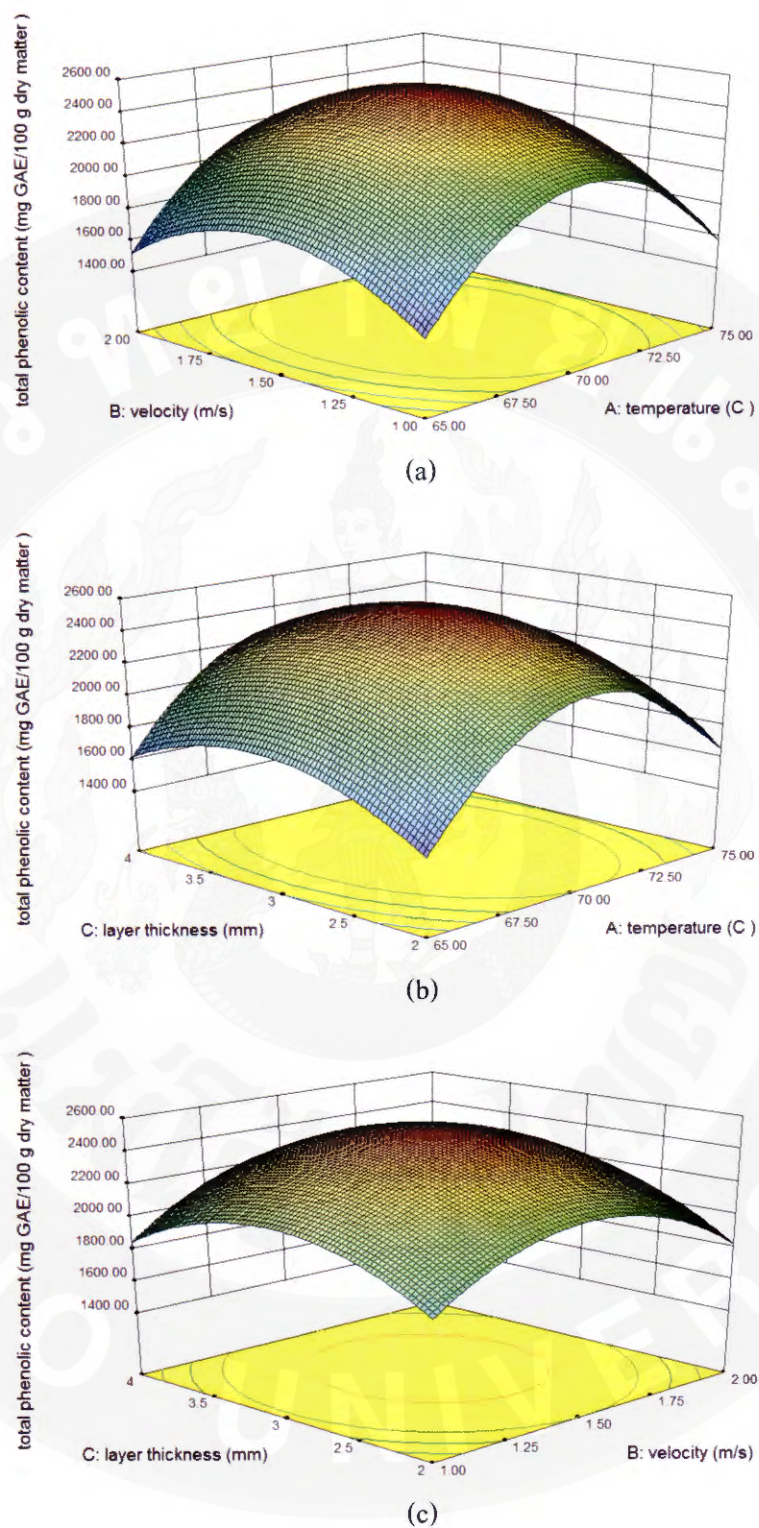
** แสดงค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย ($p < 0.01$)

ตาราง 14 สมการโพลิโนเมียลลำดับที่สองและค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับค่าการตอบสนองของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อน

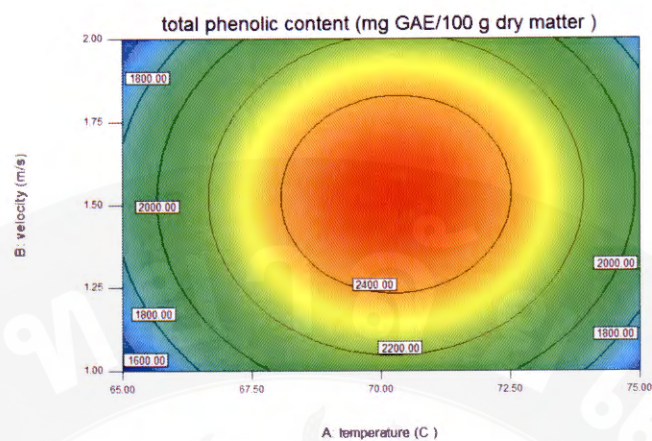
response	model	R^2	equation
total color difference	$Y_1 = 17.05 + 1.11X_1 - 0.90X_2 + 0.42X_3 - 0.029X_1X_2 + 0.010X_1X_3 + 0.24X_2X_3 + 3.03X_1^2 + 2.31X_2^2 + 1.72X_3^2$	0.9745	(34)
total phenolic content (mg GAE/100 g _{dry matter})	$Y_2 = 2,517.26 + 69.79X_1 + 39.99X_2 + 48.73X_3 + 17.72X_1X_2 - 19.63X_1X_3 + 38.11X_2X_3 - 610.84X_1^2 - 342.60X_2^2 - 288.04X_3^2$	0.9860	(35)
antioxidant activity ABTS (mg TEAC/100 g _{dry matter})	$Y_3 = 1,989.33 - 123.91X_1 + 103.08X_2 + 101.43X_3 + 3.03X_1X_2 + 68.91X_1X_3 + 40.93X_2X_3 - 257.76X_1^2 - 143.63X_2^2 - 341.65X_3^2$	0.9145	(36)
antioxidant activity DPPH (mg TEAC/100 g _{dry matter})	$Y_4 = -46,422.17 + 1,367.38X_1 + 1,677.73X_2 + 1,030.08X_3 + 7.73X_1X_2 + 1.32X_1X_3 + 10.11X_2X_3 - 9.98X_1^2 - 683.66X_2^2 - 211.64X_3^2$	0.9912	(37)
chlorophyll A (mg /g _{dry matter})	$Y_5 = 6.57 - 0.36X_1 + 0.19X_2 - 0.052X_3 + 0.38X_1X_2 + 0.19X_1X_3 + 0.24X_2X_3 - 1.21X_1^2 - 0.037X_2^2 - 0.31X_3^2$	0.9196	(38)
chlorophyll B (mg /g _{dry matter})	$Y_6 = 4.94 - 0.26X_1 - 7.972 \times 10^{-3}X_2 - 0.14X_3 - 0.040X_1X_2 + 4.299 \times 10^{-3}X_1X_3 + 0.096X_2X_3 - 1.76X_1^2 - 1.48X_2^2 - 1.40X_3^2$	0.9834	(39)

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ศึกษาต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH จากการวิเคราะห์การถดถอยได้สมการความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการ 35, 36 และ 37 โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9860, 0.9145 และ 0.9912 (ตาราง 13) ของปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ตามลำดับ โดยสามารถสร้างพื้นที่การตอบสนองได้ดังภาพ 35-40 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยต่อค่าผลค่าตอบสนองในรูปแบบของกราฟ 3 มิติ และกราฟโครงร่างของพื้นผิวดตอบสนอง พบว่า การอบแห้งที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นมีผลทำให้ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากปริมาณความร้อนที่สูงเกินไปจึงทำให้สารประกอบฟีนอลิกบางชนิดที่ไม่ทนความร้อนเกิดการสลายตัวในระหว่างการอบแห้ง และอุณหภูมิความร้อนสูงขึ้นมีผลต่อค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระลดลงโดยอาจเกิดจากการสลายตัวของสารที่มีสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระเนื่องจากการได้รับความร้อนที่สูงเกินไป ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากกลไกการเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบเดียวกันโดยเป็นวิธีวัดสมบัติในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนเดี่ยว ในขณะที่ผลของความเร็วลมและความหนาของชั้นวัสดุ ไม่มีผลต่อปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value}>0.05$)

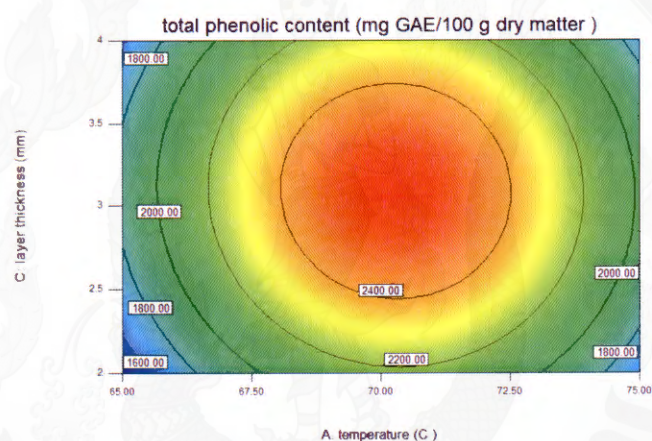
ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปัจจัยการอบแห้งที่ศึกษาต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ดังแสดงในกราฟ 3 มิติ (ภาพ 41 และภาพ 43) และกราฟโครงร่างของพื้นผิวดตอบสนอง (ภาพ 42 และภาพ 44) พบว่า การอบแห้งที่มีอุณหภูมิสูงจะมีผลทำให้คลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี มีค่าน้อยลง ในกรณีการอบแห้งที่มีอุณหภูมิสูงจะทำให้แมกนีเซียมในคลอโรฟิลล์หลุดออกไปและถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจน ทำให้คลอโรฟิลล์เปลี่ยนเป็นฟีโอไฟติน (pheophytins) โดยมีเอนไซม์คลอโรฟิลเลส (chlorophyllase) เป็นเอนไซม์ที่สลายคลอโรฟิลล์โดยแยกเอาส่วนที่เป็นไฟคอล (phytol) ออกจากโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้คลอโรฟิลล์เกิดการสลายตัว ส่วนปัจจัยของความเร็วมและชั้นความหนาที่ใช้ในการอบแห้งไม่มีผลต่อคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ($p\text{-value}>0.05$) และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของปัจจัยการอบแห้งระหว่าง อุณหภูมิ ความเร็วลม และชั้นความหนาของวัสดุ สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยกับค่าคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ดังแสดงในสมการ 38 และ 39 ตามลำดับ ซึ่งเป็นแบบจำลองโพลิโนเมียลลำดับสอง โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9196 และ 0.9834 ตามลำดับ



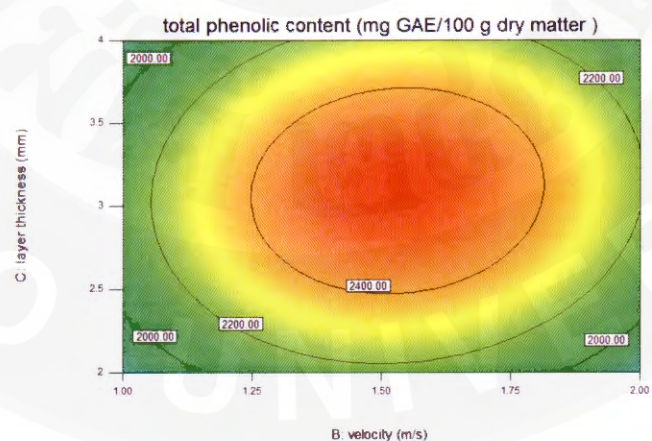
ภาพ 35 กราฟ 3 มิติของพื้นผิวตอบสนองต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด; (a) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วลมร้อน, (b) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับชั้นความหนา, (c) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมร้อนกับชั้นความหนา



(a)

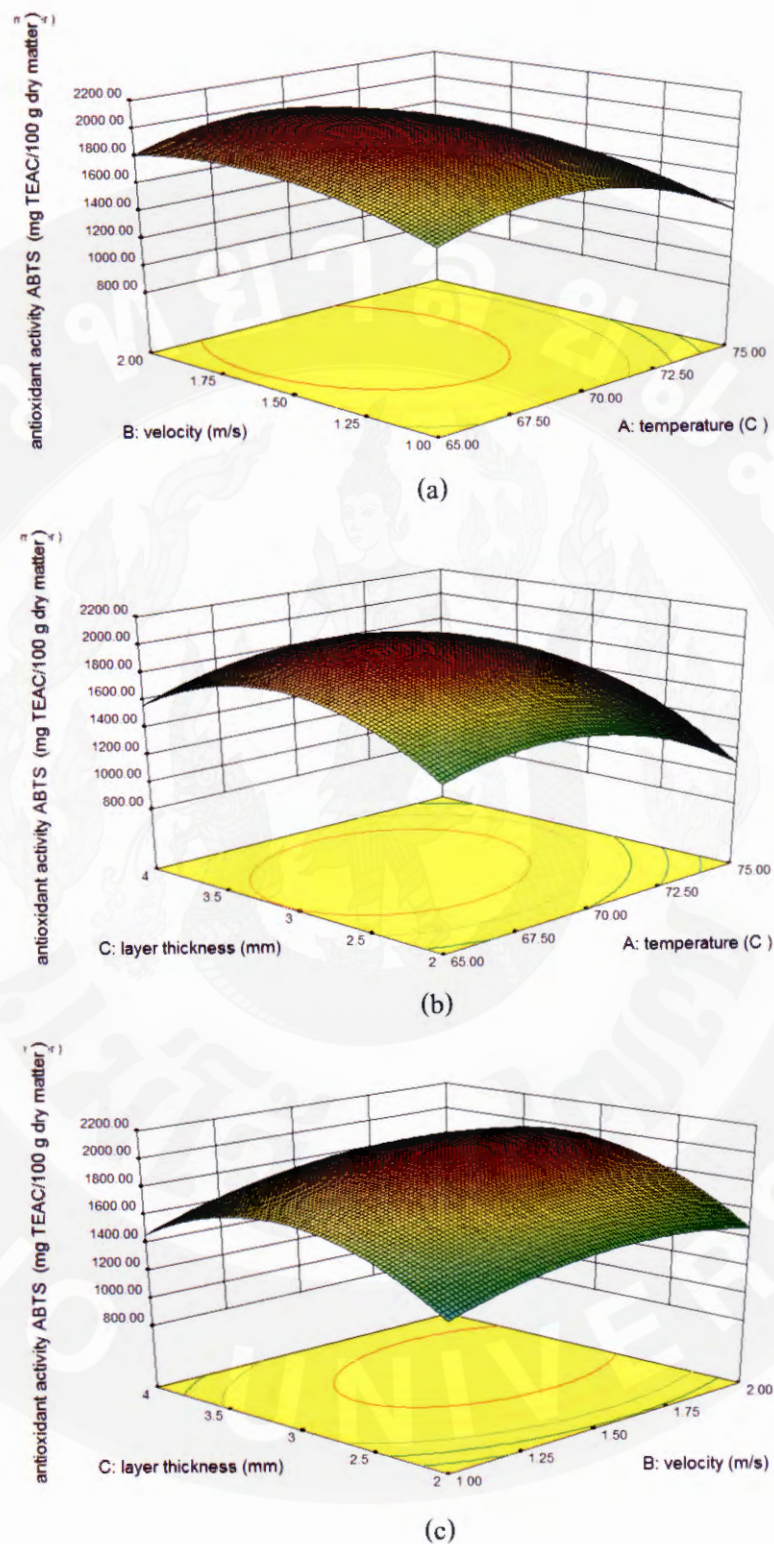


(b)

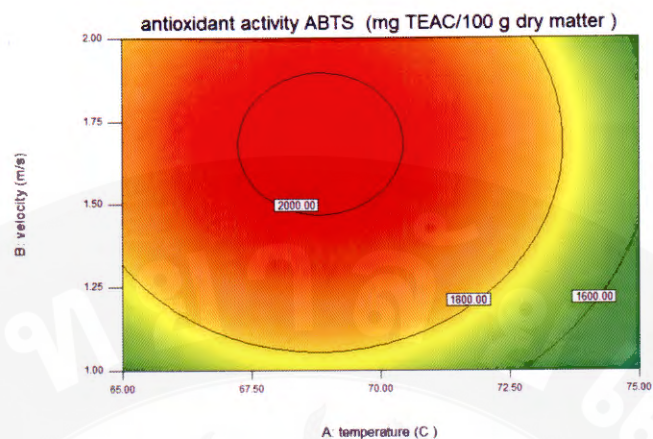


(c)

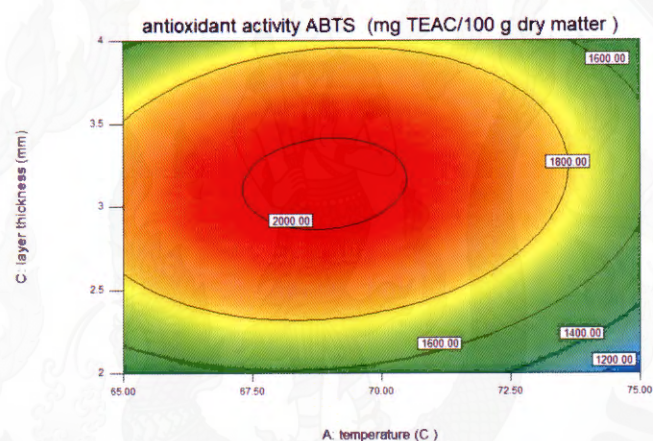
ภาพ 36 กราฟโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด; (a) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วลมร้อน, (b) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับชั้นความหนา, (c) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมร้อนกับชั้นความหนา



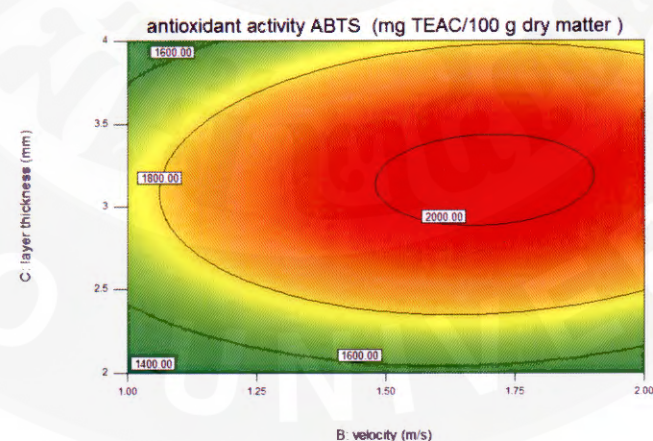
ภาพ 37 กราฟ 3 มิติของพื้นผิวตอบสนองต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS; (a) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วลมร้อน, (b) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับชั้นความหนา, (c) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมร้อนกับชั้นความหนา



(a)

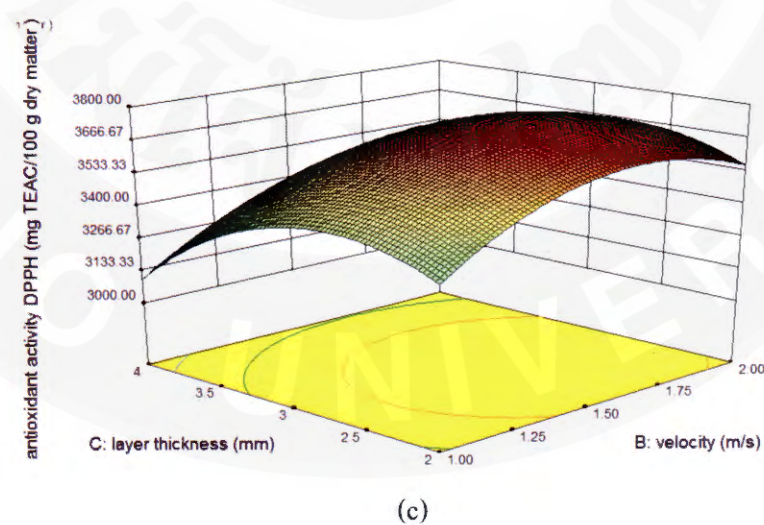
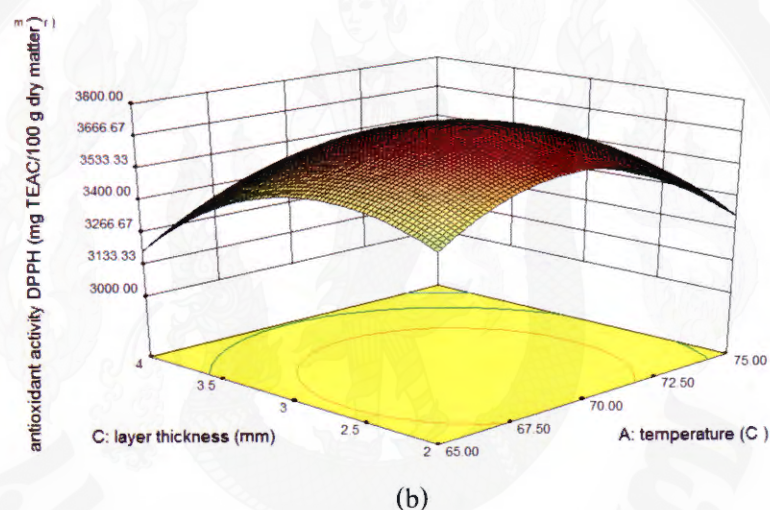
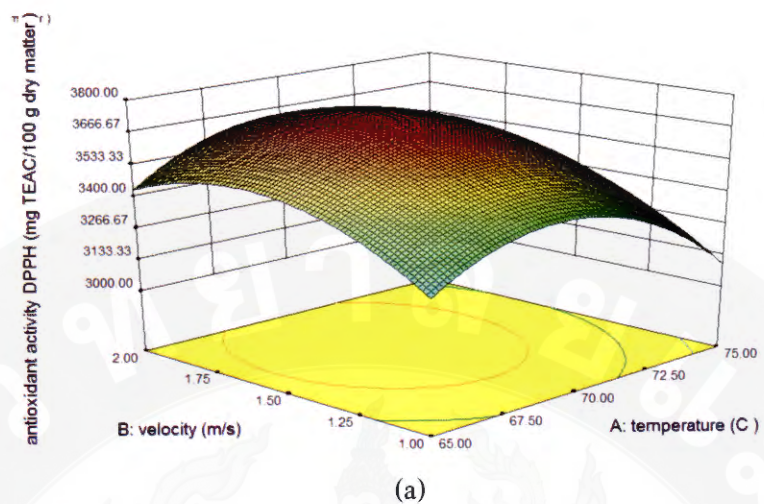


(b)

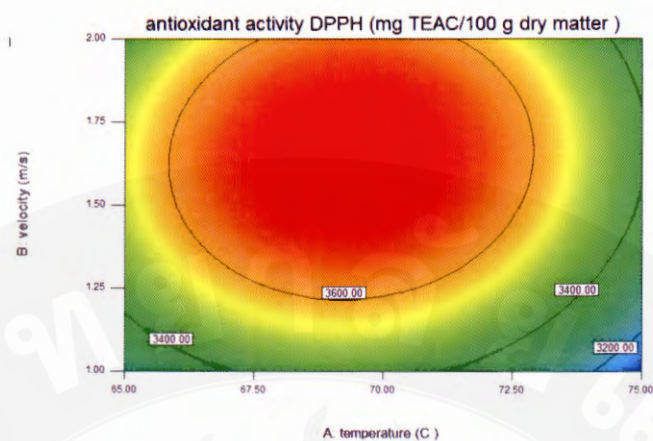


(c)

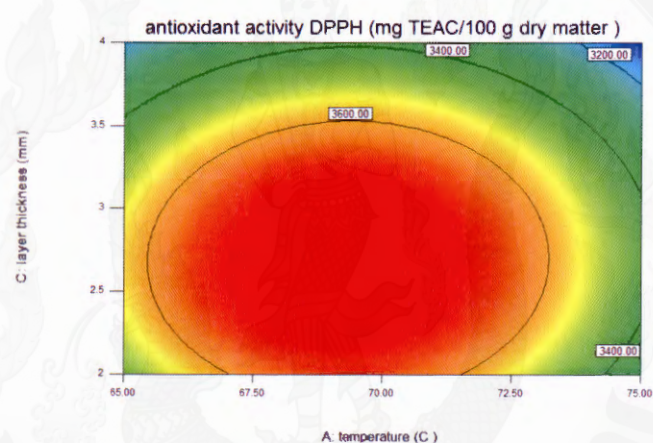
ภาพ 38 กราฟโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS; (a) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วลมร้อน, (b) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับชั้นความหนา, (c) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมร้อนกับชั้นความหนา



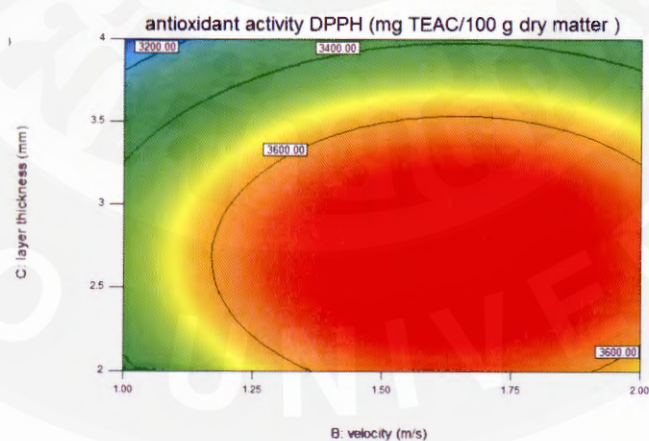
ภาพ 39 กราฟ 3 มิติของพื้นผิวตอบสนองต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH; (a) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วลมร้อน, (b) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับชั้นความหนา, (c) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมร้อนกับชั้นความหนา



(a)

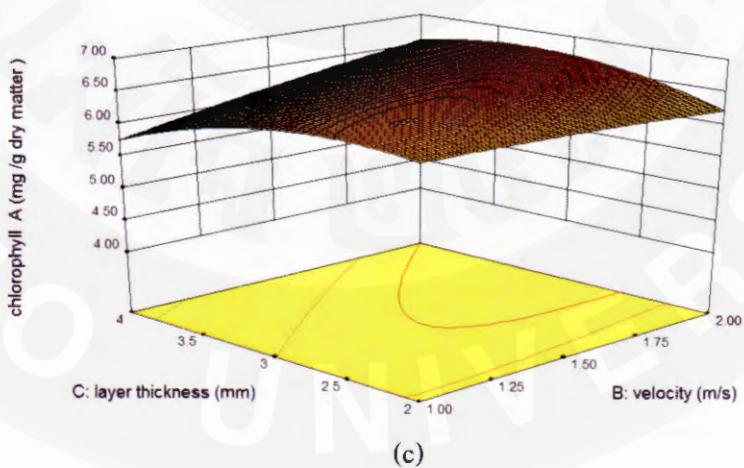
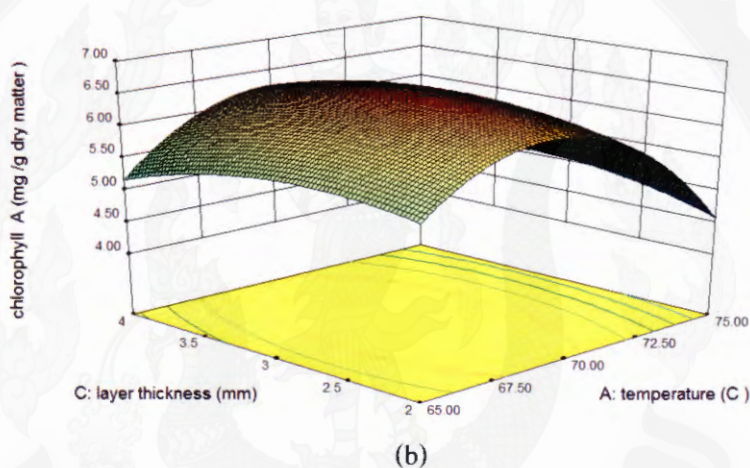
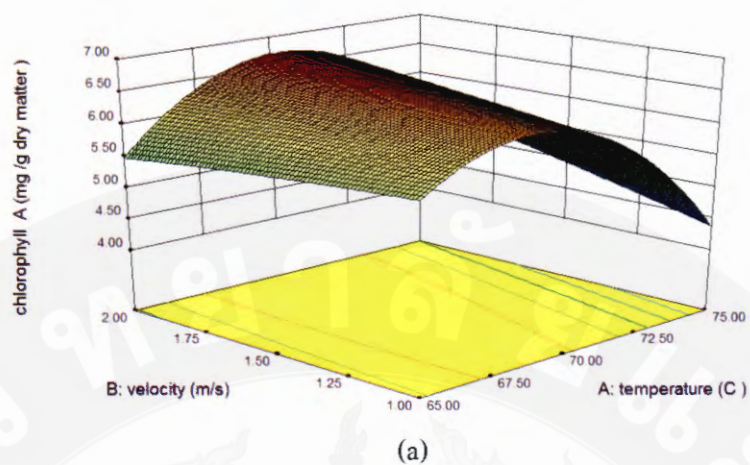


(b)

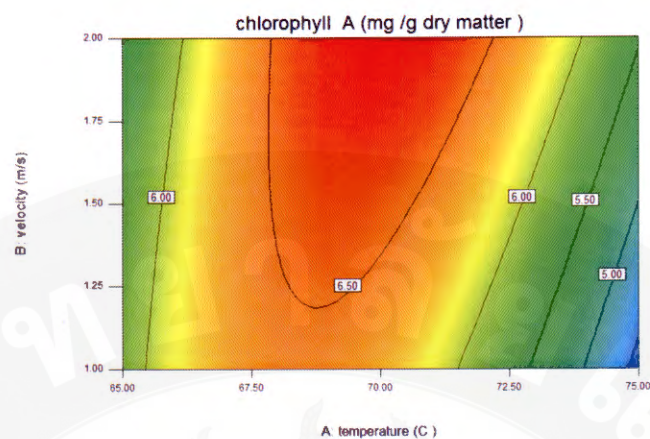


(c)

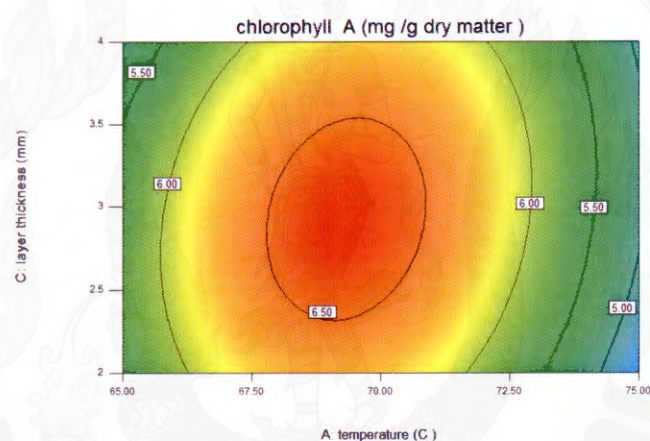
ภาพ 40 กราฟโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH; (a) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วลมร้อน, (b) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับชั้นความหนา, (c) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมร้อนกับชั้นความหนา



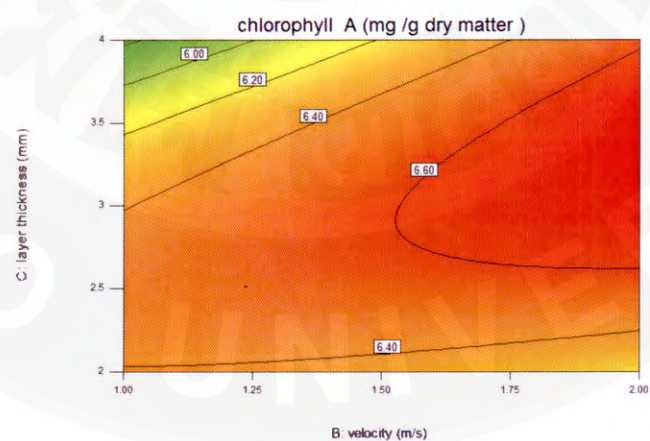
ภาพ 41 กราฟ 3 มิติของพื้นผิวตอบสนองต่อคลอโรฟิลล์ เอ; (a) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วมร่อน, (b) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับชั้นความหนา, (c) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วมร่อนกับชั้นความหนา



(a)

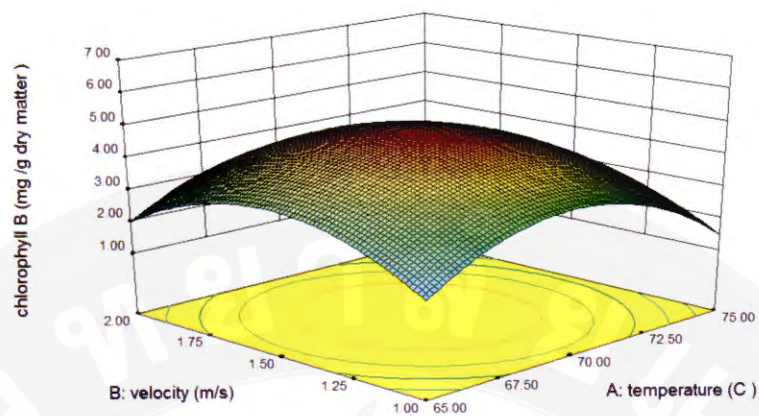


(b)

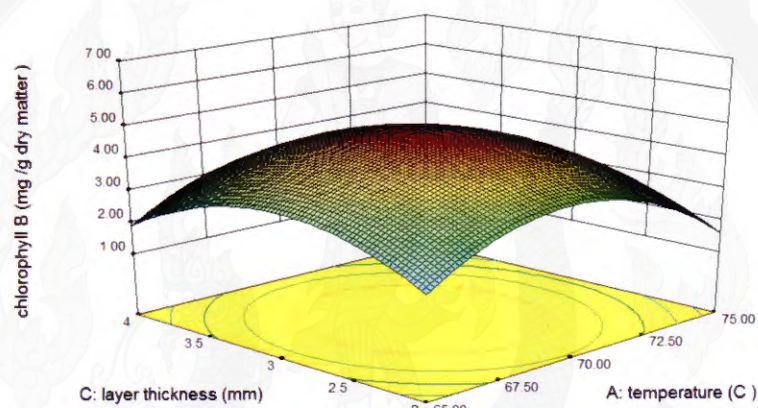


(c)

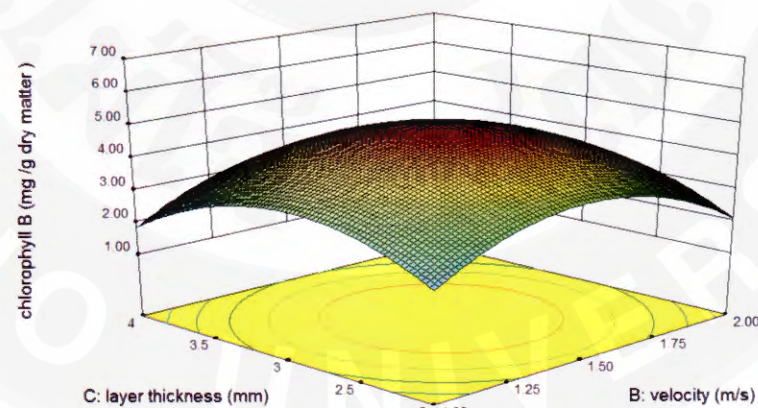
ภาพ 42 กราฟโครงร่างของพื้นผิวดอปสนองต่อคลอโรฟิลล์ เอ; (a) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วลมร้อน, (b) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับชั้นความหนา, (c) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมร้อนกับชั้นความหนา



(a)

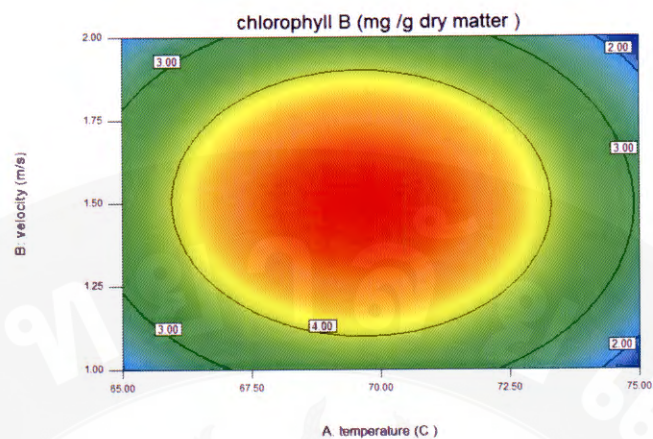


(b)

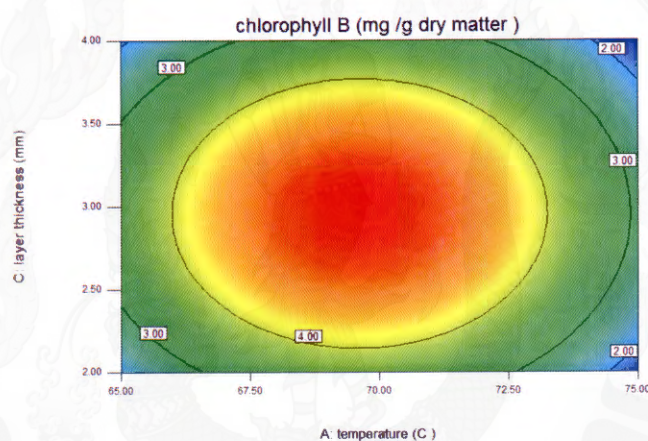


(c)

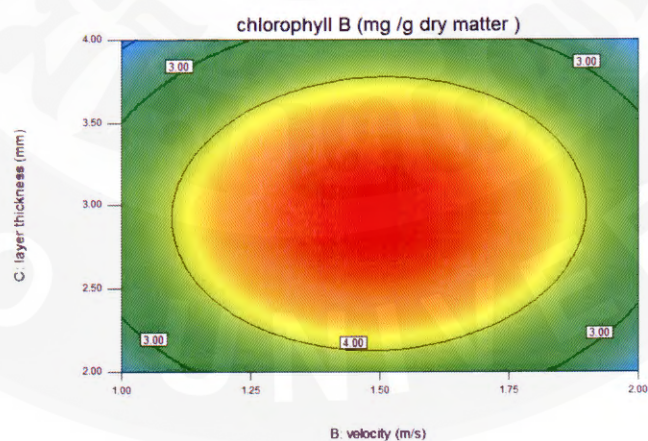
ภาพ 43 กราฟ 3 มิติของพื้นผิวตอบสนองต่อคลอโรฟิลล์ บี; (a) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วมร่อน, (b) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับชั้นความหนา, (c) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วมร่อนกับชั้นความหนา



(a)



(b)



(c)

ภาพ 44 กราฟโครงร่างของพื้นผิวดตอบสนองต่อคลอโรฟิลล์ บี; (a) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วลมร้อน, (b) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับชั้นความหนา, (c) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมร้อนกับชั้นความหนา

ตาราง 15 แสดงการกำหนดช่วงของแต่ละปัจจัยกับค่าการตอบสนองที่นำมาใช้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตาดด้วยลมร้อน เมื่อนำช่วงของค่าการตอบสนองทุกค่ามาทำการหาสภาวะที่เหมาะสม เพื่อหาค่าปัจจัยที่ให้ค่าการตอบสนองดีที่สุด การวิเคราะห์สามารถสรุปผลได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการอบแห้งสาหร่ายเตาดด้วยลมร้อน คือ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 69.57°C ความเร็วลมร้อน 1.60 m/s และความหนาของชั้นวัสดุ 3.05 mm โดยค่าที่ได้จากการทำนายให้ค่า ΔE เท่ากับ 16.92 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 2,502.02 mg GAE/100 g_{dry matter} ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับ 2,017.40 และ 3,722.50 mg TEAC/100 g_{dry matter} ส่วนคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี มีเท่ากับ 6.62 และ 4.93 mg /g_{dry matter} ตามลำดับ

ตาราง 15 การกำหนดช่วงของปัจจัยที่มีผลต่อค่าการตอบสนองเพื่อเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตาดด้วยลมร้อนโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง

factors	target value	low level	high level
temperature (°C)	in range	65	75
velocity (m/s)	in range	1.0	2.0
layer thickness (mm)	in range	2.0	4.0
total color difference	minimize	16.51	24.82
total phenolic content (mg GAE/100 g _{dry matter})	maximize	1,466.10	2,597.14
antioxidant activity ABTS (mg TEAC/100 g _{dry matter})	maximize	982.93	2,039.11
antioxidant activity DPPH (mg TEAC/100 g _{dry matter})	maximize	3,031.66	3,721.54
chlorophyll A (mg /g _{dry matter})	maximize	4.10	6.85
chlorophyll B (mg /g _{dry matter})	maximize	1.32	5.11

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

1. สาหร่ายเตาสดมีคุณลักษณะทางกายภาพ คือ ความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 8.55 ± 0.20 $\frac{g_{\text{water}}}{g_{\text{dry matter}}}$ ค่าสีในระบบสี CIB($L^*-a^*-b^*$) และระบบมุนเซล ได้แก่ ค่า L^* , a^* , b^* , C^* และ h° เท่ากับ 14.54 ± 0.44 , -3.37 ± 0.95 , 15.34 ± 4.86 , 15.69 ± 4.93 และ 102.40 ± 1.33 ตามลำดับ คุณลักษณะทางเคมี ได้แก่ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับ 405.62 ± 26.20 mg GAE/100 $\frac{g_{\text{dry matter}}}{g_{\text{dry matter}}}$, 277.31 ± 34.04 mg TEAC/100 $\frac{g_{\text{dry matter}}}{g_{\text{dry matter}}}$ และ $1,643.14 \pm 260.17$ mg TEAC/100 $\frac{g_{\text{dry matter}}}{g_{\text{dry matter}}}$ ตามลำดับ
2. คุณลักษณะการอบแห้งของสาหร่ายเตา พบว่า ความชื้นสมดุลของการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ 0.0736 ± 0.0023 $\frac{g_{\text{water}}}{g_{\text{dry matter}}}$ และการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 65, 70, 75°C มีค่าเท่ากับ 0.0641 ± 0.0020 , 0.0635 ± 0.0020 , 0.0629 ± 0.0020 , 0.0621 ± 0.0020 $\frac{g_{\text{water}}}{g_{\text{dry matter}}}$ ตามลำดับ ในขณะที่การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟความชื้นสมดุลมีค่าเท่ากับศูนย์
3. ผลของสภาวะและวิธีการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของสาหร่ายเตา ในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่า เวลาที่ใช้ในการอบแห้งสาหร่ายเตาจากความชื้นเริ่มต้นจนเหลือความชื้น 0.15 ± 0.01 $\frac{g_{\text{water}}}{g_{\text{dry matter}}}$ ใช้เวลาเท่ากับ 1,980 min ของการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ขณะที่การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 65, 70 และ 75°C ใช้เวลาเท่ากับ 590, 420, 310 และ 220 min ตามลำดับ ส่วนการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความเข้ม 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W/g ใช้เวลาเท่ากับ 80, 43, 32 และ 21 min ตามลำดับ อัตราการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ มีค่าเท่ากับ 0.0005 ± 0.0001 $\frac{g_{\text{water}}}{g_{\text{dry matter}}} \cdot \text{min}$ และอัตราการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อน มีค่าเท่ากับ 0.0139 ± 0.0015 , 0.0196 ± 0.0008 , 0.0273 ± 0.0026 , 0.0376 ± 0.0017 $\frac{g_{\text{water}}}{g_{\text{dry matter}}} \cdot \text{min}$ ที่อุณหภูมิ 60, 65, 70, 75°C ตามลำดับ และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความเข้ม 0.77, 1.55, 2.00, 2.50 W/g มีอัตราการอบแห้งเท่ากับ 0.1039 ± 0.0067 , 0.1929 ± 0.0273 , 0.2645 ± 0.0148 , 0.4109 ± 0.0226 $\frac{g_{\text{water}}}{g_{\text{dry matter}}} \cdot \text{min}$ ตามลำดับ
4. ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งในรูปของแบบจำลองเอมพิริคัลที่สามารถทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ได้เหมาะสมที่สุด คือ แบบจำลองของ Logarithmic โดยให้ค่า R^2 สูงสุด (0.9969) ในขณะที่ค่า χ^2 (2.7646×10^{-4})

และค่า $RMSE$ (0.0159) มีค่าต่ำสุด และแบบจำลองที่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนได้เหมาะสมที่สุด คือ Midilli et al. เนื่องจากให้ค่า R^2 สูงที่สุด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.9993-0.9999 นอกจากนี้ค่า χ^2 และค่า $RMSE$ มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1174×10^{-4} - 0.6652×10^{-4} และ 0.0033-0.0074 ตามลำดับ ในขณะที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Logarithmic สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟได้เหมาะสมที่สุด โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9962-0.9985 ซึ่งมีค่ามากกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบอื่นๆ และมีค่า χ^2 และค่า $RMSE$ อยู่ระหว่าง 1.7294×10^{-4} - 4.9047×10^{-4} และ 0.0129-0.0214 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ มีค่าเท่ากับ 0.48×10^{-10} m^2/s และการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 65, 70 และ $75^\circ C$ มีค่าเท่ากับ 1.72×10^{-10} , 2.32×10^{-10} , 3.24×10^{-10} และ 4.51×10^{-10} m^2/s ตามลำดับ และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ มีค่าเท่ากับ 2.74×10^{-7} , 5.02×10^{-7} , 6.92×10^{-7} และ 10.64×10^{-7} m^2/s ที่ระดับความเข้มข้น 0.77, 1.55, 2.00 และ 2.50 W/g ตามลำดับ ค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าเท่ากับ 62.36 kJ/mol และ 1.32 W/g ของการอบแห้งสาหร่ายด้วยลมร้อนและการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ตามลำดับ

5. ผลของสภาวะและวิธีการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบธรรมชาติ การอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของสาหร่ายเตาอบแห้ง จากผลการทดลองพบว่าค่า a_w ของสาหร่ายเตาอบแห้งที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.426 ± 0.006 ถึง 0.514 ± 0.005 เมื่อพิจารณาวิธีการอบแห้งทั้ง 3 วิธี พบว่า ค่า a_w อยู่ในระดับที่ต่ำกว่า 0.6 จากการศึกษาผลของการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงของสาหร่ายเตา พบว่า การอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อนสามารถรักษาคูณภาพได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบธรรมชาติและการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ $70^\circ C$ เป็นสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถรักษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของสาหร่ายเตาอบแห้งได้ดีที่สุด

6. ผลการศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสาหร่ายเตาสดและสาหร่ายเตาอบแห้งทั้ง 3 วิธี พบว่า การอบแห้งทุกสภาวะทำให้สาหร่ายเตามีค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าสาหร่ายเตาสด ทั้งนี้อาจเกิดจากการอบแห้งหรือความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งอาจทำให้เชื้อหุ้มเซลล์และผนังเซลล์ของสาหร่ายเตาเกิดการแตกหรือฉีกขาดจึงทำให้เกิดการปลดปล่อยองค์ประกอบที่อยู่ภายในโครงสร้างเซลล์ออกมาได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้สามารถสกัดสารประกอบฟีนอลิกได้มากกว่า ในขณะที่เดียวกันการอบแห้งทำให้ความสามารถใน

การต้านอนุมูลอิสระมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดและสะสมของสารต้านอนุมูลอิสระที่เกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน นอกจากนี้การอบแห้งยังทำให้ได้สารผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นสารประกอบบางชนิดที่มีความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่เกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยสภาวะการอบแห้งที่มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมากที่สุด คือ การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C โดยที่สภาวะดังกล่าวยังมีความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH มากที่สุด และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความเข้ม 1.55 W/g มีความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ABTS มากที่สุด

7. ผลการศึกษาผลของวิธีการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ของสาหร่ายเตา พบว่า สาหร่ายเตาที่ผ่านการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบธรรมชาติมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ มากที่สุด ในขณะที่การอบแห้งด้วยลมร้อนมีค่าคลอโรฟิลล์ บี มากที่สุด ขณะที่การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี น้อยที่สุด ทั้งนี้อาจเกิดจากอุณหภูมิเฉลี่ยของสาหร่ายเตาในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟมีค่าสูงเกินไปจึงทำให้แมกนีเซียมในคลอโรฟิลล์หลุดออกไปและถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจน ทำให้คลอโรฟิลล์เปลี่ยนเป็นฟิโอฟิติน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้คลอโรฟิลล์เกิดการสลายตัว

8. ผลการศึกษาลักษณะที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อนโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) และการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบย์นเคน (BBD) พบว่าอุณหภูมิในการอบแห้งและความเร็วลมร้อนมีผลต่อค่า ΔE แต่เมื่อพิจารณาชั้นความหนาของวัสดุที่ใช้ในการอบแห้งไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า ΔE ในขณะที่อุณหภูมิลมร้อนมีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ คลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ของสาหร่ายเตา แต่ความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้งและชั้นความหนาของสาหร่ายเตาไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าว การวิเคราะห์สามารถสรุปผลได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อน คือ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 69.57°C ความเร็วลมร้อน 1.60 m/s และความหนาของชั้นวัสดุ 3.05 mm โดยค่าที่ได้จากการทำนายให้ค่า ΔE เท่ากับ 16.92 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 2,502.02 mg GAE/100 g_{dry matter} ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS เท่ากับ 2,017.40 mg TEAC/100 g_{dry matter} และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับ 3,722.50 mg TEAC/100 g_{dry matter} คลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี เท่ากับ 6.62 และ 4.93 mg /g_{dry matter} ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับรายเตาที่ใช้ในการทดลองควรนำมาจากแหล่งเพาะปลูกเดียวกันทั้งนี้เพื่อช่วยควบคุมความแปรปรวนที่เกิดขึ้นกับการอบแห้ง
2. เครื่องไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลองยังมีข้อจำกัดในการกระจายคลื่นที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้สำหรับเตาบางส่วนได้รับคลื่นมากเกินไปจึงทำให้เกิดรอยไหมเป็นจุดสีดำบริเวณผิวหน้าของสำหรับเตา
3. ควรมีการทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีอื่นเพิ่มเติม
4. ควรมีการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสำหรับเตาที่เป็นสารออกฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ
5. ควรมีงานวิจัยต่อเนื่องในการนำสำหรับเตาอบแห้งไปสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เพื่อนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในรูปแบบต่างๆ ในระดับอุตสาหกรรมผลิตเครื่องสำอางและอาหารเสริมเพื่อสุขภาพ

บรรณานุกรม

- การไฟฟ้านครหลวง. ม.ป.ป. **ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor : PF) และวิธีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้ดีขึ้น**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.mea.or.th/home/index.php> (22 กรกฎาคม 2556).
- กิตติพงษ์ ห่วงรักษ์. 2540. **กระบวนการแปรรูปอาหาร**. กรุงเทพฯ: ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 135 น.
- กิตติพันธ์ สุนทราศรี, ชاکริต เกียรติคุณรัตน์ และ เต๋นจันทร์ ทองอ่อน. 2543. **เครื่องอบแห้งแบบระเหิด**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 83 น.
- จินตนาพร ปันพรม, จุฑามาศ บุญเลา, โชติพงษ์ กาญจนประโชติ และ ฤทธิชัย อัสวราชันย์. 2555. **แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกากมะพร้าว**. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร* 43(3 พิเศษ): 224-227.
- จิตรณา แจ่มเมฆ, สายสนม ประดิษฐ์ดวง, ทนง ภัทรพันธุ์, ปรีชา วิบูลย์เศรษฐ์, เนื่อทอง วนานุวัช, มาลัยวรรณ อารยะสกุล, ศิวาพร ศิวเวช, สมจิตร สุรพัฒน์, สุกนธ์ชื่น ศรีงาม และ อรอนงค์ นัยวิกุล. 2546. **วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 528 น.
- จิตติกานต์ ปัญญาใหญ่. 2550. **กิจกรรมด้านออกซิเดชันของสาหร่ายเตา**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 134 น.
- ณรงค์ นิยมวิทย์. 2538. **องค์ประกอบและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของอาหาร**. กรุงเทพฯ: ฟอรัมเพร็นติ้ง. 237 น.
- ดวงพร อมรเลิศพิศาล, กฤษณา ดวงจันทร์, ดวงดา กาญจนโพธิ์, ธวัช แต้โสดิภูต และ ยวดี พิรพรพิศาล. 2555. **ฤทธิ์ปกป้องผลกระเพาะอาหารของสาหร่ายเตา**. *วารสารวิทยาศาสตร์ มข* 40(1): 236-241.
- ธิดารัตน์ พิรภาคย์ และ ศศิธร ตรงจิตภักดี. 2553. **ผลของวิธีการทำแห้งต่อปริมาณ 6-gingerol สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสมบัติการต้านออกซิเดชันของขิง (*Zingiber officinale*)**. น. 578-584. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธนศักดิ์ แซ่เลี้ยว. 2552. **ผลของการทำแห้งต่อสารประกอบฟีนอลิกและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของกระชายเหลือง (*Boesenbergia pandurata* (Roxb.) Schltr.)**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 106 น.

ธีระวัฒน์ รัตนพจน์, รัตนภรณ์ จันทร์ทิพย์, เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน และ ดวงพร อมรเลิศพิศาล.

2554. การเปรียบเทียบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและกลุ่มสารสำคัญของสาหร่ายเตาใน 3 ถดูลาล. น. 100-101. ใน การประชุมวิชาการประมม ครึ่งที่ 6. คณะเทคโนโลยีการประมม และทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่.

น้ำฝน ไชยลังกา, รัตนภรณ์ จันทร์ทิพย์, ดวงพร อมรเลิศพิศาล และ ฤทธิชัย อัสวราชันย์. 2555.

ผลกระทบของระดับพลังงานไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของสาหร่ายเตาอบแห้ง. น. 121-130. ใน การประชุมวิชาการประมม ครึ่งที่ 6. คณะเทคโนโลยีการประมม และทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่.

นิธิยา รัตนปนนท์. 2544. หลักการแปรรูปอาหารเบื้องต้น. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์. 160 น.

_____. 2545. เคมีอาหาร. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์. 487 น.

ปริญญช อินทร์รอด. 2551. ฤทธิต้านออกซิเดชันและปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมของส่วน

สกัดจากต้นเร่วหอมและว่านสาวหลง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยบูรพา. 55 น.

ปองพล สุริยะกันทร และ ฤทธิชัย อัสวราชันย์. 2557. อิทธิพลของอุณหภูมิและความหนาของชั้น

วัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของดอกคาโมมาลอบแห้ง. น. 121-124.

ใน การประชุมวิชาการวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวแห่งชาติ ครึ่งที่ 12. สถาบันวิจัยเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่.

_____. 2555. แบบจำลองการอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟ. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 18(1): 59-67.

ปองพล สุริยะกันทร, นักรบ นาคประสม และ ฤทธิชัย อัสวราชันย์. 2556. การศึกษาสภาวะที่

เหมาะสมในการอบแห้งขมิ้นชันด้วยวิธีการพื้นผิวดอบสนอง. **Rajabhat Journal of Science, Humanities & Social Sciences** 13(1): 1-8.

ผดุงศักดิ์ รัตน์เดโช. 2551. พื้นฐานการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ. กรุงเทพฯ:

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 559 น.

ภณิกษา วิชยปรีชา, บัญชา ยิ่งงาม และ วันดี รังสิวิจิตรประภา. 2555. การหาสภาวะที่เหมาะสมของ

ยาพินาสเตอไรด์ในรูปแบบโปรตีนไอโซมด้วยวิธีตอบสนองพื้นผิว. น. 105-111. ใน การ

ประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานระดับชาติ ครึ่งที่ 4. คณะเภสัชศาสตร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น.

ยุวดี พิรพรพิศาล, จูติกานต์ ปัญโญใหญ่ และ ดวงพร อมรเลิศพิศาล. 2555. ฤทธิต้านอนุมูลอิสระ

และด้านการอักเสบของสาหร่ายเตา. วารสารวิทยาศาสตร์ มช 40(1): 228-235.

- ยูวดี พิรพรพิศาล, ดวงพร อมรเลิศพิศาล, ดวงตา กาญจนโพธิ์, ธวัช แต้โสดติกุล, ญาณิ พงษ์ไพบูลย์ และ สุดาพร ตงศิริ. 2552. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการ “ศักยภาพของสาหร่ายน้ำจืดขนาดใหญ่ในการเป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหารและเวชสำอาง”. กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.). 56 น.
- ยูวดี พิรพรพิศาล, สนิท มกรแก้วเกตุ, อิศรพงษ์ พงษ์ศิริกุล, ดวงพร อมรเลิศพิศาล, จีรพร เพกเกาะ และ สุดาพร ตงศิริ. 2549. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการ “ศักยภาพของสาหร่ายวารสารวิทยาศาสตร์ มข. ปีที่ 40 ฉบับที่ 1 235 งานวิจัยนำจืดขนาดใหญ่ในการนำมาเป็นอาหารและยา” กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.). 189 น.
- ยูวดี พิรพรพิศาล, สนิท มกรแก้วเกตุ, อิศรพงษ์ พงษ์ศิริกุล, อร่าม คู่้มกลาง, นัตจุฑาภรณ์ เลิศลีลา กิจจา, บัณฑิต บุญสินไชย, สมชัย อวเกียรติ, สุนทรี เปื้องการ, กัญญา สุจิตตวงสานนท์, ดวงตา กาญจนโพธิ์, ไชยง รุจจนเวท, ศรีสุลักษณ์ ธีรานุกพัฒนา, กนกพร แสนเพชร, จีรพร เพกเกาะ, ดวงพร อมรเลิศพิศาล, โฉมยง ไชยอุบล, สุดาพร ตงศิริ, คมสัน เรืองฤทธิ์ และ ลภัสรา มุ่งหมาย. 2548. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการศักยภาพของสาหร่ายน้ำจืดขนาดใหญ่ในการนำมาเป็นอาหารและยา. กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (สกว.).
- ราม แยมแสงสังข์. 2550. การอบแห้งสาหร่ายเกลียวทองระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก. สงขลา: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 110 น.
- รุ่งทิพย์ วงศ์ต่อม. 2549. การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในกระบวนการอบแห้งลำไย (*Euphoria longana* Lam.) แบบแห้งผล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยศิลปากร. 133 น.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต (บรรณาธิการ). 2549. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมเกษตร. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 466 น.
- ฤทธิชัย อัสวราชันย์. 2553. การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยคลื่นไมโครเวฟ. วารสารวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต 1(2): 31-42.
- ฤทธิชัย อัสวราชันย์, ภาณุเดช แสงเจริญรัตน์, สุเนตร สืบคำ, เทียรณิ มั่งมูล และ ดวงกมล จนใจ. 2554. จลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยลมร้อนของเปลือกทับทิม. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 17(1): 27-34.
- วาริน แสงกิตติโกมล. 2543. ปริมาณรวมของสารต้านอนุมูลอิสระในผัก ผลไม้และสมุนไพร. วารสารสหเวชศาสตร์ 1: 11-18.

- _____. 2546. การเปรียบเทียบปริมาณสารโพลีฟีนอลิกส์และปริมาณรวมการต้านสารอนุมูลอิสระในผักและสมุนไพร. วารสารสหเวชศาสตร์ 3: 91-99.
- วิไล รังสาทอง. 2547. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: บริษัท เท็กซ์ แอนด์เจอร์นัลส์ จำกัด. 500 น.
- ศรีจันทร์ พรจิราศิลป์. 2546. ความก้าวหน้าทางเภสัชวิทยา. กรุงเทพฯ: นิเวศการพิมพ์. 146 น.
- ศรัณยา ลาภสังผล. 2550. ผลของสภาวะการอบแห้งต่อสารประกอบระเหยง่ายที่ให้กลิ่นรสและสารประกอบฟีนอลิกในลำไยอบแห้งพร้อมเปลือกและชาลำไย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยศิลปากร. 112 น.
- สมชาติ โสภณธนฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ และ ภูมิรินทร์ แจ่มเชื้อ. 2554. การลดฟองอากาศในกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกโดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบิ้ลกัน. น. 171-175. ใน การประชุมวิชาการข่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี.
- สรจักร เทียมดาว และ ชวดี พิรพรพิศาล. 2552. ความหลากหลายของสาหร่ายน้ำจืดกินได้ในแม่น้ำโขงและแม่น้ำน่าน. วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง 3(1): 115-124.
- ลักกมณ เทพหัสดิน ณ อยุธยา. 2555. การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. กรุงเทพฯ: ท็อป จำกัด. 211 น.
- สุนทร สืบคำ และ ฤทธิชัย อัสวราชันย์. 2554. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งสำหรับวัสดุพรม. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 17(1): 59-68.
- เสาวนีย์ เหล่าสิงห์ สิริธร อ่างแก้ว และ มะลิวรรณ อมตวงไชย. 2554. เทคนิคตรวจวัดความสามารถต้านอนุมูลอิสระโดยรวมแบบใหม่ด้วยเทคนิคแอมเพอร์โรเมทรีในระบบที่มีการไหลที่ขั้วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอนที่ดัดแปรด้วยคาร์บอนนาโนทิวบ์. วารสารวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยอุบลฯ ฉบับพิเศษ 1: 10-20.
- โอภา วัชรคุปต์, ปรีชา บุญจง, จันทนา บุญยะรัตน์ และ มาลีรักษ์ อัดด์สินทอง. 2549. สารต้านอนุมูลอิสระ. นนทบุรี: พี.เอส.พริ้นท์. 190 น.
- Afolabi, T. J. 2014. Thin layer drying kinetics and modelling of okra (*Abelmoschus Esculentus* (L.) Moench) slices under natural and forced convective air drying. **Food Science and Quality Management** 28: 35-50.

- Akpınar, E. K. 2008. Mathematical modelling and experimental investigation on sun and solar drying of white mulberry. **Journal of Mechanical Science and Technology** 22: 1,544-1,553.
- Akpınar, E. K. and Y. Bicer. 2007. Modelling of thin layer drying kinetics of sour cherry in solar dryer and under open sun. **Journal of Scientific & Industrial Research** 66: 764-771.
- Antonio, P., D. C. Alessandra and C. Giampaola. 2003. From plums to prunes: Influence of drying parameters on polyphenols and antioxidant activity. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 51: 3,675-3,681.
- Assawarachan, R and A. Noomhorm. 2008. Effect of operating condition on the kinetic of color change of concentrated pineapple juice by microwave vacuum evaporation. **Journal of Food, Agriculture & Environment** 6(3&4): 47-53.
- _____. 2011. Mathematical models for vacuum microwave concentration behavior of pineapple juice. **Journal of Food Process Engineering** 34(5): 1,485-1,505.
- Assawarachan, R., M. Nookong, N. Chailungka and D. Amornlerdpison. 2013. Effect of microwave power on the drying characteristics, color and phenolic content of *spirogyra* sp. **Journal of Food, Agriculture & Environment** 11(1): 15-18
- Alibas, I. 2007. Microwave, air and combined microwave-air-drying parameters of pumpkin slices. **LWT Food Science and Technology** 40: 1,445-1,451.
- AOAC. 2010. **Official Methods of Analysis**. 18th ed. Washington, DC., USA: Association of Official Analytical Chemists.
- Blois, M. S. 1958. Antioxidant determinations by the use of a stable free radical. **Nature** 181: 1,199-1,200.
- Chen, Z. Y. and P. T. Chan. 1996. Antioxidation activity of green tea catechins in canola oil. **Chemistry and Physics of Lipids** 79: 157-163.
- Cowan, M. M. 1999. Plant products as Antimicrobial agents. **Clinical Microbiology** 12: 564-582.
- Dadali, G., D. K. Apar and B. Özbek. 2007a. Microwave drying kinetics of okra. **Drying Technology** 25(5): 917-924.
- Dadali, G., E. Demirhan and B. Özbek. 2007b. Color change kinetics of spinach undergoing microwave drying. **Drying Technology** 25(10): 1,713-1,723.

- Demirhan, E. and B. Özbek. 2009. Color Change Kinetics of Microwave-Dried Basil. **Drying Technology** 27(1): 156-166.
- Doymaz, İ. 2006. Thin-layer drying behaviour of mint leaves. **Journal of Food Engineering** 74: 370-375.
- Evin, D. 2012. Thin layer drying kinetics of *Gundelia tournefortii* L. **Food and Bioprocess Processing** 90: 323-332.
- Harbourne, N., E. Marete, J. C. Jacquier and D. O'Riordan. 2009. Effect of drying methods on the phenolic constituents of meadowsweet (*Filipendula ulmaria*) and willow (*Salix alba*). **Food Science and Technology** 42: 1,468-1,473.
- Helmja, K. M., J. G. Vaher and M. Kaljurand. 2007. Characterization of bioactive compounds contained in vegetables of the Solanaceae family by capillary electrophoresis. **Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Chemistry** 56: 172-186.
- Hossain, M. B., C. Barry-Ryan, A. B. Martin-Diana and N. P. Brunton. 2010. Effect of drying method on antioxidant capacity of six Lamiaceae herbs. **Food Chemistry** 123: 85-91.
- Hou, W. C., Y. C. Chen, Y. H. Lin, L. L. Yang and M. H. Lee. 2001. Antioxidant activities of trypsin inhibitor a 33 kDa root storage protein of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam cv. Tainong 57. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 49: 2,978-2,981.
- Huang, D. B. Ou and R. L. Prior. 2005. The chemistry behind dietary antioxidant capacity assays. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 3(6): 1,841-1,856.
- Icelandic Co., Ltd. No date. **Electromagnetic wave**. [Online]. Available http://www.myfirstbrain.com/student_view.aspx?ID=29817 (14 May 2013).
- Idris A., K. Khalid and W. Omar. 2004. Drying of silica sludge using microwave heating. **Applied Thermal Engineering** 24: 905-918.
- Jean, K., E. Sigurbjorn, B. Asa. 2010. **Pharmaceutical and cosmetic use of extracts from algae obtainable from saline hot water sources**. [Online]. Available <http://www.faqs.org/patents/app/20100028376#ixzz0flu0nbos> (20 May 2013).
- Jing, Y., C. Jin Feng, Z. Y Ying and M. Chun. 2010. Effects of drying processes on sweet potatoes. **Agircultural Sciences in China** 9(10): 1,522-1,529.

- Kingsly, A. R. P and D. B. Singh. 2007. Drying kinetics of pomegranate arils. **Journal of Food Engineering** 79: 741-744.
- Kinsella, J. E., E. Frankel, B. German and J. Kanner. 1993. Possible mechanism for the protection role of antioxidants in wine and plant food. **Food Technology** 4: 85-89.
- Kumar, N., B. C. Sarkar and H. K. Sharma. 2012. Mathematical modelling of thin layer hot air drying of carrot pomace. **Journal of Food Science and Technology** 49(1): 33-41.
- Lin, T. M. T. D. Durance and C. H. Scaman. 1998. Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices. **Food research International** 31: 111-117.
- Limpaiboon, K. 2011. Effects of temperature and slice thickness on drying kinetics of pumpkin slices. **Walailak Journal of Science and Technology** 8(2): 159-166.
- Madamba, P. S., R. H. Driscoll and K. A. Buckle. 1996. The thin layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering** 29: 75-97.
- Maskan, M. 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. **Journal of Food Engineering** 48: 177-182.
- McMinn, W. A. M. 2006. Thin-layer modeling of the convective, microwave, microwave-convective and microwave vacuum drying of lactose powder. **Journal of Food Engineering** 72: 113-123.
- Montgomery D. C. 2006. **Design and analysis of experiments**. New York: John Wiley & Son Asia.
- Özbek, B. and G. Dadali. 2007. Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. **Journal of Food Engineering** 83: 541-549.
- Ozkan, I, A., B. Akbudak and N. Akbudak. 2007. Microwave drying characteristics of spinach. **Journal of Food Engineering** 78: 577-583.
- Pardeshi, I. L., S. Arora and P. A. Borker. 2009. Thin-layer drying of green peas and selection of a suitable thin-layer drying model. **Drying Technology** 27: 288-295.
- Pérez-Francisco, J. M., R. Cerecero-Enríquez, I. Andrade-González, J. A. Ragazzo-Sánchez and G. Luna-Solano. 2008. Optimization of vegetal pear drying using response surface methodology. **Drying Technology** 26(11): 1,401-1,405.

- Pongtong, K., R. Assawarachan and A. Noomhorm. 2011. Mathematical models for vacuum drying characteristics of pomegranate aril. **Journal of Food Science and Engineering** 1(1): 11-19.
- PÜSCHNER Microwave Power System.** no date. [Online]. Available http://www.pueschner.com/basics/phys_basics_ko.php (21 May 2013).
- Rangkadilok, N., L. Worasuttayangkum, R. N. Bennett and J. Satayavivad. 2005. Identification and quantification of polyphenolic compounds in longan (*Euphoria longana Lam.*) fruits. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 53: 1,387-1,392.
- Re, R., N. Pellegrini, A. Pannala, M. Yang, C. Rice-Evan. 1999. Antioxidant activity applying an improve ABTS radical cation decolorisation assay. **Free Radical Bio Med** 26: 1,231-1,237.
- Roy, M. K., M. Takenaka, S. Isobe and T. Tsushida. 2007. Antioxidant potential, anti-proliferative activities, and phenolic content in water-soluble fractions of some commonly consumed vegetables: Effects of thermal treatment. **Food Chemistry** 103(1): 106-114.
- Rudra, S. G., H. Singh, S. Basu and U. S. Shivhare. 2008. Enthalpy Entropy compensation during thermal degradation of chlorophyll in mint and coriander puree. **Journal of Food Engineering** 86: 379-387.
- Sachindra, N. M., M. K. W. A. Airanthi, M. Hosokaw and K. Miyashita. 2010. Radical scavenging and singlet oxygen quenching activity of extracts from Indian seaweeds. **Journal of Food Science Technology** 47: 94-99.
- Sacilik, K. and A. K. Elicin. 2006. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. **Journal of Food Engineering** 73: 281-289.
- Shahidi, F. and P. K. J. Wanasundara. 1992. Phenolic antioxidant. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition** 32: 67-103.
- Soong, Y. Y. and P. J. Barlow. 2004. Antioxidant activity and phenolic content of selected fruit seeds. **Food Chemistry** 88: 411-417.
- Sripinyowanichi, J., O. Sopanattayanon, R. Assawarachan, K. Theppadungporn and A. Noohorm. 2012. Effects of moisture content of dried coconut residue on its EMC, shelf life and

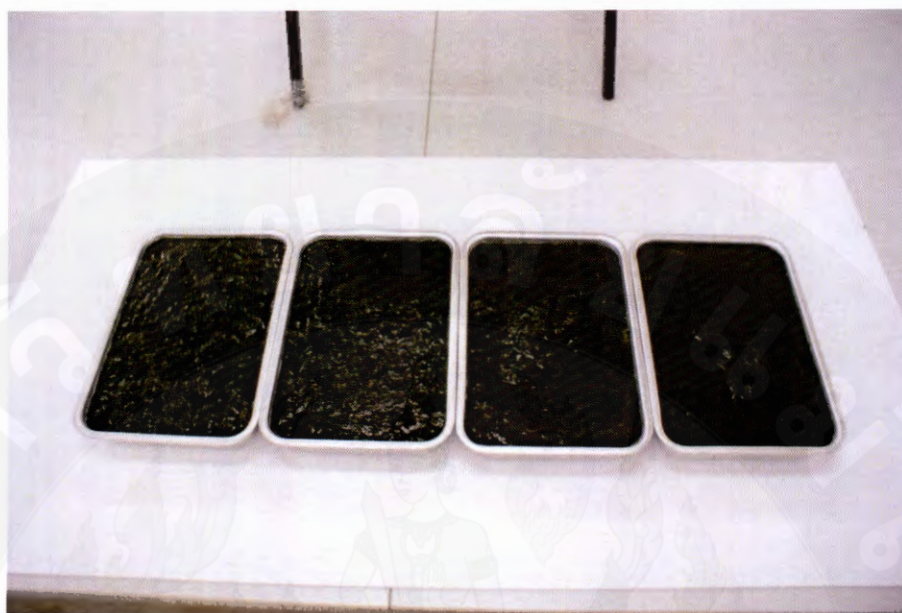
- quality. **Proceedings of the International Congress on Food Engineering and Technology**. 28-30 March 2012. Bangkok: IMPACT Convention Center, Thailand.
- Takashi, F., M. Wakaizumia, T. Ikamib and M. Saitoa. 2008. Amla (*Emblica officinalis* Gaertn.) extract promotes procollagen production and inhibits matrix metalloproteinase-1 in human skin fibroblasts. **Journal of Ethnopharmacology** 119: 53-57.
- Tamon, H., T. Furuta, S. Adachi, S. Yamamoto และ วิวัฒน์ ตันชะพานิชกุล. 2548. เทคโนโลยีอบแห้งในอุตสาหกรรมอาหาร. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 200 น.
- Thao, H., M. and A. Noomhorm. 2011. Modeling and effects of various drying methods on sweet potato starch properties. **Walailak Journal of Science and Technology** 8(2): 139-158.
- Therdthai, N. and W. Zhou. 2009. Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen). **Journal of Food Engineering** 91: 482-489.
- Vega-Gálvez, A., D. K. Scala, K. Rodríguez and R. Lemus-Mondaca. 2009. Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annum*, L. var. Hungarian). **Food Chemistry** 117: 647-653.
- Waewsak, J., S. Chindaruksa and C. Punlek. 2006. A mathematical modeling study of hot air drying for some agricultural product. **Journal of Science and Technology** 11(1): 14-20.
- Wang, Z., J. Sun, F. Chen, X. Liao and X. Hu. 2007. Mathematical modeling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. **Journal of Food Engineering** 80: 536-544.
- Wang, Z., J. Sun, X. Liao, F. Chen, G. Zhao, J. Wu and X. Hu. 2006. Mathematical modelling on hot air drying of thin layer apple pomace. **Journal of Food Research International** 40(1): 39-46.
- Wei Cui, Z., S. Ying Xu and D. Wen Sun. 2004. Microwave vacuum drying kinetics of carrot slices. **Journal of Food Engineering** 65: 157-164.
- Zafer, E., I. Filiz. 2009. Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology. **Journal of Food Engineering** 91: 533-541.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

สาหร่ายเตา เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง และตัวอย่างสารสกัดน้ำของสาหร่ายเตาที่
ใช้ในการวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ



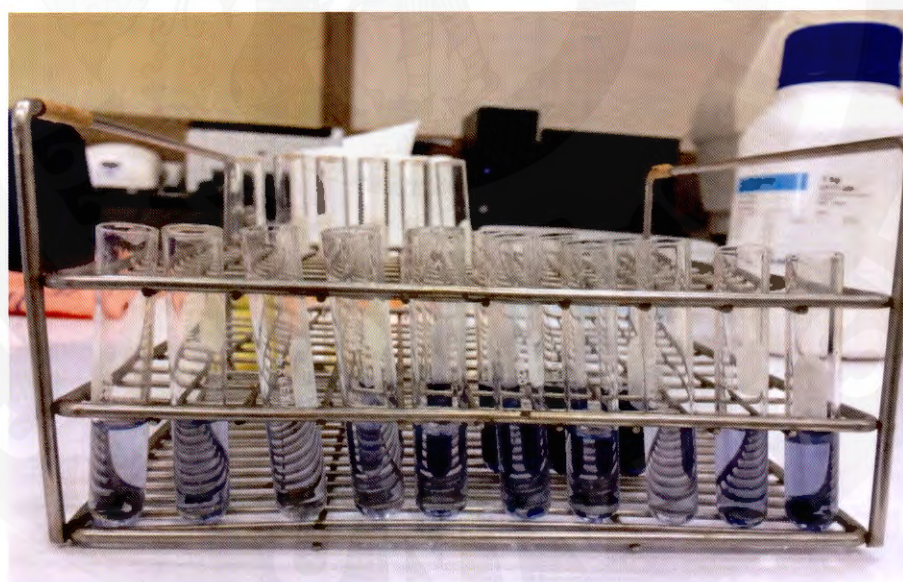
ภาพผนวก 1 สำหรับเตาที่ใช้ในการทดลอง



ภาพผนวก 2 เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนแบบถาดที่ใช้ในการทดลอง



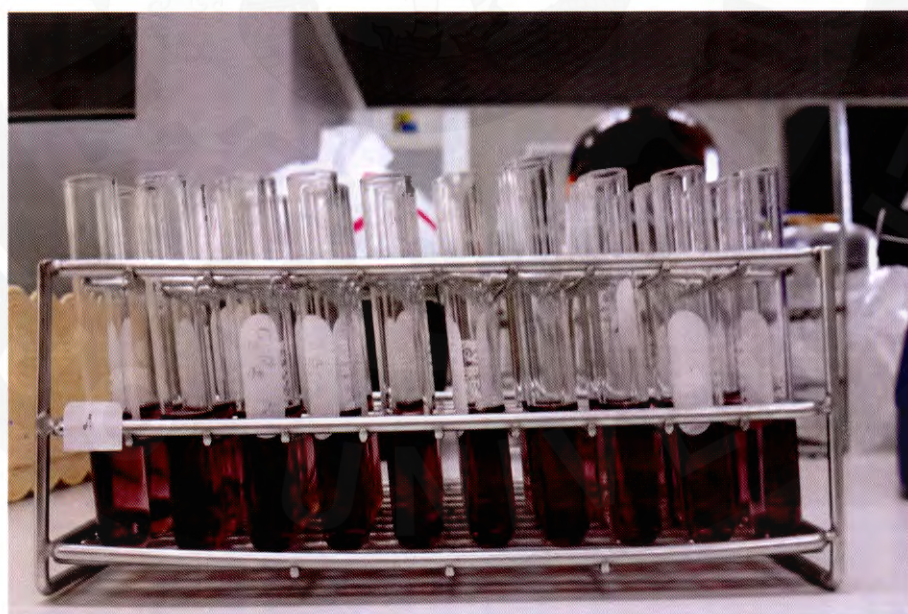
ภาพผนวก 3 เครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง



ภาพผนวก 4 ตัวอย่างสารสกัดน้ำของสาหร่ายเตาที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด



ภาพผนวก 5 ตัวอย่างสารสกัดน้ำของสาหร่ายเคาที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS



ภาพผนวก 6 ตัวอย่างสารสกัดน้ำของสาหร่ายเคาที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH

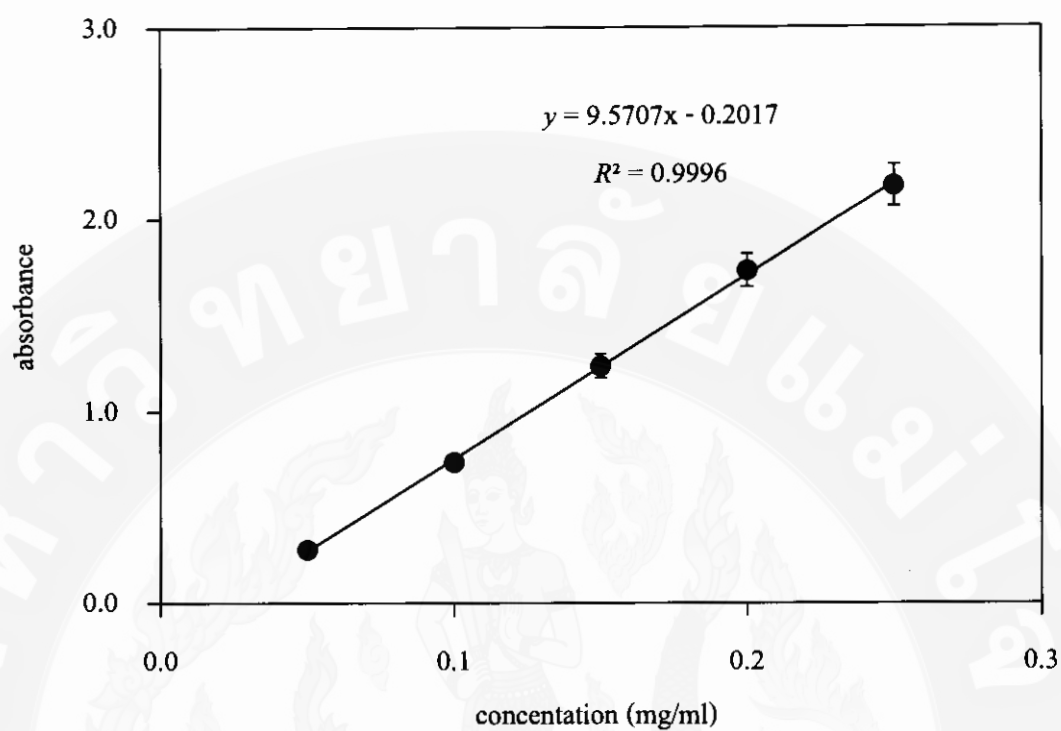


ภาคผนวก ข

**การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและ
ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ**

ตารางผนวก 1 ค่าการดูดกลืนแสงของกรดแกลลิก (gallic acid) ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

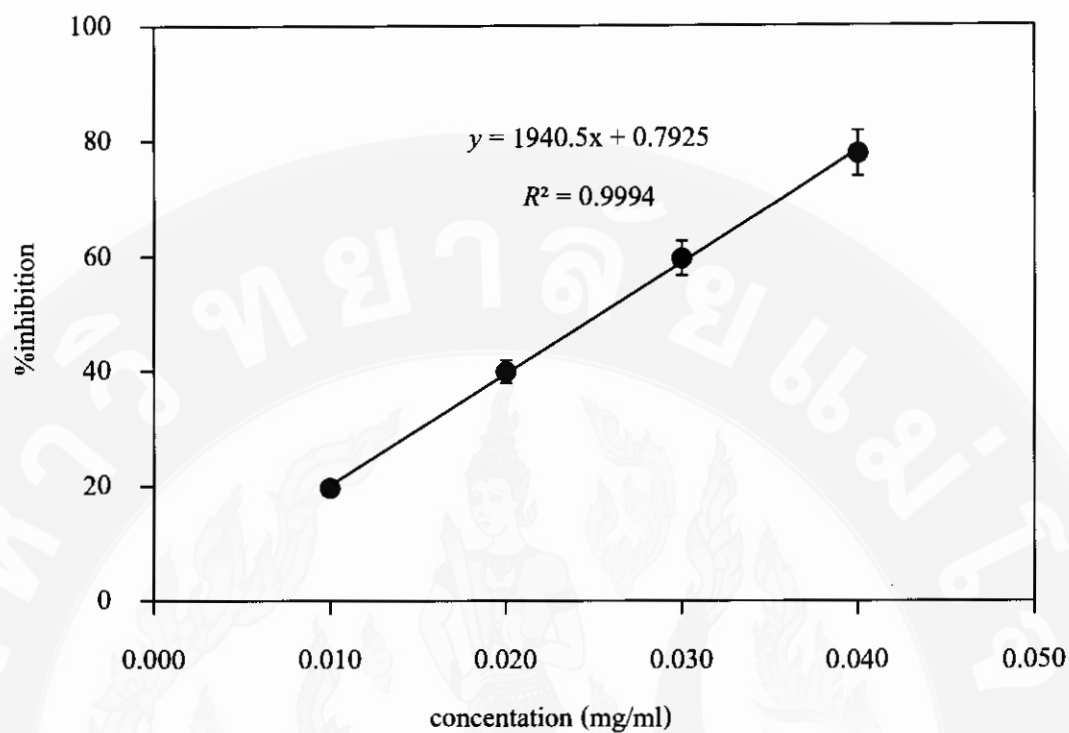
concentration (mg/ml)	replication	absorbance 765 nm
0.05	1	0.308
	2	0.279
	3	0.260
	average	0.282
	±SD	0.024
0.10	1	0.750
	2	0.747
	3	0.718
	average	0.738
	±SD	0.018
0.15	1	1.252
	2	1.235
	3	1.225
	average	1.237
	±SD	0.014
0.20	1	1.742
	2	1.743
	3	1.718
	average	1.734
	±SD	0.014
0.25	1	2.183
	2	2.174
	3	2.174
	average	2.177
	±SD	0.005



ภาพผนวก 7 กราฟมาตรฐานของสารละลายกรดแกลลิก (gallic acid) สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

ตารางผนวก 2 ค่าการดูดกลืนแสงของโทรล็อกซ์ (trolox) และ %inhibition ที่ความเข้มข้นต่างๆ
สำหรับวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS

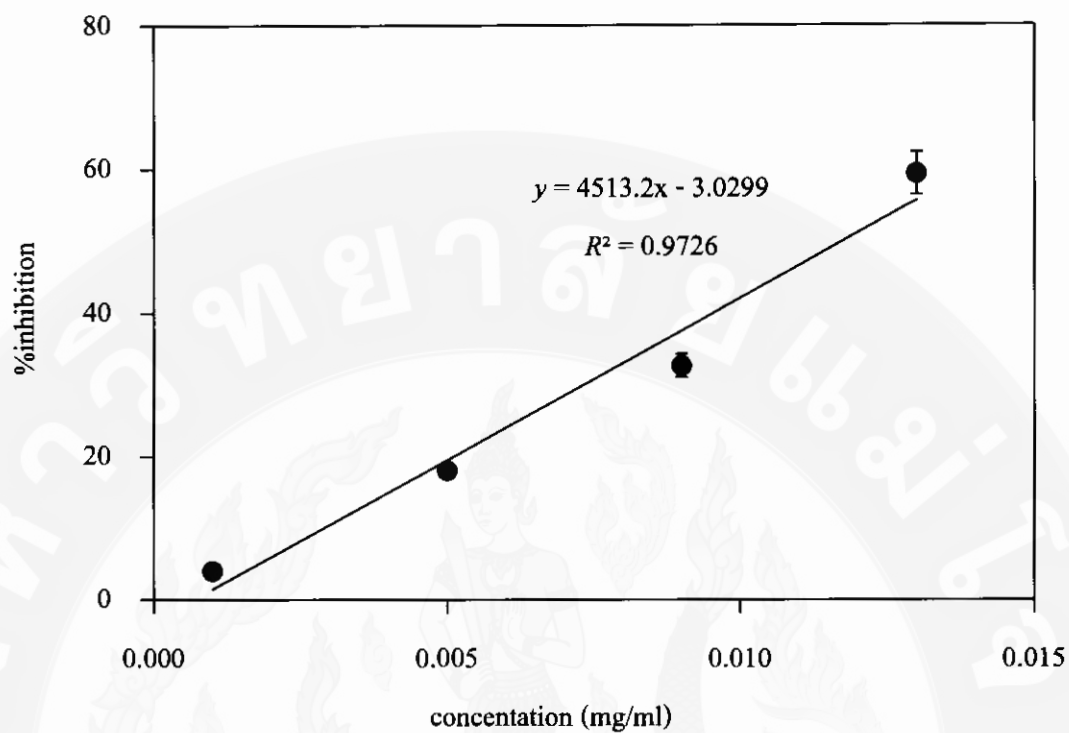
concentration (mg/ml)	replication	absorbance 734 nm	%inhibition
control	1	0.690	-
	2	0.700	-
	3	0.701	-
	average	0.697	-
	±SD	0.006	-
0.01	1	0.564	18.26
	2	0.557	20.43
	3	0.557	20.54
	average	0.559	19.74
	±SD	0.004	1.29
0.02	1	0.423	38.70
	2	0.417	40.43
	3	0.416	40.66
	average	0.419	39.93
	±SD	0.004	1.07
0.03	1	0.299	56.67
	2	0.269	61.57
	3	0.274	60.91
	average	0.281	59.72
	±SD	0.016	2.66
0.04	1	0.191	72.32
	2	0.141	79.86
	3	0.131	81.31
	average	0.154	77.83
	±SD	0.032	4.83



ภาพผนวก 8 กราฟมาตรฐานของโทรล็อกซ์ (trolox) สำหรับวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS

ตารางผนวก 3 ค่าการดูดกลืนแสงของโทรล็อกซ์ (trolox) และ %inhibition ที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH

concentration (mg/ml)	replication	absorbance 517 nm	%inhibition
control	1	0.834	-
	2	0.839	-
	3	0.844	-
	average	0.839	-
	±SD	0.005	-
0.001	1	0.801	3.96
	2	0.809	3.58
	3	0.805	4.62
	average	0.805	4.05
	±SD	0.004	0.53
0.005	1	0.696	16.55
	2	0.687	18.12
	3	0.678	19.67
	average	0.687	18.11
	±SD	0.009	1.56
0.009	1	0.563	32.49
	2	0.563	32.90
	3	0.567	32.82
	average	0.564	32.74
	±SD	0.002	0.21
0.013	1	0.342	58.99
	2	0.354	57.81
	3	0.327	61.26
	average	0.341	59.35
	±SD	0.014	1.75



ภาพผนวก 9 กราฟมาตรฐานของโทรล๊อกซ (trolox) สำหรับวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH



ภาคผนวก ก

การคำนวณค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง

$$\text{การคำนวณค่าไฟฟ้า} = \text{การใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชั่วโมง (kW)} \times \text{ชั่วโมงการทำงาน (hr)} \times \text{ราคาต่อหน่วย (3 baht/kW*hr)}$$

การทดลองอบแห้งแต่ละ 1 ครั้ง ได้สาหร่ายเตาอบแห้ง จำนวน 45 g

ดังนั้นเมื่อเทียบต่อสาหร่ายเตาอบแห้ง จำนวน 1,000 g เท่ากับ $1,000/45 = 22.22$ เท่า

1. เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อน

1.1 การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C

- ชั่วโมงการทำงานในการอบแห้ง เท่ากับ 9.83 hr
- การใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชั่วโมง 1.02 kW
- ค่าไฟฟ้า
$$= 1.02 \times 9.83 \times 3.0 \times 22.22$$
$$= 668.44 \text{ baht/1,000 g}_{\text{dry matter}}$$

1.2 การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 65°C

- ชั่วโมงการทำงานในการอบแห้ง เท่ากับ 7.00 hr
- การใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชั่วโมง 1.10 kW
- ค่าไฟฟ้า
$$= 1.10 \times 7.00 \times 3.0 \times 22.22$$
$$= 513.33 \text{ baht/1,000 g}_{\text{dry matter}}$$

1.3 การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C

- ชั่วโมงการทำงานในการอบแห้ง เท่ากับ 5.17 hr
- การใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชั่วโมง 1.14 kW
- ค่าไฟฟ้า
$$= 1.14 \times 5.17 \times 3.0 \times 22.22$$
$$= 392.92 \text{ baht/1,000 g}_{\text{dry matter}}$$

1.4 การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 75°C

- ชั่วโมงการทำงานในการอบแห้ง เท่ากับ 3.67 hr
- การใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชั่วโมง 1.54 kW
- ค่าไฟฟ้า
$$= 1.54 \times 3.67 \times 3.0 \times 22.22$$
$$= 376.79 \text{ baht/1,000 g}_{\text{dry matter}}$$

2. เครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

2.1 การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความเข้มข้น 0.77 W/g

- ชั่วโมงการทำงานในการอบแห้ง เท่ากับ 1.33 hr
- การใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชั่วโมง 0.52 kW
- ค่าไฟฟ้า
$$= 0.52 \times 1.33 \times 3.0 \times 22.22$$
$$= 46.11 \text{ baht/1,000 } g_{\text{dry matter}}$$

2.2 การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความเข้มข้น 1.55 W/g

- ชั่วโมงการทำงานในการอบแห้ง เท่ากับ 0.72 hr
- การใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชั่วโมง 0.83 kW
- ค่าไฟฟ้า
$$= 0.83 \times 0.72 \times 3.0 \times 22.22$$
$$= 39.84 \text{ baht/1,000 } g_{\text{dry matter}}$$

2.3 การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความเข้มข้น 2.00 W/g

- ชั่วโมงการทำงานในการอบแห้ง เท่ากับ 0.53 hr
- การใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชั่วโมง 1.05 kW
- ค่าไฟฟ้า
$$= 1.05 \times 0.53 \times 3.0 \times 22.22$$
$$= 37.10 \text{ baht/1,000 } g_{\text{dry matter}}$$

2.4 การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความเข้มข้น 2.50 W/g

- ชั่วโมงการทำงานในการอบแห้ง เท่ากับ 0.35 hr
- การใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชั่วโมง 1.34 kW
- ค่าไฟฟ้า
$$= 1.34 \times 0.35 \times 3.0 \times 22.22$$
$$= 31.27 \text{ baht/1,000 } g_{\text{dry matter}}$$



ภาคผนวก ง

บทความวิชาการที่ได้นำเสนอและตีพิมพ์เผยแพร่

1. บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ:

Assawarachan, R., Nookong, M., Chailungka, N and Amornlerdpison, D. 2013. Effects of microwave power on the drying characteristics, color and phenolic content of *Spirogyra* sp. **Journal of Food, Agriculture & Environment** 11(1): 15-18.

Chailungka, N and Assawarachan, R. 2014. The thin layer drying characteristics of *Spirogyra* sp. **Journal of Food, Agriculture & Environment**. (Manuscript accepted)

2. บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ:

น้ำฝน ไชยลังกา และฤทธิชัย อัสวราชันย์. 2557. จลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟของสาหร่ายเตา. วารสารวิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา. (Manuscript accepted)

3. บทความวิจัยที่นำเสนอในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ:

Chailungka, N. and Assawarachan, R. 2014. Optimization of drying conditions for quality dried *Spirogyra* sp. using Box-Behnken methodology. In International Conference on Agriculture and Agro-Industry 2014 (ICAAI2014) 20-21 November 2014. Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand. (Abstract accepted)

4. บทความวิจัยที่นำเสนอในที่ประชุมวิชาการระดับชาติ:

น้ำฝน ไชยลังกา, รัตนาภรณ์ จันทร์ทิพย์, ดวงพร อมรเลิศพิศาล และฤทธิชัย อัสวราชันย์. 2555. ผลกระทบของระดับพลังงานไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของสาหร่ายเตาอบแห้ง. การประชุมวิชาการประมง ครั้งที่ 7. วันที่ 6-8 ธันวาคม 2555. คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ สันทราย เชียงใหม่.

น้ำฝน ไชยลังกา, รัตนาภรณ์ จันทร์ทิพย์, ดวงพร อมรเลิศพิศาล และฤทธิชัย อัสวราชันย์. 2556. แบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางของสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟ. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 14. วันที่ 1-4 เมษายน 2556 ณ โรงแรมหัวหินแกรนด์ แอนด์ พลาซ่า จังหวัดประจวบคีรีขันธ์.



ภาคผนวก จ

ประวัติผู้วิจัย

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นางสาวน้ำฝน ไชยลังกา
เกิดเมื่อ 16 ตุลาคม 2532
ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอาหาร) คณะวิศวกรรม
และอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ที่อยู่ 109 หมู่ 15 ต.จั่ว อ.เทิง จ.เชียงราย 57160
อีเมล (e-mail) polaris_lek@hotmail.com และ namphon.chailungka@gmail.com