



**ปัจจัยของวิธีและสภาวะการอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์และคุณภาพของใบเตย**  
**Effect of Drying Method and Condition on Drying Kinetics and Qualities**  
**of Pandanus Leaf**

**อนุสรฯ นาดิ**

**Anusara Nadee**

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา**  
**วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี**  
**มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of**  
**Master of Engineering in Chemical Engineering**  
**Prince of Songkla University**

**2555**

**ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

ชื่อวิทยานิพนธ์      ปัจจัยของวิธีและสภาวะการอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์และคุณภาพของใบเตย  
ผู้เขียน              นางสาวอนุสรนา นาคี  
สาขาวิชา              วิศวกรรมเคมี

---

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุภวรรณ ฐิระวณิชย์กุล)      (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชญานุช แสงวิเชียร)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุภวรรณ ฐิระวณิชย์กุล)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุษณา ฐิระวณิชย์กุล)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จอมภพ แววศักดิ์)

.....กรรมการ  
(ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

.....  
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์ดารา)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์      ปัจจัยของแนวทางการอบแห้งที่มีต่อจลนพลศาสตร์และคุณภาพของใบเตย  
ผู้เขียน                นางสาวอนุสรานาดี  
สาขาวิชา              วิศวกรรมเคมี  
ปีการศึกษา            2554

### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้เพื่อศึกษาปัจจัยของวิธีและสภาวะการอบแห้ง ใบเตยด้วยแหล่งพลังงานความร้อนร่วมต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ เคมี และศึกษาความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะของแต่ละแหล่งพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของใบเตย โดยทำการอบแห้งใบเตยด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ และคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน /รังสีอินฟราเรดแบบสองขั้นตอน อุณหภูมิอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 45-65 องศาเซลเซียส ความเร็วลมเฉลี่ย 1.1 เมตรต่อวินาที กำลังของรังสีอินฟราเรดที่ใช้คือ 500 1,000 และ 1,500 วัตต์ ความชื้นเริ่มต้น 400-600 % มาตรฐานแห้ง ความชื้นสุดท้ายในช่วง 8-12 % มาตรฐานแห้ง ผลการทดลองพบว่า ใบเตยที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนมีอัตราการอบแห้งเร็วกว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว และลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ตามลำดับ อัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการอบแห้ง ข้อมูลจากผลทดลองถูกนำมาวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์และสร้างแบบจำลองสมการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัล สรุปได้ว่า แบบจำลองของลอการิทึม (Logarithmic model) อธิบายข้อมูลจากการทดลองได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะของการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียวมีค่าน้อยกว่าการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมระหว่างรังสีอินฟราเรดกับลมร้อน และลมร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์

การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ คุณภาพทางเคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของใบเตยอบแห้ง พบว่า การอบแห้งใบเตยที่อุณหภูมิสูงจะช่วยลดค่าการเปลี่ยนแปลงของสีเขียวและการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม คุณภาพด้านการหัดตัว พบว่า อุณหภูมิอบแห้งสูงมีการหัดตัวมากกว่าอุณหภูมิอบแห้งต่ำ คุณภาพด้านการคั้นตัว พบว่า อุณหภูมิไม่ส่งผลต่อการคั้นตัว ด้านคุณภาพทางเคมี พบว่า สารระเหยของใบเตยยังคงมีสารให้ความหอมจำพวกคีโตน (ketone) เอสเตอร์ (ester) และ อีเทอร์ (ether) และสำหรับคุณภาพด้านการทดสอบการชิมในรูปแบบของชา

ไบเดย พบว่า ลักษณะของกลิ่น สี รสชาติและความชอบโดยรวมของแต่ละสภาวะการอบแห้งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )

**Thesis Title** Effect of Drying Strategies on Drying Kinetics and Qualities of Pandanus Leaf  
**Author** Miss Anusara Nadee  
**Major Program** Chemical Engineering  
**Academic Year** 2011

The objective of this research is to study the effect of drying strategies method and condition drying of pandanus leaf under combined heat sources on the drying kinetics, physical and chemical quality and specific energy consumption.

The drying kinetics of pandanus leaf under hot air (HA) infrared radiation (IR) microwave (MW) combined hot air and infrared (HA+IR) combined solar and hot air (Solar+HA) and combined microwave hot air (MW+HA) and infrared radiation (MW+IR). For the combined microwave to study the effects of two-stage drying. Drying temperature for all drying strategies was in range between 45 and 65°C, an air flow rate of 1.1 m/s and infrared power of 500, 1,000 and 1,500 W. Fresh cut pandanus leaf samples with initial moisture content ranging of 400-600% dry-basis were tray dried until the desired final moisture content reached to 8-12% dry-basis, depending on drying condition. The experimental result showed that the drying rate of HA+IR was relatively high compared to IR and Solar+HA techniques, respectively. The experimental data was mathematical simulated using conventional empirical drying models. The results showed that the simulated results using the Logarithmic model had a good relation to the experimental data. However, the specific energy consumption (SEC) for pandanus leaf drying with IR source was less than other drying techniques and SEC inversely related to drying temperature.

For qualities analysis of dried pandanus leaf in terms of colorness, shrinkage and rehydration, the result showed that the difference of greenness (negative value of redness) and overall color difference decreased when drying temperature increased. For shrinkage evaluation, percentage of shrinkage of dried pandanus leaf relatively depended on drying temperature whilst percentage of rehydration was not dependent on temperature. For chemical analysis of the aromatic natural raw substance such as ketone, ester and ether for all products. The results stated that most of aromatic substance still be maintained in dried pandanus leaf. For sensory evaluation in drinking tea taste, the results showed that for all pandanus leaf drying conditions provided taste

insignificantly. Finally, the overall acceptability of drinking pandanus leaf tea were not significantly different ( $p > 0.05$ ).

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(6)
สารบัญ	(7)
รายการตาราง	(9)
รายการตารางภาคผนวก	(10)
รายการภาพประกอบ	(11)
รายการภาพประกอบภาคผนวก	(14)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตและวิธีการดำเนินการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การตรวจเอกสาร	4
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	27
2.3 พารามิเตอร์พื้นฐานสำหรับการอบแห้งใบเตย	36
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ	45
3.1 วัสดุคิบ	45
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	45
3.3 สารเคมี	49
3.4 วิธีการวิจัย	49
3.5 การทดสอบคุณภาพของใบเตยภายหลังการอบแห้ง	51

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ	54
บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง	55
4.1 ผลการทดลองหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ของใบเตย	55
4.2 ผลการทดลองหาจลนพลศาสตร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งใบเตย	58
4.3 ความสิ้นเปลืองของพลังงานจำเพาะในการอบแห้งใบเตย	79
4.4 คุณภาพของใบเตยภายหลังอบแห้ง	84
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	97
5.1 ความชื้นสัมพัทธ์ของใบเตย	97
5.2 จลนพลศาสตร์การอบแห้งใบเตย	97
5.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง	98
5.4 คุณภาพใบเตยภายหลังการอบแห้ง	98
5.5 ข้อเสนอแนะ	99
เอกสารอ้างอิง	100
ภาคผนวก	103
ประวัติผู้เขียน	155



## รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณค่าทางโภชนาการของใบเตย	5
2.2	สารประกอบที่วิเคราะห์พบในใบเตยสด	7
2.3	ความชื้นสัมพัทธ์เหนือสารละลายอิมิตัวของเกลือบางอย่างที่อุณหภูมิต่าง ๆ	38
4.1	ค่าคงตัวของรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุลของใบเตย	56
4.2	รูปแบบสมการเอมพิริคัลและค่าคงตัวของใบเตยอบแห้งที่สภาวะการต่าง ๆ	67
4.3	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของการอบแห้งใบเตยที่สภาวะต่าง ๆ	77
4.4	อัตราการอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	83
4.5	ค่าสีของใบเตยภายหลังการอบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ	85
4.6	ร้อยละการหดตัว และกินตัวของใบเตยอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ	87
4.7	คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสเฉลี่ยของใบเตยอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ	95

## รายการตารางภาคผนวก

ตารางภาคผนวกที่	หน้า
1 หลักเกณฑ์การให้คะแนน	108
2 ข้อมูลผลการทดลองความขึ้นสมมูลของไบเตย	113
3 ข้อมูลค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	129
4 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความขึ้น	132
5 ผลวิเคราะห์ส่วนประกอบในตัวอย่างไบเตยที่ผ่านการอบแห้ง	135

## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
2.1 ไบเดย	4
2.2 โครงสร้างของสารประกอบสำคัญในไบเดย	6
2.3 แสดงช่วงความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของรังสีอินฟราเรด	10
2.4 เตาไมโครเวฟ	12
2.5 การให้ความร้อนแบบธรรมดาและแบบไมโครเวฟ	13
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในอาหารและค่าแอกติวิตีของน้ำในอาหารทั่วไป	17
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอกติวิตีของน้ำในอาหารและปริมาณความชื้นในอาหารที่มีความชื้นต่ำ	17
2.8 แผนภาพสีแสดง Hue Chroma และ Value CIE Lab	19
2.9 แสดง L*, a*, b* color space	20
2.10 การกลั่นด้วยไอน้ำ	23
2.11 การกลั่นด้วยน้ำและไอน้ำ	24
2.12 ชุดกลั่นชนิด Clevenger	25
2.13 การกลั่นโดยใช้ตัวทำละลาย	26
2.14 ปริมาตรควบคุม	30
3.1 ไบเดยที่ล้างทำความสะอาดและไบเดยแห้ง	45
3.2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อน	45
3.3 เครื่องอบแห้งแบบถาด	46
3.4 เครื่องอบแห้งแบบพลังงานความร้อนร่วม	47
3.5 เครื่อง Supercritical fluid extractor	48
3.6 เครื่อง FTIR Spectrometer	48
3.7 การวัดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ไบเดย	52

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า	
4.1	เปรียบเทียบความชื้นสัมพัทธ์ของผลการทดลองและผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	57
4.2	อัตราส่วนความชื้นของใบเตยอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อน	58
4.3	อัตราส่วนความชื้นของใบเตยอบแห้งด้วยกำลังของไมโครเวฟ	59
4.4	อัตราส่วนความชื้นของใบเตยอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสองขั้นตอน	60
4.5	อัตราส่วนความชื้นของใบเตยอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับรังสีอินฟราเรดแบบสองขั้นตอน	61
4.6	อัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งใบเตยด้วยลมร้อน	62
4.7	อัตราส่วนความชื้นของใบเตยด้วยกำลังของอินฟราเรด	63
4.8	อัตราส่วนความชื้นของใบเตยอบแห้งด้วยกำลังของอินฟราเรดที่อุณหภูมิใกล้เคียงกัน	64
4.9	อัตราส่วนความชื้นของใบเตยอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด	65
4.10	เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ Two term ของใบเตยอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อน	72
4.11	เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ Logarithmic ของใบเตยอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ	73
4.12	เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ Logarithmic ของใบเตยอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสองขั้นตอน	73
4.13	เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ Logarithmic ของใบเตยอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับรังสีอินฟราเรดแบบสองขั้นตอน	74

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่		หน้า
4.14	เปรียบเทียบอัตราส่วนความถี่ของผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ Logarithmic ของใบเตยอบแห้งด้วยลมร้อน	74
4.15	เปรียบเทียบอัตราส่วนความถี่ของผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ Logarithmic ของใบเตยอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด	75
4.16	อัตราส่วนความถี่จากผลการทดลอง เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ Two term สำหรับใบเตยอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด	76
4.17	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความถี่ของการอบแห้ง	78
4.18	ความถี่เปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะของการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อน	79
4.19	ความถี่เปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟและคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน/ รังสีอินฟราเรดแบบสองขั้นตอน	80
4.20	ความถี่เปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะของการอบแห้งด้วยลมร้อน	81
4.21	ความถี่เปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด	81
4.22	ความถี่เปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะของการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด	82
4.23	แสดงหมู่ฟังก์ชันของสารหอมระเหยในใบเตยที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด	89
4.24	แสดงหมู่ฟังก์ชันของสารหอมระเหยในใบเตยที่อบแห้งด้วยลมร้อน	90
4.25	แสดงหมู่ฟังก์ชันของสารหอมระเหยในใบเตยที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด	91
4.26	แสดงหมู่ฟังก์ชันของสารหอมระเหยในใบเตยที่อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ	92
4.27	แสดงหมู่ฟังก์ชันของสารหอมระเหยในใบเตยที่อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสองขั้นตอน	93
4.29	แสดงหมู่ฟังก์ชันของสารหอมระเหยในใบเตยที่อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับรังสีอินฟราเรดแบบสองขั้นตอน	94

## ภาพประกอบภาคผนวก

ภาพประกอบภาคผนวกที่	หน้า
1 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์	114
2 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย 45.6 °C	115
3 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย 56.3 °C	115
4 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย 65.0°C	116
5 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย 44.5°C	116
6 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย 54.7°C	117
7 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย 64.6°C	117
8 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่กำลัง 500 W อุณหภูมิเฉลี่ย 46.5°C	118
9 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่กำลัง 500 W อุณหภูมิเฉลี่ย 56.2°C	118
10 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่กำลัง 500 W อุณหภูมิเฉลี่ย 65.2°C	119
11 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่กำลัง 1000 W อุณหภูมิเฉลี่ย 45.6°C	119
12 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่กำลัง 1000 W อุณหภูมิเฉลี่ย 53.9°C	120
13 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่กำลัง 1000 W อุณหภูมิเฉลี่ย 62.1°C	120
14 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่กำลัง 1,500 W อุณหภูมิเฉลี่ย 44.2°C	121

## ภาพประกอบภาคผนวก (ต่อ)

ภาพประกอบภาคผนวกที่	หน้า
15 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่กำลัง 1,500 W อุณหภูมิเฉลี่ย 56.4°C	121
16 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่กำลัง 1,500 W อุณหภูมิเฉลี่ย 62.7°C	122
17 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด กำลัง 500 W อุณหภูมิเฉลี่ย 44.7°C	122
18 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด กำลัง 500 W อุณหภูมิเฉลี่ย 53.9°C	123
19 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด กำลัง 500 W อุณหภูมิเฉลี่ย 64.0°C	123
20 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด กำลัง 1,000 W อุณหภูมิเฉลี่ย 44.9°C	124
21 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด กำลัง 1,000 W อุณหภูมิเฉลี่ย 52.7°C	124
22 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด กำลัง 1,000 W อุณหภูมิเฉลี่ย 63.8°C	125
23 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสองชั้นตอน อุณหภูมิเฉลี่ย 45.1°C	125
24 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสองชั้นตอน อุณหภูมิเฉลี่ย 55.7°C	126
25 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสองชั้นตอน อุณหภูมิเฉลี่ย 64.5°C	126
26 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับรังสีอินฟราเรดแบบสองชั้นตอน อุณหภูมิเฉลี่ย 45.2°C	127

## ภาพประกอบภาคผนวก (ต่อ)

ภาพประกอบภาคผนวกที่	หน้า
27 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับรังสีอินฟราเรดแบบสองขั้นตอน อุณหภูมิเฉลี่ย 53.0°C	127
28 Temperature profile ของผลการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับรังสีอินฟราเรดแบบสองขั้นตอน อุณหภูมิเฉลี่ย 65.6°C	128
29 โครงสร้างภาพในของใบเตยที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W	134
30 โครงสร้างภาพในของใบเตยที่ผ่านการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ 472 W	134
31 โครงสร้างภาพในของใบเตยที่ผ่านการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (472 W 3 min) ร่วมกับลมร้อน (64.5°C) แบบสองขั้นตอน	134
32 โครงสร้างภาพในของใบเตยที่ผ่านการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อน อุณหภูมิ 65.0°C	135



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำ

ชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์แต่ละเชื้อชาตินั้น มีรากฐานมานานนับร้อยนับพันปี ชาติที่มีความเจริญทางด้านศิลปวัฒนธรรมและมีอารยธรรม สิ่งหนึ่งที่แสดงออกมาให้เห็นได้เป็นอย่างดีนั้นคือ ประเพณี ศิลปะและวัฒนธรรม ที่ผสมผสานและเกี่ยวพันอยู่ในการใช้ชีวิตประจำวันของคนแต่ละเชื้อชาตินั้นเอง ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะแสดงออกมาจากวิถีชีวิตความเป็นอยู่ในชีวิตประจำวัน รวมไปถึงเรื่องการกินอยู่ด้วย เครื่องดื่มเป็นสิ่งที่สามารถบ่งบอกประเพณี วัฒนธรรมและชาติพันธุ์ได้ ดังตัวอย่างเช่น น้ำดื่มลอยดอกมะลิ หรือน้ำมะตูมของคนไทย น้ำชาของคนจีน หรือชาเขียวของชาวญี่ปุ่น และน้ำชา กาแฟ ไวน์ และเบียร์ของคนในแถบทวีปยุโรป และอเมริกา ส่วนการนำสมุนไพรมาทำเป็นเครื่องดื่มในช่วงแรกอาจเพื่อการรักษาโรค และมีการปรุงแต่งให้รับประทานง่าย ในปัจจุบันมุ่งเน้นเรื่องเครื่องดื่มสมุนไพรเพื่อเสริมสุขภาพ การดื่มเครื่องดื่มที่ได้จากพืชสมุนไพรนั้น ไม่เพียงแต่แก้กระหายเท่านั้น อาจแฝงไว้ด้วยเจตนาบรรเทาให้ผู้ดื่มได้ดื่มด่ำซึมซับทั้งกลิ่น รสชาติ และคุณประโยชน์ไปพร้อม ๆ กัน จากคุณประโยชน์ของพืชสมุนไพรที่มีมากมาย และที่สำคัญบางชนิดมีสี กลิ่น และรสที่เฉพาะตัว ทำให้สามารถนำมาใช้ปรุงเป็นเครื่องดื่มประเภทต่าง ๆ ได้ การนำสมุนไพรมาแปรรูปเป็นเครื่องดื่มที่เรียกว่า ชาสมุนไพร เป็นที่สนใจของนักดื่มและผู้รักสุขภาพทั้งหลาย เช่น ชาชิง ชาใบหม่อน ชาตะไคร้ เป็นต้น

ใบเตยก็เป็นสมุนไพรชนิดหนึ่งที่คนไทยนิยมรับประทานในรูปของชาใบเตย หรือกระทั่งการนำมาปรุงแต่งอาหาร ทำให้ปัจจุบันมีการแปรรูปผลิตภัณฑ์ใบเตยหลายรูปแบบ เช่น น้ำใบเตยกระป๋อง และใบเตยแห้ง เป็นต้น โดยใบเตยนั้นเป็นวัตถุดิบที่มีอายุการเก็บรักษาสั้น การลดความชื้นในวัสดุสดจึงมีความสำคัญเพราะมีผลโดยตรงต่อการคงคุณภาพของสรรพคุณยา การอบแห้งจึงเป็นวิธีหนึ่งในการยืดอายุการเก็บรักษาใบเตยให้นานขึ้น การใช้แสงอาทิตย์ในการอบแห้งหรือการตากแดดเป็นภูมิปัญญาชาวบ้านที่ใช้กันมานาน แต่ยังคงมีปัญหาเกิดขึ้นต่อผลิตภัณฑ์ใบเตยแห้ง เช่น การปนเปื้อนจากฝุ่นละอองบนผลิตภัณฑ์ และระยะเวลาในการตากแห้งที่นานขึ้น เนื่องจากปริมาณแสงแดดในแต่ละวันมีความไม่สม่ำเสมอ จึงได้มีการใช้แหล่งพลังงานความร้อนอื่นมาทดแทนความร้อนจากแสงอาทิตย์ ที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ใบเตย (สมชาติ, 2540)

เทคโนโลยีการอบแห้งได้มีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการเลือกใช้แหล่งพลังงานที่เหมาะสม มาใช้ในกระบวนการอบแห้ง เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ประกอบการ และลดต้นทุนค่าใช้จ่ายสำหรับการกระบวนการผลิต โดยยังคงรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ได้นาน (สมชาติ, 2540)

แหล่งพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งมีหลายแบบ เช่น การใช้ลมร้อนจากเครื่องทำความร้อนซึ่งเป็นการอบแห้งแบบการพาความร้อน (Convection drying) การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง การอบแห้งแบบการแผ่รังสีความร้อน ได้แก่ คลื่นไมโครเวฟ และรังสีอินฟราเรด เป็นต้น และการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วม เช่น ลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดหรือคลื่นไมโครเวฟ เป็นต้น ซึ่งการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมนี้จะส่งผลต่อการใช้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ภายหลังการอบแห้ง

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาปัจจัยของวิธีและสภาวะการอบแห้งไบเตยด้วยพลังงานความร้อนร่วมในรูปแบบต่าง ๆ ต่อจลนพลศาสตร์และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไบเตยภายหลังการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ โดยด้านคุณภาพไบเตยภายหลังการอบแห้ง ได้แก่ คุณภาพทางกายภาพ ทางเคมีและทางประสาทสัมผัส

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาปัจจัยของวิธีและสภาวะการอบแห้งไบเตยด้วยลมร้อน รังสีอินฟราเรด และคลื่นไมโครเวฟต่อจลนพลศาสตร์และคุณภาพของไบเตยภายหลังการอบแห้ง โดยมีปัจจัยหลักคือคุณภาพของผลิตภัณฑ์สูงและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำ

## 1.3 ขอบเขตและวิธีการดำเนินการวิจัย

1) ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งไบเตยด้วยลมร้อน รังสีอินฟราเรด(กำลังของรังสีอินฟราเรด 500 1,000 และ 1,500 W) และคลื่นไมโครเวฟ (472, 584 และ 704 W) อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 45-65 °C ความชื้นสุดท้ายในช่วง 8-12% มาตรฐานแห้ง

2) พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

3) วิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ไบเตย ได้แก่

คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ สี การหดตัว และการคืนตัว

คุณภาพทางเคมี ได้แก่ วิเคราะห์สารหอมระเหย

คุณภาพทางประสาทสัมผัส ได้แก่ สี กลิ่น รสชาติ และความชอบ

โดยรวม

4) หาสหสัมพันธ์ (Correlation) ของปัจจัยที่มีต่อคุณภาพด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติแบบตัวแปรเดียว (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

5) สรุปผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขการทดลอง โดยพิจารณาด้านคุณภาพและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1) ทราบวิธีและสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งใบเตยให้ได้คุณภาพซาใบเตยที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

2) สามารถเปรียบเทียบผลการทดลอง ระหว่างเทคนิคการอบแห้งด้วยลมร้อน รังสีอินฟราเรด คลื่นไมโครเวฟ ลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดและคลื่นไมโครเวฟ และรังสีอินฟราเรดร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งานในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

## บทที่ 2

### การตรวจเอกสาร และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การตรวจเอกสาร

##### 2.1.1 ไบเดย (สมพร, 2523)

###### 2.1.1.1 การจำแนกชั้นทางวิทยาศาสตร์

อาณาจักร (Kingdom) :	Plantae
ดิวิชั่น (Division) :	Tracheophyta
ชั้น (Class) :	Lilipsida
อันดับ (Order) :	Pandanales
วงศ์ (Family) :	Pandanaceae
สกุล (Genus) :	Pandanus
ชนิด (Species) :	<i>P. amaryllifolius</i>
ชื่อวิทยาศาสตร์ :	<i>Pandanus amaryllifolius</i> Roxb.
ชื่อสามัญ :	Pandanus Palm, Fragrant Pandan, Pandom wangi.



ภาพประกอบที่ 2.1 ไบเดย

###### 2.1.1.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

**ต้น** ไม้พุ่มขนาดเล็ก เจริญเติบโตลักษณะเป็นกอ มีลำต้นเป็นเหง้าอยู่ใต้ผิวดิน ลำต้นติดดิน ออกรากตามข้อของลำต้นได้เมื่อลำต้นยาวมากขึ้นใช้เป็นรากค้ำยัน

**ใบ** เป็นใบเดี่ยวเรียงสลับเวียนเป็นเกลียวขึ้นไปจนถึงยอด ลักษณะใบยาวเรียวคล้ายใบหอก ปลายใบแหลม ขอบใบเรียบ ผิวใบเป็นมัน เส้นกลางใบเว้าลึกเป็นแฉ่ง ถ้าดูด้านท้องใบจะเห็นเป็นรูปคล้ายกระดูกงูเรือ

**ดอก** เป็นดอกช่อแบบ สปาดิก (spadix) ดอกย่อยแยกเพศและแยกต้น ไม่มีกลีบเลี้ยงและกลีบดอก

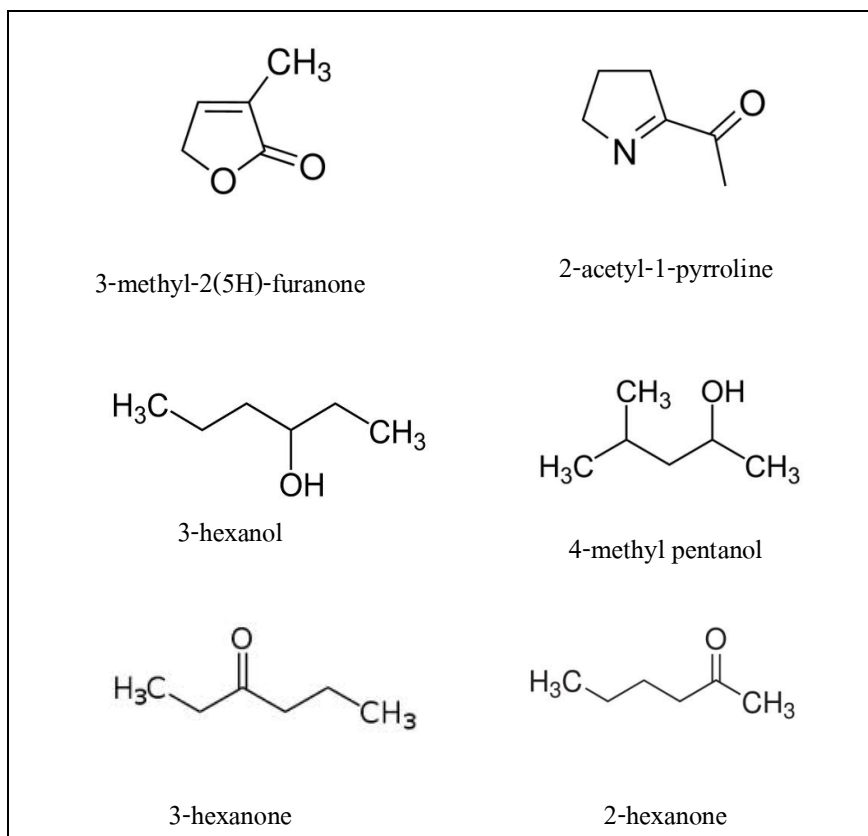
**ฝัก/ผล** ผลขนาดเล็ก ส่วนใหญ่ไม่เกิดดอกและผล เป็นเดยเพศผู้

การปลูก ปลูกตามริมคูน้ำบริเวณที่น้ำขังและ หรือที่ดินชื้น  
 การดูแลรักษา ชอบแสงแดดรำไร แต่ก็ทนต่อแสงแดดจัด  
 การขยายพันธุ์ ปักชำลำต้น หรือกิ่งแขนง  
 ส่วนที่มีกลิ่นหอม ใบ  
 การใช้ประโยชน์ ไม้ประดับ สมุนไพร ใช้เป็นภาชนะห่อและใส่เพื่อปรุงกลิ่น  
 อาหาร คาวหวาน และยังเป็นพันธุ์ที่ชาวสวนปลูกตัดใบออกจำหน่ายเป็นการค้า  
 ถิ่นกำเนิด เอเชียตะวันออกเฉียงใต้  
 สรรพคุณทางยา ใช้ใบเคี้ยวสดเป็นยาบำรุงหัวใจ ให้ชุ่มชื้นช่วยลดอาการกระหายน้ำ  
 ตำพอกโรคริดสีดวง รากใช้เป็นยาขับปัสสาวะ ใช้รักษาเบาหวาน

ตารางที่ 2.1 คุณค่าทางโภชนาการของใบเตยสด ปริมาณ 100 g (แวนดา, 2547)

ส่วนประกอบและคุณค่าทางโภชนาการ	ปริมาณ
พลังงาน	35 kcal
น้ำ	85.3 g
โปรตีน	1.9 g
ไขมัน	0.8 g
คาร์โบไฮเดรต	4.9 g
เส้นใย	5.2 g
เถ้า	1.9 g
แคลเซียม	124 mg
ฟอสฟอรัส	27 g
เหล็ก	0.1 mg
เบต้า-แคโรทีน	2987 mcg
วิตามิน A	498 RE
วิตามิน B1	0.1 mg
วิตามิน B2	1.2 mg
วิตามิน B3	3 mg
วิตามิน C	10 mg

สารประกอบที่ให้กลิ่นในใบเตยมีหลายชนิด โดยกลิ่นของใบเตยจะเปลี่ยนไปเมื่อมีการนำใบเตยมาแปรรูป ซึ่งทำให้องค์ประกอบของสารให้กลิ่นเปลี่ยนแปลง ในใบเตยสดสารระเหยที่พบเป็นปริมาณหลัก โดยคิดเป็นร้อยละ 73 ของสารระเหยที่วิเคราะห์ได้ทั้งหมด คือ 3-methyl-2(5H)-furanone ซึ่งให้กลิ่นในลักษณะฉุน หวาน และคล้ายยา และจะพบสารให้กลิ่นเหม็นเขียวซึ่งเป็นสารประกอบที่มีคาร์บอน 6 อะตอม ได้แก่ 3-hexanol, 4-methyl pentanol, 3-hexanone และ 2-hexanone ทำให้อาหารที่ปรุงจากใบเตยสดแตกต่างไปจากใบเตยแปรรูป ซึ่งโดยมากเป็นการนำไปผ่านความร้อน ใบเตยแปรรูปจะมีกลิ่นของ 2-acetyl-1-pyrroline แรงขึ้น ในพืชโดยมากเป็นกลิ่นของสารประกอบซัลเฟอร์ เช่น methional, thiazole และ 3-methylthiobutanal เป็นต้น สารระเหยเหล่านี้เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์หลังจากที่มีการแปรรูป



ภาพประกอบที่ 2.2 โครงสร้างของสารประกอบสำคัญในใบเตย

ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่วิเคราะห์พบในใบเตยสด (แวนดา, 2547)

สารประกอบ	% of total
2-methyl-3-buten-2-one	0.44
Toluene	0.16
3-hexanone	2.97
2-hexanone	2.65
3-methyl-3-pentanol	0.41
Ethylbenzene	0.11
1,2-dimethylbenzene	0.13
3-penten-2-ol	0.94
3-hexanol	7.09
4-methyl-2-pentanol	6.13
1-methylcyclopentanol	1.00
3-methyl-2-pentanol	0.15
(E)-2-penten-1-ol	0.21
Hexyl formate	0.21
(Z)-4-hexen-1-ol	0.13
Acetic acid	0.44
2,5-hexanedione	0.14
3-methyl-2(5H)-furanone	73.07
Methyl-2-hydroxybenzoate	0.18
Hexanoic acid	0.75
(E)-3-hexanoic acid	0.85
3-hexenoic acid	0.19

2.1.1.3 มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนใบเตยแห้ง (มผช. 735/2548)

คุณลักษณะที่ต้องการ

- 1) ลักษณะทั่วไป ต้องเป็นชิ้นหรือผงแห้ง ไม่จับตัวเป็นก้อน
- 2) สี ต้องมีสีที่สีตามธรรมชาติของใบเตยแห้ง

- 3) กลิ่นรส ต้องมีกลิ่นรสที่ดีตามธรรมชาติของใบเตยแห้ง ปราศจากกลิ่นรสอื่นที่ไม่พึงประสงค์
- 4) การสกัดด้วยน้ำเดือด ของเหลวที่ได้ต้องมีลักษณะที่ดีตามธรรมชาติของใบเตยแห้ง
- 5) สิ่งแปลกปลอม ต้องไม่พบสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่ส่วนประกอบที่ใช้ เช่น เส้นผม ดิน ทราย กรวด ชิ้นส่วนหรือสิ่งปฏิกูลจากสัตว์
- 6) ความชื้น ต้องไม่เกินร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก
- 7) การเจือสี ต้องไม่พบการเจือสีใดๆ
- 8) จุลินทรีย์
  - จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ต้องไม่เกิน  $1 \times 10^4$  โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม
  - รา ต้องน้อยกว่า 10 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

### 2.1.2 เครื่องดื่มประเภทชา

เครื่องดื่มประเภทชาในปัจจุบันนี้ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ประเภทแรก คือ ชาที่ได้จากต้นชาสายพันธุ์ *Camellia Sinensis* ประเภทที่สองคือ ชาจากพืชสมุนไพรมากชนิด ที่นำมาคั่วหรืออบแห้งแล้วนำมาชงในลักษณะของชา ที่มักเรียกกันว่า ชาสมุนไพรร

#### 2.1.2.1 ชา (ชาธรรมชาติ, 2537)

ชา (ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Camellia sinensis* Linn.) เป็นเครื่องดื่มที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากและยังเป็นเครื่องดื่มที่มีประโยชน์มากมาย ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ เมทิลแซนทีน (methylxanthines) แทนนิน (tea tannins) และส่วนที่ให้กลิ่นหอม (aromatic principles) ใบชาประกอบด้วย เซลลูโลส ไฟเบอร์และโปรตีน ซึ่งมีปริมาณของแข็งรวมกันได้ 25% โดยปริมาตรและมีสารที่ละลายน้ำได้ อันได้แก่ แทนนิน คาเฟอีน โปรตีน กัม (gummy matter) และน้ำตาลต่างๆ ละลายอยู่

ชา มีประเภทหลัก ๆ อยู่ 4 ประเภท คือ ชาขาว (white tea), ชาเขียว (green tea), ชาอูหลง (oolong tea), และชาดำ (black tea) สามารถผลิตได้จากต้นชาต้นเดียวกันที่มีชื่อว่า *Camellia sinensis* แต่ผ่านกรรมวิธีแตกต่างกันออกไป

##### 2.1.2.1.1 ชาขาว (White tea)

ชาขาวได้จากการเลือกเก็บยอดชาที่อ่อนมาก คือ ยังมีขนเล็ก ๆ สีขาวปกคลุมบนยอดชา ใบชาจะคงสภาพเหมือนใบชาสดและมีสีขาว นำมาผ่านไอน้ำทันที แล้วทำให้แห้ง



น้ำที่ชงจากชาขาวจะมีสีเหลืองอ่อน มีลักษณะใกล้เคียงกับชาเขียว ในแต่ละปีจะเก็บเกี่ยวยอดชาเพื่อนำมาผลิตชาขาวได้ในบางวันเท่านั้น

#### 2.1.2.1.2 ชาเขียว (Green tea)

ชาเขียวเป็นชาที่ไม่ผ่านกระบวนการหมัก การผลิตชาเขียว ทำโดยนำใบชามาอบไอน้ำเพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ หลังจากนั้นนำไปกลิ้งด้วยลูกกลิ้งและทำให้แห้งอย่างรวดเร็ว ด้วยวิธีการดังกล่าวจึงทำให้ใบชายังคงมีสีเขียว จากกระบวนการผลิตที่ง่ายและน้อยขั้นตอนทำให้ชาเขียวยังคงมีสารในพืชที่มีประโยชน์หลงเหลืออยู่มากกว่าชาชนิดอื่น ๆ ในชาเขียวจะมีสารต้านอนุมูลอิสระ ช่วยป้องกันรอยเหี่ยวย่น สิวฝ้าต่าง ๆ และแห้งกร้าน

#### 2.1.2.1.3 ชาอูหลง (Oolong tea)

การผลิตชาอูหลง ผ่านกระบวนการผลิตด้วยการหมักแต่เพียงครั้งหนึ่ง คือระยะเวลาการหมักนานกว่าชาเขียว จึงทำให้รสชาติและสรรพคุณอยู่ระหว่างชาดำและชาเขียว กระบวนการผลิตชาอูหลง เริ่มจากนำใบชามาทำให้แห้งสับโดยใช้เวลาดั้งเดิม 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำไปกลิ้งด้วยลูกกลิ้ง นึก และหมักด้วยระยะเวลาสั้น ๆ ชาประเภทนี้จะมีสีและกลิ่นมากกว่าชาเขียว รสชาติเข้มข้นและมีกลิ่นหอม เมื่อดื่มจะให้รสฝาดและขมเล็กน้อย ชุ่มคอ แต่สามารถช่วยลดความอ้วนและอาการท้องผูก โดยจะช่วยละลายไขมันและช่วยในการย่อยอาหารและลดประจุในปัสสาวะ

#### 2.1.2.1.4 ชาดำ (Black tea)

การผลิตชาดำ ทำได้โดยการนำใบชามาทำให้แห้ง โดยการรีดน้ำที่หล่อเลี้ยงให้ใบชาชุ่มชื้นออกเพื่อทำให้ใบชาเหี่ยวและอ่อนนุ่ม โดยใช้ระยะเวลาทั้งสิ้น 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำใบชาที่แห้งแล้วนั้นมากลิ้งด้วยลูกกลิ้ง บดและนึก ต่อจากนั้นจึงนำไปหมัก ซึ่งหลังจากกระบวนการหมักเสร็จสิ้นแล้ว จะได้ใบชาที่แห้งสนิท โดยจะให้สีและรสชาติที่เข้มข้นมาก น้ำชาเป็นสีส้มหรือน้ำตาลแดง

#### 2.1.2.2 ชาสมุนไพร (ออร์แกนิก, 2545)

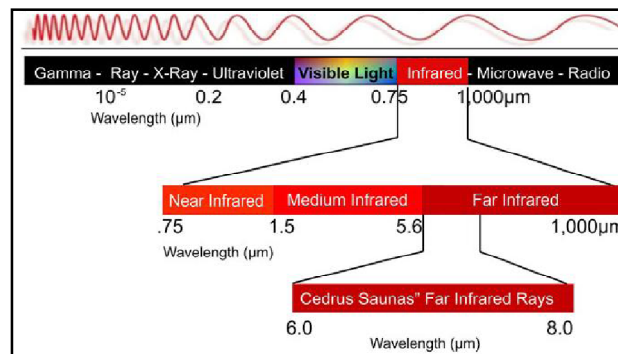
ชาสมุนไพร หมายถึง พืชหรือส่วนของพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเป็นชาสมุนไพร โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้บริโภคด้วยการต้มหรือชงกับน้ำ โดยการชงชาเป็นการสกัดสารสำคัญของสมุนไพรอย่างง่าย ๆ ด้วยความร้อนในช่วงเวลาสั้น ๆ รวมทั้งรักษากลิ่นและรสของสมุนไพรชนิดนั้น ๆ ไว้ด้วย ชาสมุนไพรที่เป็นที่นิยม ได้แก่ ชาดอกคำฝอย ชาตะไคร้ ชาใบเตย ชาดอกเก๊กฮวย ชาขิง เป็นต้น

### 2.1.3 การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (ศรีริมา, 2546)

#### 2.1.3.1 รังสีอินฟราเรด

รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความถี่อยู่ระหว่าง  $10^{11}$ - $10^{14}$  Hz และมีความยาวคลื่นระหว่าง ในช่วง 0.75-1000  $\mu\text{m}$  ความยาวคลื่นในช่วงนี้สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 3 ระดับ คือ

- 1) รังสีอินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น (Near infrared radiation, NIR) มีความยาวคลื่นประมาณ 0.7-1.5  $\mu\text{m}$  มักจะประยุกต์ใช้ในการถ่ายภาพความร้อน
- 2) รังสีอินฟราเรดช่วงคลื่นกลาง (Medium infrared radiation, MIR) มีความยาวคลื่นประมาณ 1.5-5.6  $\mu\text{m}$  มักประยุกต์ใช้กับระบบนำวิถีของจรวด Missile
- 3) รังสีอินฟราเรดช่วงคลื่นยาว (Far infrared radiation, FIR) มีความยาวคลื่นประมาณ 5.6  $\mu\text{m}$  ขึ้นไป ช่วงคลื่นยาวนี้จะมีพลังงานความร้อนไม่มากนัก จึงนิยมใช้ในการบำบัดผู้ป่วย เช่น อาการปวดเมื่อยเรื้อรัง และผู้ป่วยด้วยโรคความดันโลหิตสูง รวมถึงการควบคุมน้ำหนัก เป็นต้น



ภาพประกอบที่ 2.3 แสดงช่วงความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของรังสีอินฟราเรด

#### 2.1.3.2 กลไกการแผ่รังสีอินฟราเรด

แก๊สอินฟราเรดมีคุณสมบัติในการกระจายรังสีพลังงาน ทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน มีความทนทานต่ออุณหภูมิที่สูง เหมาะในการใช้งานติดต่อกันเป็นเวลานาน ถ่ายเทความร้อนได้ดี แผ่ความร้อนได้สม่ำเสมอ แข็งแรง ทนทาน และบำรุงรักษาง่าย ซึ่งวัสดุจะถูกทำให้ร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน คลื่น

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากแท่งอินฟราเรดสามารถเจาะทะลุเข้าถึงเนื้อภายในวัสดุ โดยขนาดความลึกที่เจาะเข้าไปได้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ และความยาวคลื่นที่แผ่ออกไป โดยที่คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เจาะทะลุเข้าไปในวัสดุ จะไปกระตุ้นโมเลกุลน้ำภายในวัสดุทำให้สั่น และเกิดความร้อนขึ้น ทำให้อุณหภูมิภายในวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว นอกจากนี้การให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดยังทำให้อุณหภูมิภายในเนื้อวัสดุกระจายค่อนข้าง

### 2.1.3.3 เครื่องอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

เครื่องอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีหลักการ คือ ใช้แหล่งความร้อนที่เกิดจากรังสีอินฟราเรด โดยลักษณะเฉพาะและปริมาณการแผ่ความร้อนของรังสีอินฟราเรดจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรด และในการแผ่ความร้อนไม่ต้องอาศัยตัวกลาง (เช่น อากาศ) เหมือนการพาความร้อน สมบัติที่สำคัญของรังสีอินฟราเรด คือ ความสามารถในการทะลุทะลวงของรังสีอินฟราเรด พบว่าจะขึ้นกับความยาวคลื่นที่ใช้ ถ้าค่าความยาวคลื่นยิ่งสั้นความสามารถในการทะลุทะลวงวัตถุมากขึ้นตามลำดับ โดยแสงสามารถที่จะทะลุเข้าไปในวัตถุ ทำให้เกิดความร้อนลึกถึงด้านในของวัตถุนั้นทำให้กระบวนการอบแห้งมีประสิทธิภาพสูง ข้อได้เปรียบอีกประการหนึ่งของการใช้แหล่งความร้อนจากรังสีอินฟราเรด คือ ระยะเวลาในการตอบสนอง (response time) ในการให้กำเนิดความร้อน เป็นที่ทราบกันดีว่า ถ้าแหล่งกำเนิดความร้อนมีขนาดใหญ่ขึ้น จะทำให้ใช้ระยะเวลาเพิ่มมากขึ้นในการที่จะทำให้แหล่งความร้อนนั้นมีอุณหภูมิถึงที่กำหนดไว้ แต่แหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดมักนิยมใช้เส้นใยทังสเตน (tungsten filament) ซึ่งมีน้ำหนักเบา จะสามารถแพร่พลังงานถึงถึง 80% ของพลังงานทั้งหมดโดยใช้ระยะเวลาเพียง 1/1,000 ของวินาที หรือถ้าใช้แหล่งกำเนิดความร้อนที่ทำจากหลอดควอทซ์ (quartz tube) ใช้เวลาเพียง 75 วินาที ในการทำให้หลอดมีพลังงาน 80% ของพลังงานทั้งหมด หรือสามารถทำให้อุณหภูมิภายในเตาอบและอุณหภูมิของวัตถุดิบที่ต้องการอบให้มีความร้อนและมีอุณหภูมิได้ตามต้องการ โดยใช้ระยะเวลาเพียงไม่กี่วินาทีเท่านั้น ทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลงซึ่งจะเป็นการประหยัดพลังงานอย่างมาก อีกทั้งยังคงคุณภาพและคุณค่าของสมุนไพรให้คงเดิมมากที่สุดซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากการลดเวลาในการอบแห้ง

### 2.1.4 การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (วิล, 2547)

#### 2.1.4.1 คลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟ (microwave) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ที่มีความถี่อยู่ในช่วง 300 MHz ถึง 300 GHz คลื่นไมโครเวฟยังมีลักษณะเด่น 3 ประการ คือ

1. การสะท้อนกลับ (reflection) คลื่นไมโครเวฟเมื่อไปกระทบกับภาชนะที่เป็นโลหะ หรือมีส่วนผสมของโลหะ คลื่นไมโครเวฟไม่สามารถทะลุผ่านภาชนะดังกล่าวได้ จะสะท้อนกลับหมด ดังนั้นอาหารที่ใส่ในภาชนะที่เป็นโลหะก็จะไม่สุก

2. การส่งผ่าน (transmission) คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านภาชนะที่ทำด้วยแก้ว กระจกใส ไม้ เซรามิกและพลาสติกได้ เพราะภาชนะดังกล่าวไม่มีส่วนผสมของโลหะ จึงเป็นภาชนะที่ใช้ได้ดีในเตาอบไมโครเวฟ

3. การดูดซึม (absorption) ปกติอาหารโดยทั่ว ๆ ไป จะประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำในอาหารซึ่งจะดูดซึมคลื่นไมโครเวฟ ทำให้อาหารร้อนอย่างรวดเร็ว และอีกนัยหนึ่งเมื่อโมเลกุลของน้ำดูดซึมคลื่นไมโครเวฟแล้วจะสลายตัวในทันทีที่ไม่สะสมในอาหาร

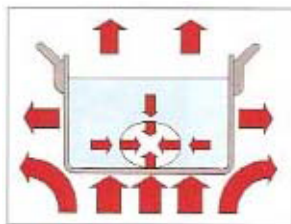
#### 2.1.4.2 หลักการทำงานของเตาไมโครเวฟ

เตาไมโครเวฟมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เรียกว่า แมกนีตรอน (magnetron) ใช้สำหรับผลิตคลื่นไมโครเวฟ คลื่นไมโครเวฟที่ผลิตออกมามีความถี่ 2,450 MHz โดยคลื่นไมโครเวฟนี้จะเข้าสู่อาหารจากทุกทิศทุกทางโดยรอบของผนังเตาด้านในแล้วแผ่กระจายไปสู่อาหาร เมื่อคลื่นความถี่สูงไปกระทบอาหารจะทำให้โมเลกุลของน้ำในอาหารเกิดการสั่นสะเทือนและชนโมเลกุลอื่น ๆ ต่อไปจนเกิดเป็นพลังงานจลน์และพลังงานจลน์นี้เองจะกลายสภาพเป็นพลังงาน ความร้อนจึงทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็ว ลักษณะเช่นเดียวกับการที่เราใช้มือถูกันไปมาเร็ว ๆ จะรู้สึกร้อนขึ้นมาทันที จากคุณสมบัติเด่นของคลื่นไมโครเวฟที่ทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็ว จึงเป็นการรักษาคุณค่าของอาหารไว้อย่างครบถ้วนกว่าวิธีอื่นไม่ว่าจะเป็นการหุง ต้ม อบ นึ่ง ปิ้งย่างทอด และคุณสมบัติพิเศษที่ได้รับมากกว่าการประกอบอาหารด้วยวิธีดั้งเดิมหลายประการ อาทิ ความสะอาดรวดเร็ว ประหยัด ปลอดภัย และไร้เขม่าควันไฟ

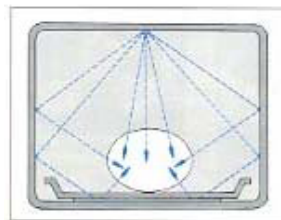


ภาพประกอบที่ 2.4 เตาไมโครเวฟ

การประกอบอาหารด้วยเตาไมโครเวฟนี้แตกต่างจากการประกอบอาหาร ด้วยเตาอบธรรมดา คือ เตาอบธรรมดาให้พลังงานความร้อน โดยเปลวไฟแบบเตา อบแก๊สหรือความร้อนจากขดลวดไฟฟ้าซึ่งจะทำให้อาหารสุกโดยการถ่ายเทความร้อน คือการนำ การพาและการแผ่รังสี แต่เตาไมโครเวฟทำให้อาหารสุกโดยคลื่น ไมโครเวฟ ที่มีความถี่สูง ทำให้โมเลกุลของน้ำในอาหารเกิดการสั่นสะเทือนและ ชนโมเลกุลอื่น ๆ ต่อไปจนเกิดเป็นพลังงานจลน์และพลังงานจลน์นี้เองจะกลายเป็นพลังงานความร้อน จึงทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็วและเร็วกว่าประกอบ อาหารด้วยระบบอื่น ๆ โดยไม่เสียพลังงานความร้อน



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 2.5 การให้ความร้อนแบบธรรมดา (ก) และการให้ความร้อนแบบ ไมโครเวฟ (ข)

### 2.1.5 ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (ชัยวิทย์, 2525)

#### (1) แสงแดดในประเทศไทย

ประเทศไทยตั้งอยู่ระหว่างเส้นรุ้งขนาน 5-22 องศาเหนือ และเส้นแวง 96-106 องศาตะวันออก เป็นบริเวณที่ได้รับแสงแดดพอสมควร การวัดปริมาณแสงแดดโดยตรงในประเทศไทยเริ่มมานานแล้ว โดยการพลังงานแห่งชาติได้จัดตั้งเครื่องบันทึกแสงแดดตามส่วนต่าง ๆ ของประเทศและเครื่องที่ติดตั้งอยู่ที่อาคารฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ก็เป็นจุดหนึ่งในข่ายการวัด และเพิ่งเริ่มเก็บข้อมูลเมื่อมิถุนายน 2522 R.H.B. Exell สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียได้ศึกษาข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา ที่ได้รับจากสถานีตรวจวัดอากาศตามส่วนต่าง ๆ ของประเทศ แล้วคำนวณหาค่าปริมาณรังสีโดยใช้คอมพิวเตอร์พบว่า

- 1) ปริมาณแสงแดดทั้งหมดเฉลี่ยทั่วประเทศ  $16.7 \times 10^6 \text{ J m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  หรือคิดเป็นกำลัง  $\approx 700 \text{ W m}^{-2}$
- 2) แม้ยังไม่มีการวัดปริมาณรังสีโดยตรงและรังสีกระจายโดยตรง แต่จากการคำนวณพบว่า รังสีกระจายเฉลี่ยต่อวันมีค่าสูงสุดในฤดูร้อนและต่ำที่สุดในฤดูหนาวทั่วประเทศ ยกเว้นในเขตภาคใต้ ซึ่งมีค่าคงที่ตลอดปี เหตุผลสำคัญในการผันแปรของรังสีกระจายต่อวันคือ การเปลี่ยนระดับของดวงอาทิตย์ การ

เปลี่ยนแปลงภูมิอากาศไม่มีผลมากนักต่อค่าเฉลี่ยนี้ ที่น่าสังเกต คือ โดยเฉลี่ยรังสีกระจายจะมีค่าครึ่งหนึ่งของรังสีแสงแดดทั้งหมด

## (2) การวัดความเข้มและพลังงานแสงแดด

มักจะวัดรังสีแสงแดดทั้งหมดที่ตกกระทบผิวพื้นราบโดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าไพราโนมิเตอร์ (pyranometer) หน่วยพลังงานต่อพื้นที่ต่อเวลา ส่วนการวัดรังสีตรงใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าไพเฮลิโอมิเตอร์ (pyrheliometer) ไพราโนมิเตอร์อาศัยหลักการที่แสงทำให้อุณหภูมิระหว่างผิวค้ำกับผิวขาวต่างกัน และเทอร์โมไพล์ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าปริมาณราวมิลลิโวลต์ซึ่งสามารถปรับมาตรฐานเป็นวัตต์ต่อตารางเมตรได้

### 2.1.6 การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง (ศรีมา, 2546)

พลังงาน (energy) หมายถึง ความสามารถในการทำงานหรืออำนาจที่แฝงอยู่ในวัตถุซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปได้ หรือสามารถกล่าวได้ว่าวัตถุใดที่มีพลังงาน วัตถุนั้นจะสามารถทำงานได้ พลังงานของวัตถุต่าง ๆ อาจสะสมอยู่ในหลายรูปแบบ เช่น พลังงานกล พลังงานศักย์ พลังงานจลน์ ความร้อน แสง ไฟฟ้า เสียง เป็นต้น พลังงานไฟฟ้า จะเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำใด ๆ หมายความว่า ขณะนั้นมีประจุไฟฟ้าจำนวนหนึ่งเคลื่อนที่ผ่านตัวนำนั้น ๆ ไปเป็นกระแสต่อเนื่อง การที่ประจุไฟฟ้าจะเคลื่อนที่เป็นกระแสต่อเนื่องไปได้นั้นจะต้องมีพลังงานจากแหล่งอื่น เช่น แบตเตอรี่ ไดนาโม เป็นต้น มาทำให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ไป พลังงานที่เกิดขึ้นจากแหล่งอื่นนั้น อาจจะเป็นพลังงานเคมี พลังงานกล พลังงานความร้อน หรือพลังงานแสง ซึ่งแล้วแต่ว่าแหล่งกำเนิดพลังงานนั้นเป็นอะไร พลังงานเหล่านี้จะแปรเปลี่ยนสภาพไปเป็นพลังงานไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าที่สิ้นเปลืองในการเคลื่อนประจุหนึ่งหน่วยประจุจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งคือความต่างศักย์ทางไฟฟ้าระหว่างจุดทั้งสองนั่นเอง ดังนั้นความต่างศักย์ทางไฟฟ้าจึงหมายถึงค่าของพลังงานไฟฟ้าที่สิ้นเปลืองในการเคลื่อนหนึ่งหน่วยประจุ ระหว่างจุดคู่ใด ๆ เช่น ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดคู่หนึ่งเท่ากับ V โวลต์ (จูล/คูลอมบ์) หมายความว่า ในการเคลื่อนประจุ 1 คูลอมบ์ ระหว่างจุดคู่นั้นต้องใช้พลังงานไฟฟ้า V จูล ถ้ามีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ระหว่างจุดนั้นทั้งหมด Q คูลอมบ์ ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ต้องสิ้นเปลือง คือ QV จูล เราทราบว่า กระแสไฟฟ้าเกิดเพราะอิเล็กตรอนเป็นตัวพาประจุเคลื่อนที่ไปซึ่งในการเคลื่อนที่นี้ต้องมีการเสียพลังงานไป พลังงานที่เสียไปนั้นอาจจะเสียไปในรูปของพลังงานความร้อนพลังงานแสงหรือพลังงานกล

วิธีคำนวณพลังงานคำนวณให้อยู่ในหน่วยของเมกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย

$$\text{Specific Energy Consumption, SEC} = \frac{3.6 E_p}{(M_{in} - M_f) \times W_w} \quad (2.1)$$

- เมื่อ  $E_p$  คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้, kW-h  
 $M_{in}$  คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ, decimal  
 $M_f$  คือ ความชื้นสุดท้ายของวัสดุ, decimal  
 $W_w$  คือ น้ำหนักแห้ง, kg

### 2.1.7 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารแห้งสามารถแบ่งออกได้เป็น 11 ปัจจัยดังนี้ คือ (Raksakulthai, 1997)

- (1) ส่วนประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ที่นำมาจากวัตถุดิบที่มีไขมันมีอายุการเก็บรักษาสั้นกว่า
- (2) คุณภาพทางวัตถุดิบ ต้องการคุณภาพของวัตถุดิบที่ดีในการผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีคุณภาพดี
- (3) ปริมาณความชื้นและวอเตอร์แอกทีวิตี ( $A_w$ ) ความชื้นและ  $A_w$  เป็นดัชนีชี้บ่งอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณความชื้นและ  $A_w$  ต่ำ จะมีอายุการเก็บรักษายาวนานขึ้น
- (4) ปริมาณเกลือ ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณเกลือสูงสามารถเก็บรักษาได้ยาวนานกว่า
- (5) การปนเปื้อนของจุลินทรีย์ ผลิตภัณฑ์ที่มีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์สูง จะมีอายุการเก็บรักษาที่สั้นกว่า
- (6) เทคนิคที่ใช้ในกระบวนการ pretreatment วัตถุดิบ เช่น การลวก การต้ม หรือหนึ่ง จะทำให้การปนเปื้อนของจุลินทรีย์ต่ำลง กระบวนการอบแห้งที่ใช้เครื่องอบแห้งแทนการตากแดด สามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ได้
- (7) เวลาและอุณหภูมิในการอบแห้ง เวลาและอุณหภูมิในการอบแห้งที่เหมาะสมเป็นสิ่งที่ต้องการ
- (8) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในผลิตภัณฑ์ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วที่ปริมาณความชื้นต่ำ
- (9) การรบกวนของแมลง ผลิตภัณฑ์แห้งสามารถถูกรบกวนโดยแมลง เช่น มด แมลงชนิดปีกแข็ง เป็นต้น ถ้าผลิตภัณฑ์เหล่านี้ถูกเก็บรักษาในที่ที่ไม่เหมาะสม
- (10) วัสดุที่ใช้บรรจุ การบรรจุที่เหมาะสมสามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้
- (11) อุณหภูมิที่เก็บรักษา การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำทำให้สามารถเก็บรักษาได้ยาวนานขึ้น

### 2.1.8 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ (water Activity : $A_w$ ) (ธีรยุทธ, 2547)

ในอาหารจะประกอบด้วยน้ำอยู่ 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งเป็นน้ำที่อาหารยึดไว้ เรียกว่า bound moisture content จุลินทรีย์จะนำน้ำส่วนนี้ไปใช้ประโยชน์ได้ค่อนข้างยาก อีกส่วนหนึ่งคือน้ำอิสระที่อยู่รอบ ๆ องค์กรประกอบของสารอาหารเรียกน้ำส่วนนี้ว่า น้ำที่เป็นประโยชน์ (available water) หรือวอเตอร์แอกติวิตี้ จุลินทรีย์สามารถนำน้ำส่วนนี้ไปใช้ประโยชน์เพื่อการเจริญเติบโตได้ ซึ่งค่าวอเตอร์แอกติวิตี้สามารถคำนวณได้ ดังนี้

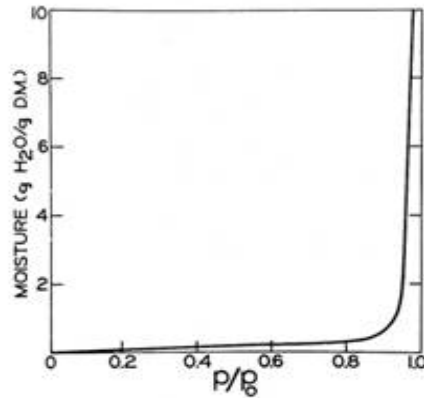
$$A_w = \frac{p}{p_0} = \frac{E.R.H}{100} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $A_w$  คือ water activity, decimal  
 $p$  คือ ความดันไอของน้ำของเหลวในอาหารที่ต้องการทราบ  
 $p_0$  คือ ความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน  
 $E.R.H$  คือ ความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดสมดุล (equilibrium relative humidity)

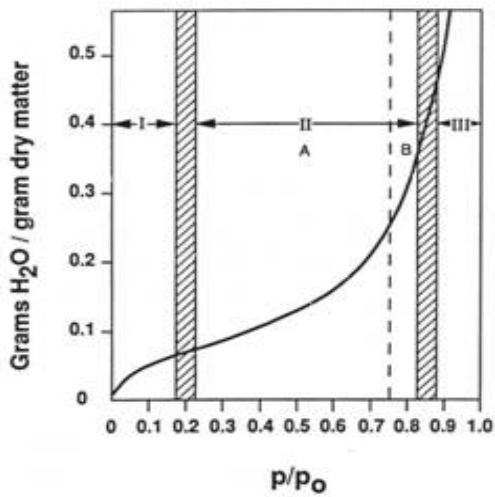
การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ออกมาเป็นกราฟเรียกว่า กราฟไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้น (moisture sorption isotherm) ถ้าอาหารมีความชื้นน้อยจะดูดความชื้นจากอากาศเรียก adsorption isotherm ถ้าอาหารมีความชื้นมากจะสูญเสียความชื้นแก่อากาศเรียก desorption isotherm น้ำที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้สูงสุด ได้แก่ น้ำบริสุทธิ์ และเมื่อมีชีวะสารปนอยู่ในน้ำจะทำให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ในอาหารลดลง ภาพประกอบที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ในอาหาร และปริมาณความชื้นในอาหารจำพวกอาหารสดทั่วไป และภาพประกอบที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ในอาหารและปริมาณความชื้นในอาหารเมื่อมีความชื้นต่ำ ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงน้ำในบริเวณ I ของกราฟจะเป็นส่วนที่ถูกเกาะเกี่ยวไว้อย่างแน่นหนาที่มีการเคลื่อนไหวน้อยที่สุด ไม่สามารถเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งได้ที่  $-40^{\circ}\text{C}$  เป็นน้ำในโมโนเลเยอร์ ส่วนน้ำในบริเวณ II ของกราฟส่วนใหญ่ไม่สามารถเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งได้ที่  $-40^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่อรวมกับของแข็งแล้ว ทำให้เกิดลักษณะพลาสติกเป็นน้ำในมัลติเลเยอร์และน้ำในแคพพิลลารี น้ำจากทั้ง 2 บริเวณนี้มีน้อยกว่าร้อยละ 5 ของอาหารสดที่มีความชื้นสูงทั่วไป น้ำในบริเวณที่ III สามารถเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งได้ ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายได้และทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ ดังนั้นค่าวอเตอร์แอกติวิตี้จึงเป็นปัจจัยที่ระดับปริมาณน้ำต่ำสุดที่มีอยู่เพื่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังมีผลกระทบต่อการทำงานของ



เอ็นไซม์และวิตามินในอาหาร ซึ่งเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงสี รส และกลิ่นของอาหารได้อย่างชัดเจน



ภาพประกอบที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในอาหารและค่าแอกติวิตีของน้ำในอาหารทั่วไป



ภาพประกอบที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอกติวิตีของน้ำในอาหารและปริมาณความชื้นในอาหารที่มีความชื้นต่ำ

## 2.1.9 สี

สีแสดงถึงคุณภาพของอาหารและผลิตผลทางการเกษตร ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพการยอมรับของผู้บริโภค หากมีสีที่ผิดปกติผู้บริโภคส่วนใหญ่อาจไม่ยอมรับและอาจไม่คำนึงต่อคุณภาพด้านอื่นต่อไป เช่น กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัส เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้งเกิดขึ้นได้จากการระเหยของน้ำออกจากผิววัสดุระหว่างการอบแห้ง รวมถึงการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ เช่น Enzymatic browning non-enzymatic browning และ Caramelization reactions โดยปกติแล้วการเปลี่ยนแปลงของสีระหว่างการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของกระบวนการอบแห้งด้วย เช่น ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ออบแห้ง หรือการใช้สารป้องกันการเปลี่ยนสี (color protective agent) หรือการอบแห้งเป็นช่วง ๆ (intermittent drying) ดังนั้นจึงต้องมีระบบที่ใช้ในการวัดสี เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ (ภักขนิย, 2550)

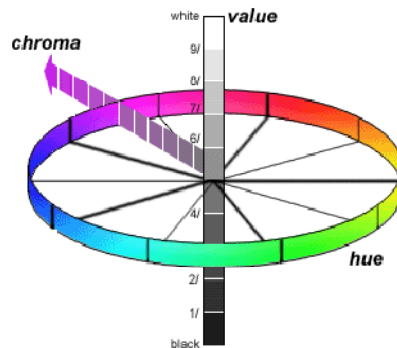
### 2.1.9.1 การวิเคราะห์สีระบบ CIE L\* a\* b\* (CIE LAB) (ช่อผกา, 2553)

ในธรรมชาติแสงเป็นพลังงานที่มีสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีความยาวคลื่นที่ตามองเห็นอยู่ในช่วง 380-780 nm โดยระบบสีที่นิยมใช้ ได้แก่ CIE system หรือ Tristimulus system ระบบนี้เป็นระบบที่ Commission International de l' Eclairage (CIE) ได้พัฒนาระบบของการวัดสีในรูปของ Objective ที่ไม่ต้องอาศัยประสบการณ์ หรือความคิดของมนุษย์ในการวัดสี การวัดสีระบบนี้มีข้อดี คือ เป็นระบบที่ไม่ขึ้นกับการมองเห็นของแต่ละบุคคล เป็นระบบที่วัดสีออกมาเป็นตัวเลข เป็นระบบที่สามารถนำไปคำนวณ และทำนายสูตรสีผสมได้ด้วย ดังนั้นการมองเห็นสีของวัตถุ ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสง วัตถุที่มีสี และสายตามนุษย์ ถ้าเราสามารถวัดออกมาเป็นตัวเลขได้ก็สามารถวัดค่าสีออกมาเป็นตัวเลขได้ โดยทั่วไปมนุษย์จะระบุลักษณะสีของวัตถุที่มองเห็นเป็น 3 ลักษณะคือ Hue, Value และ Chroma

- Hue หมายถึง สีที่ปรากฏให้เห็น (เฉดสี) เป็นชื่อของสีหลักที่แตกต่างกัน ในระบบ munsell จะแบ่งออกเป็น 5 สี คือ แดง เหลืองเขียว น้ำเงิน ม่วง

- Value (lightness) หมายถึง ความสว่างของสี หรือปริมาณแสงที่สะท้อนออกมาจากวัตถุหากมีปริมาณแสงที่สะท้อนออกมามากจะทำให้เห็นสีสว่าง ถ้าปริมาณแสงสะท้อนน้อยจะทำให้เห็นสีเข้ม หรือมืด มีค่าตั้งแต่ 0 = black (หมายถึงวัตถุดำสมบูรณ์) ถึง 10 = white (หมายถึงวัตถุขาวสมบูรณ์)

- Chroma (saturation) หมายถึง ค่าที่แสดงความบริสุทธิ์ (purity) ของสี สีที่บริสุทธิ์มากที่สุด คือสีที่ไม่มีแสงสีเทาผสมเลย ซึ่งได้แก่สีหลัก (hue) ทั้ง 100 สี แบ่งสเกล เป็น 0 ถึง 18 เป็นการวัดความแตกต่างของสีหลักจากสีเทาที่ lightness เดียวกัน



ภาพประกอบที่ 2.8 แผนภาพสีแสดง Hue Value และ Chroma

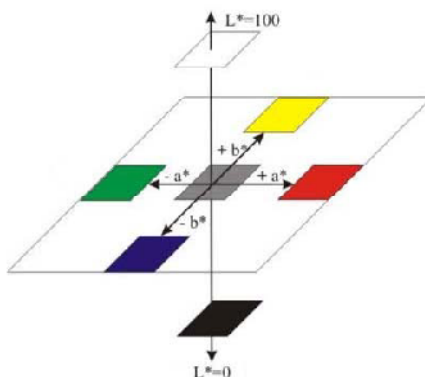
ระบบสี CIE  $L^* a^* b^*$  เป็นระบบสีที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

- $L^*$  ใช้กำหนดค่าความสว่าง  
 $L = 0 =$  perfect black sample  
 $L = 100 =$  perfect white sample
- $a^*$  ใช้กำหนดสีแดง หรือสีเขียว  
 $a$  เป็น + วัตถุมีสีออกแดง  
 $a$  เป็น - วัตถุมีสีออกเขียว
- $b^*$  ใช้กำหนดสีเหลือง หรือสีน้ำเงิน  
 $b$  เป็น + วัตถุมีสีออกเหลือง  
 $b$  เป็น - วัตถุมีสีออกน้ำเงิน

และในการหาค่าความแตกต่างของสีที่เป็นตัวเลขนั้น เมื่อพิจารณาจากรูป จะพบว่าจุด ๆ หนึ่ง ใน space นั้นเป็น  $L^*, a^*, b^*$  และเมื่อสีมีการเปลี่ยนเฉดสีไปจะได้อีกจุดใน space เป็น  $L_2^*, a_2^*, b_2^*$  ซึ่ง 2 จุดนี้จะมีระยะห่างกันใน Space เท่าไร ก็จะเป็นตัวบ่งบอกถึงความแตกต่างของสีดังกล่าว (2.3)

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\Delta E$  คือ ค่าความแตกต่างของสี



ภาพประกอบที่ 2.9 CIE Lab แสดง  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  color space

นอกจากนี้ในระบบ CIE LAB ยังมีการปรับปรุง โดยการเชื่อมค่า “a” และ “b” เข้ากับ “Hue” และ “Chroma” โดยกำหนด color term อีก 2 ตัว คือ Hue ( $h^\circ$ ) และ Chroma ( $C^*$ ) ค่า Hue angle เป็นตัวเลขที่ระบุว่าสีมีตำแหน่งอยู่ที่ใดในกราฟ มีหน่วยเป็นองศา ดังสมการที่ (2.4) และ (2.5)

$$h^\circ = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (2.4)$$

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (2.5)$$

ค่า Hue angle เป็นค่ามุมที่ทำกับแกน  $+a^*$  โดยค่า  $0^\circ$  เท่ากับ  $+a^*$  (red), ค่า  $90^\circ$  เท่ากับ  $+b^*$  (yellow), ค่า  $180^\circ$  เท่ากับ  $-a^*$  (green) และค่า  $270^\circ$  เท่ากับ  $-b^*$  (blue) สำหรับ chroma เริ่มจาก 0 ซึ่งเป็นค่าที่ศูนย์กลางและเพิ่มมากขึ้นตามระยะที่ห่างจากศูนย์กลางมากขึ้น  $C^*$  จะใช้บอกค่าความสดไสของสีที่ค่าความสว่างหนึ่ง ๆ

โดยที่ ค่า Chroma - มีค่าเข้าใกล้ 0 หมายถึง วัตถุมีสีซีดจาง (เทา)

- มีค่าเข้าใกล้ 60 หมายถึง วัตถุมีสีเข้ม

ค่า Hue angle แสดงช่วงสีของวัตถุมีค่าอยู่ระหว่าง  $0^\circ$  -  $360^\circ$  คือ

$0^\circ$  -  $45^\circ$  แสดงสีม่วงแดงถึงสีส้มแดง

$45^\circ$  -  $90^\circ$  แสดงสีส้มแดงถึงสีเหลือง

$90^\circ$  -  $135^\circ$  แสดงสีเหลืองถึงเหลืองเขียว

$135^\circ$  -  $180^\circ$  แสดงสีเหลืองเขียวถึงเขียว

- 180°- 225° แสดงสีเขียวถึงสีน้ำเงิน  
 225° - 270° แสดงสีน้ำเงินเขียวถึงน้ำเงิน  
 270° - 315° แสดงสีน้ำเงินถึงม่วง  
 315° - 360° แสดงสีม่วงถึงม่วงแดง

#### 2.1.10 การหดตัว (จารูวรรณ, 2550)

การอบแห้งมีผลต่อคุณภาพอาหาร ทั้งนี้เนื่องจากอาหารมีการสูญเสีย น้ำ การเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดเจนระหว่างการอบแห้ง ได้แก่ การหดตัวของอาหารซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในอาหารทั้งที่มีโครงสร้างแบบเซลล์และไม่ใช่ การหดตัวของอาหารมักจะเป็นแบบไม่สม่ำเสมอเนื่องจากชั้นผลิตภัณฑ์มีความแปรเปลี่ยนของสภาพยืดหยุ่นหรือการสูญเสียโครงสร้างในชั้นผลิตภัณฑ์เองไม่สม่ำเสมอ ผลิตภัณฑ์อาหารต่างชนิดมักจะมีรูปแบบการหดตัวที่แตกต่างกัน อัตราการอบแห้งมีผลต่อการหดตัว และส่งผลให้ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งแตกต่างกันด้วย เช่น ถ้าอบอย่างช้าๆจากบริเวณผิวของชิ้นอาหาร ไปสู่ใจกลาง ความหนาแน่นของเนื้อผลิตภัณฑ์จะค่อนข้างสูง แต่ถ้าการอบแห้งอย่างรวดเร็วด้วยอุณหภูมิค่อนข้างสูง ผิวภายนอกของผลิตภัณฑ์จะแข็งอย่างรวดเร็ว เมื่อโซนการอบแห้งเคลื่อนย้ายเข้าสู่บริเวณใจกลางของชิ้นอาหาร การหดตัวของเนื้ออาหารภายในจะก่อให้เกิดการแตกแยกจากผิวที่แข็งเกิดเป็นรอยปริเล็กๆ ไปทั่วผิววัสดุ ในกรณีหลังนี้ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งจะต่ำกว่า ความแตกต่างในสองกรณีนี้อาจมีมากเป็นเท่าตัวได้ การหดตัวโดยทั่วไปจะวัดได้ โดยการหาอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของตัวอย่างที่ได้หลังจากการอบแห้งและก่อนการอบแห้ง ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัว ได้แก่ ปริมาณการระเหยของน้ำ โดยวัสดุจะมีการหดตัวเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำระเหยออกไปมาก อัตราการอบแห้ง เป็นต้น

#### 2.1.11 การคืนตัว (ศิริทรัพย์, 2544)

ปัจจัยคุณภาพของอาหารแห้งที่สำคัญ ได้แก่ ลักษณะเนื้อสัมผัสและความสามารถในการคืนตัว ลักษณะเนื้อสัมผัสที่เหนียว ลักษณะเป็นเส้นใย การคืนตัวอย่างช้าๆ หรือไม่สมบูรณ์เหล่านี้ถือเป็นคำหนทางคุณภาพของอาหารอบแห้ง เช่น กรณีการสูญเสียความนุ่มของเนื้ออบแห้งอาจเนื่องมาจากการจับตัวของโปรตีนในกล้ามเนื้อ

ได้มีการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ถ้าเก็บเนื้อเยื่อพืชหรือสัตว์ไว้ที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงแบบไม่คืนตัวจะเกิดขึ้นเสมอ แม้ว่าอุณหภูมินั้นจะไม่สูงพอที่จะทำให้อาหารเกิดสีน้ำตาลหรือไหม้ก็ตาม ความยืดหยุ่นของผนังเซลล์และความสามารถในการพองตัวของแป้งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการคืนตัว แต่ปัจจัยทั้งสองจะลดลงเมื่ออาหารถูกกับความร้อน เช่น เนื้อ

อบแห้งสามารถดูดซับน้ำได้เพียงส่วนหนึ่งของน้ำเริ่มต้นเท่านั้น และถึงแม้ว่าจะสามารถดูดซับน้ำได้จนมีน้ำหนักเท่าเดิม ก็ไม่ใช่หมายความว่าเนื้อนั้นจะมีโครงสร้างเหมือนเดิม ผลิตภัณฑ์หลังคั้นตัวจะไม่มีลักษณะฉ่ำ และมีลักษณะเนื้อร่วนกว่าเนื้อสด

#### 2.1.12 การสูญเสียสารระเหย (ศิริทรัพย์, 2544)

เมื่อน้ำกลายเป็นไอระเหยไปจากอาหารจะพาสารที่ระเหยได้ไปด้วยในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน โดยทั่วไปปรากฏการณ์นี้เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ จึงได้มีการใช้สารบางชนิด เช่น ผงถ่าน หรือตัวดูดกลิ่นอื่น ๆ ที่สามารถจับสารระเหยนี้ไว้ด้วยจุดประสงค์ที่จะจะนำกลิ่นนี้กลับมายังอาหารอีก องค์ประกอบของไอขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอาหาร และความดันไอบางส่วนของสารระเหย แต่ว่าองค์ประกอบของไอดังกล่าวจะถูกกระทบกระเทือนจากความสามารถละลายในน้ำและในของเหลวอื่น ๆ

#### 2.1.13 สารสกัดจากสมุนไพร (อรัญญา และคณะ, 2548)

สารสกัดจากสมุนไพร หรือน้ำมันหอมระเหย เป็นสารอินทรีย์ที่พืชผลิตขึ้นตามธรรมชาติ เก็บไว้ตามส่วนต่าง ๆ เช่น กลีบดอก ผิวของผล เกสร ราก หรือเปลือกของลำต้น มีลักษณะเป็นของเหลวที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่สลับซับซ้อนและแตกต่างกัน มีกลิ่นหอมระเหยง่าย เมื่อได้รับความร้อนอนุภาคเล็ก ๆ ของน้ำมันหอมระเหยจะระเหยออกมาเป็นไอ ทำให้เราได้กลิ่นหอม น้ำมันหอมระเหยมีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อโรค บรรเทาอาการอักเสบ หรือลดบวม คลายเครียด หรือกระตุ้นให้สดชื่น ทั้งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยแต่ละชนิด น้ำมันหอมระเหยมีผลต่อร่างกายต่าง ๆ มากมาย แตกต่างกันไป

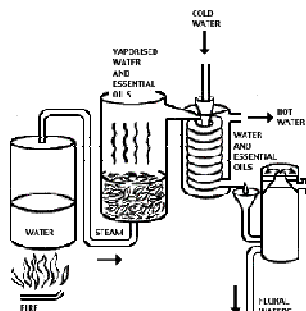
#### 2.1.14 การสกัดสารหอมระเหยจากสมุนไพร (ช่อผกา, 2553)

การสกัดสารหอมออกจากพืชหอม ได้มีการทำมาเป็นเวลานานแล้ว ต่อมาได้มีการพัฒนาวิธีการสกัดสารหอม เพื่อให้ได้กลิ่นหอม หรือน้ำมันหอมระเหยที่มีคุณภาพ และปริมาณสูงสุด วิธีการดังกล่าวนี้มีหลายวิธี การที่จะเลือกใช้วิธีใดนั้น ต้องพิจารณาลักษณะของพืชที่จะนำมาสกัดด้วย วิธีการสกัดน้ำมันหอมระเหย สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

##### 2.1.14.1 การกลั่นด้วยไอน้ำ

การกลั่นด้วยไอน้ำ เป็นการแยกสารที่ระเหยง่ายออกจากสารที่ระเหยยาก โดยมีหลักการ คือ น้ำสารไปต้ม หรือผ่านไอน้ำเข้าไปยังสารที่ต้องการสกัด เมื่อสารที่ต้องการสกัดได้รับความร้อน จะได้สารหอมระเหยออกมาพร้อมกับไอน้ำ ความดันไอบางส่วนของสารรวมกับความดันไอบางส่วนของน้ำ

น้ำ เท่ากับความดันบรรยากาศของของเหลวทั้งสอง จะกลั่นตัวออกมาพร้อมกันที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของสาร ของเหลวจะควบแน่น และเกิดการแยกชั้นเป็น 2 ชั้น โดยน้ำมีความหนาแน่นมากกว่า จะอยู่ชั้นล่าง ส่วนสารที่ต้องการสกัดจะอยู่ชั้นบน



ภาพประกอบที่ 2.10 การกลั่นด้วยไอน้ำ

สมบัติของสารที่แยก โดยการกลั่นด้วยไอน้ำ

1. ต้องไม่ละลายน้ำ จึงจะสามารถแยกออกจากน้ำได้ง่าย โดยใช้กรวยแยก
2. มีสมบัติระเหยง่าย มีจุดเดือดหรือต่ำกว่าน้ำก็ได้ ถ้าสารมีจุดเดือดต่ำ จะแยกได้

ดีกว่าสารที่มีจุดเดือดสูง

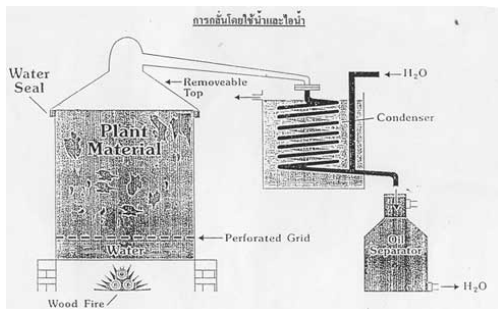
ประโยชน์การกลั่นด้วยไอน้ำ

1. สกัดแยกน้ำมันหอมระเหยออกจากส่วนต่างๆ ของพืช
2. สกัดแยกน้ำมันพืชจากเมล็ดพืช

วิธีนี้มีข้อดี คือ เวลาที่ใช้ในการกลั่นจะสั้นกว่า ปริมาณน้ำมันมีคุณภาพ และปริมาณดีกว่า แต่ไม่เหมาะกับพืชที่มีลักษณะบาง เช่น กลีบกุหลาบ เพราะไอน้ำจะทำให้กลีบกุหลาบรวมตัวกันเป็นก้อน น้ำมันหอมระเหยที่อยู่ในกลีบกุหลาบไม่สามารถออกมา พร้อมไอน้ำได้ทั้งหมด ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยน้อยลง หรือไม่ได้เลย การกลั่นน้ำมันกุหลาบจึงควรใช้วิธีการกลั่นด้วยน้ำจะเหมาะสมกว่า

#### 2.1.14.2 การกลั่นด้วยน้ำ และไอน้ำ

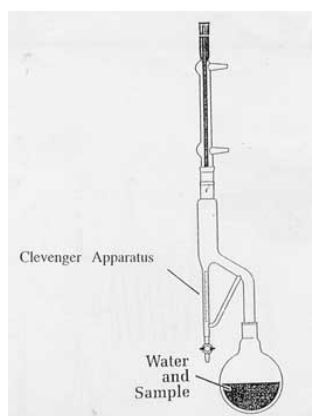
วิธีนี้มีหลักการคล้ายกับการกลั่นโดยใช้ไอน้ำ แต่แตกต่างกันตรงที่ ภายในหม้อกลั่นจะมีตะแกรงสำหรับวางพืชไว้เหนือระดับน้ำ เมื่อให้ความร้อน โดยเปลวไฟ หรือไอน้ำจากเครื่องกำเนิดไอน้ำ (boiler), น้ำภายในหม้อกลั่น จะเดือดกลายเป็นไอ การกลั่นโดยวิธีนี้ พืชที่ใช้กลั่นจะไม่สัมผัสกับความร้อนโดยตรง ทำให้คุณภาพของน้ำมันหอมระเหยดีกว่าวิธีแรก



ภาพประกอบที่ 2.11 การกลั่นด้วยน้ำและไอน้ำ

### 2.1.14.3 การกลั่นด้วยน้ำ

วิธีนี้สามารถทำได้โดยใช้อุปกรณ์สำหรับการกลั่น เช่น หม้อกลั่น เครื่องควบแน่น และภาชนะรองรับน้ำมัน วิธีการก็คือ บรรจุพืชที่ต้องการสกัดน้ำมันหอมระเหยลงในหม้อกลั่น เติมน้ำพอท่วม แล้วต้มจนน้ำเดือด เมื่อน้ำเดือดระเหยเป็นไอ ไอน้ำจะช่วยพาน้ำมันหอมระเหยที่อยู่ในเนื้อเยื่อของพืชออกมาพร้อมกัน เมื่อผ่านเครื่องควบแน่น ไอน้ำและไอของน้ำมันหอมระเหยจะควบแน่นเป็นของเหลว ได้น้ำมันหอมระเหยและน้ำแยกชั้นจากกัน สำหรับการกลั่นพืชปริมาณน้อยๆ ในห้องปฏิบัติการ เราสามารถทำได้โดยใช้ชุดกลั่นที่ทำจากเครื่องแก้ว เรียกว่า ชุดกลั่นชนิด Clevenger ดังภาพประกอบที่ 2.12



ภาพประกอบที่ 2.12 ชุดกลั่นชนิด Clevenger

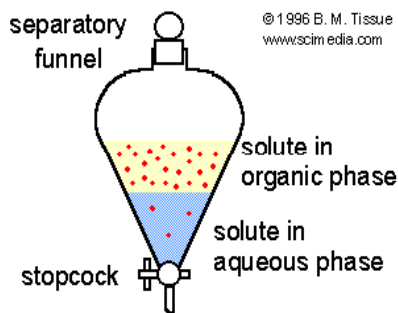
ส่วนการกลั่นพืชปริมาณมาก ควรใช้เครื่องกลั่นที่มีขนาดใหญ่ขึ้น อาจทำด้วยเหล็ก สเตนเลส หรือทองแดง โดยอาศัยหลักการเดียวกัน



การกลั่นโดยใช้ไอน้ำ มีข้อดี คือ เป็นวิธีที่ง่าย อุปกรณ์ในการกลั่น ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และค่าใช้จ่ายต่ำ แต่ก็มีข้อเสีย คือ ในกรณีที่ต้องกลั่นพืชปริมาณมาก ๆ ความร้อนที่ให้ผู้หมักกลั่น จะไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งหมักกลั่น พืชที่อยู่ด้านล่างใกล้กับเตา อาจเกิดการไหม้ได้ ทำให้น้ำมันหอมระเหยที่กลั่นได้ มีกลิ่นเหม็นไหม้ติดปนมา อีกทั้งการกลั่นโดยวิธีนี้ พืชจะต้องสัมผัสกับน้ำเดือด โดยตรงเป็นเวลานาน ทำให้องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหย เกิดการเปลี่ยนแปลงไปบ้าง บางส่วน

#### 2.1.14.4 การสกัดโดยใช้ตัวทำละลาย

การสกัดน้ำมันหอมระเหยจากดอกไม้ ที่ไม่สามารถใช้วิธีกลั่นโดยใช้ไอน้ำได้ เนื่องจากองค์ประกอบของสารหอมระเหยในดอกไม้จะสลายตัว เมื่อถูกความร้อนสูง ดังนั้นจึงใช้ตัวทำละลาย เช่น เฮกเซน สกัดน้ำมันหอมระเหยออกมา หลังจากนั้นจะระเหยไล่ตัวทำละลายออกที่อุณหภูมิและความกดดันต่ำ ก็จะได้หัวน้ำหอมชนิด concrete



ภาพประกอบที่ 2.13 การกลั่น โดยใช้ตัวทำละลาย

#### 2.1.14.5 การสกัดโดยใช้ไขมัน

การสกัดโดยใช้ไขมันเป็นวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม มักใช้กับดอกไม้กลีบบาง เช่น มะลิ ช่อนกลิ่น โดยจะใช้ไขมันประเภทน้ำมันหมูเกลี่ยลงบนกลีบดอกไม้ แล้วนำดอกไม้มาเกลี่ยทับเป็นชั้นบาง ๆ จนเต็มถาด ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วเปลี่ยนดอกไม้ ชุดใหม่ ทำซ้ำประมาณ 7-10 ครั้ง ไขมันจะดูดซับสารหอมไว้ เรียกไขมันที่ดูดซับสารหอมนี้ว่า pomade หลังจากนั้นใช้เอทานอลละลายสารหอมออกจากไขมัน นำไประเหยไล่ตัวละลายออกที่อุณหภูมิและความกดดันต่ำ จะได้หัว

น้ำหอมชนิด concrete เมื่อแยกส่วนที่เป็นไขมันออกโดยการนำมาละลายเอทานอลแล้ว แช่วีนเพื่อแยกส่วนที่เป็นไขออก หลังจากระเหยไล่ตัวละลายออกจะได้หัวน้ำหอมชนิด absolute ซึ่งจัดเป็นหัวน้ำหอมชนิดดีและราคาแพงที่สุด

#### 2.1.14.6 Supercritical fluid extraction

เป็นวิธีการสกัดจากสมุนไพร โดยใช้ตัวทำละลายยิ่งยวด ซึ่งจะอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อสารอยู่ในอุณหภูมิและความดันที่เป็นจุดวิกฤตยิ่งยวด (critical point) จะมีคุณสมบัติในการซึมผ่านของแข็งได้เหมือนแก๊ส และสามารถละลายสารได้เหมือนของเหลว จึงสามารถประยุกต์สำหรับการสกัดสารได้เป็นอย่างดี ซึ่งสารสกัดที่ได้จากวิธีการนี้ มีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมและผู้บริโภคมากกว่าวิธีการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ ที่อาจไม่สามารถแยกตัวทำละลายออกมาได้หมด โดยสมบูรณ์ จึงอาจทำให้มีตัวทำละลายตกค้าง ส่วนตัวทำละลายวิกฤตยิ่งยวดที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด (supercritical carbon dioxide) สารตัวนี้มีข้อดีคือ มีจุดวิกฤตต่ำ คือที่สภาวะความดัน 72.8 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 31.1°C ในสภาวะวิกฤตยิ่งยวดนี้ คาร์บอนไดออกไซด์จะมีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายอย่างดี นอกจากนี้สามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่ายหลังจากสิ้นสุดการสกัดแล้วโดยการลดความดัน ทำให้ไม่ตกค้างในผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังไม่เป็นพิษและไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม จากข้อดีเหล่านี้จึงทำให้มีการประยุกต์ คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดในการสกัดต่าง ๆ มากมาย

การสกัดน้ำมันและน้ำมันหอมระเหยด้วยวิธี supercritical fluid extraction ได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถสกัดน้ำมันหอมระเหยได้ในปริมาณมากและใช้เวลาน้อยกว่า ตัวทำละลายที่นิยมใช้คือ carbon dioxide ซึ่งเป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อม เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิมที่เป็นที่นิยม (การสกัดแบบการกลั่นด้วยไอน้ำ) การสกัดแบบดั้งเดิมจะได้ปริมาณและจำนวนของน้ำมันหอมระเหยน้อยกว่า เนื่องจากการสูญเสียสารสำคัญจากความร้อนของไอน้ำ และใช้เวลามากกว่า

#### 2.1.15 การพิสูจน์หมู่ฟังก์ชันของสารที่สกัดด้วย FT-IR (Fourier Transform Infrared spectrometer) (อรัญญา และคณะ, 2548)

อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (infrared spectroscopy) เป็นเทคนิคที่ใช้พิสูจน์หมู่ฟังก์ชัน โดยการวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (IR) ของสารขณะที่มีการสั่นของอะตอมระหว่างพันธะของสาร โดยเมื่อโมเลกุลได้รับรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ตรงกับพันธะใด จะมีการดูดกลืนที่ความถี่นั้น โดยจะรายงานผลเป็น IR spectrum ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่นกับ

% การส่งผ่าน (percent transmittance, %T) โดยรังสีอินฟราเรดจะมีความยาวคลื่นในช่วง 0.8-200 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) และมีเลขคลื่น( $\nu$ )  $12,500\text{-}50\text{ cm}^{-1}$  โมเลกุลของสารเคมีประกอบด้วยอะตอมซึ่งจับกันด้วยพันธะเคมีและอะตอมเหล่านี้มีการสั่นตลอดเวลา

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 ทฤษฎีการอบแห้งเบื้องต้น (สมชาติ, 2540)

การอบแห้ง เป็นกระบวนการลดความชื้น ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการใดวิธีการหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย โดยอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย ซึ่งทั่วไปจะใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้งวัสดุ การถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปยังวัสดุนี้จะเกิดพร้อม ๆ กันกับการถ่ายเทมวลจากวัสดุไปยังอากาศ โดยของเหลวที่อยู่ภายในวัสดุจะเคลื่อนที่ออกมายังผิวโดย capillary flow ส่วนไอน้ำในวัสดุจะเคลื่อนที่เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (vapor diffusion) และความดันไอ (partial pressure of vapor) ที่แตกต่างกันระหว่างไอน้ำในวัสดุกับความชื้น ช่วงแรกของการอบแห้งเป็นช่วงอัตราการอบแห้งที่คงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลวัสดุกับอากาศจะเกิดขึ้นรอบ ๆ ผิววัสดุนั้น ความร้อนจากอากาศจะถ่ายเทไปยังผิววัสดุโดยการนำความร้อนผ่านชั้นฟิล์มของก๊าซ วัสดุจะแพร่ความชื้นจากผิวผ่านชั้นฟิล์มของก๊าซไปยังอากาศ และเมื่อผิวของวัสดุมีปริมาณน้ำลดลงมาก การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารจะเกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุด้วย โดยน้ำภายในวัสดุจะเคลื่อนที่มายังผิววัสดุในรูปของของเหลวหรือไอน้ำ แล้วระเหยเมื่อได้รับความร้อนจากอากาศ การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวจะช้ากว่าการพาความร้อนจากผิวไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศคงที่ ความชื้นของวัสดุจะต่ำลงจนถึงจุดหนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ที่จุดนี้ความดันของไอของน้ำในวัสดุมีค่าเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบ ๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ทำให้น้ำไม่สามารถระเหยออกจากวัสดุได้ เรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ในขณะที่ความชื้นที่อยู่ระหว่างการอบแห้งด้วยอัตราคงที่และอัตราการอบแห้งลดลงเรียกว่า ความชื้นวิกฤต (critical moisture content)

#### (1) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant drying rate period)

ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่นี้จะมีลักษณะการถ่ายเทมวลระหว่างวัสดุกับอากาศ เหมือนกับการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นที่กระเปาะเปียกของเทอร์โมมิเตอร์ คือเกิดขึ้นเฉพาะที่รอบ ๆ ผิวของวัสดุเท่านั้น โดยตัวแปรที่มีผลกับอัตราการอบแห้ง คือ อุณหภูมิ

ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของกระแสอากาศ ซึ่งอัตราการระเหยของน้ำจะเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนจากอากาศมายังวัสดุต่อความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำหรือเท่ากับอัตราการถ่ายเทมวล ดังสมการที่ (2.6)

$$\dot{m}_w = \frac{h'A(T_\infty - T_{wb})}{h_{fg}} \quad (2.6)$$

- เมื่อ  $\dot{m}_w$  คือ อัตราการระเหยของน้ำ, kg/h  
 $h'$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ, kJ/h.m<sup>2</sup>.°C หรือ W/m<sup>2</sup>.°C  
 $A$  คือ พื้นที่สัมผัสของวัสดุกับอากาศ, m<sup>2</sup>  
 $T_\infty$  คือ อุณหภูมิของกระแสอากาศ, °C  
 $T_{wb}$  คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก, °C  
 $h_{fg}$  คือ ค่าความร้อนแฝงของการระเหยกลายเป็นไอ, kJ/kg

จากสมการที่ (2.6) จะเห็นว่า อัตราการระเหยของน้ำจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถทำได้โดยการเพิ่มความเร็วของลมโดยวิธีนี้จะทำให้ความหนาของชั้นอากาศนิ่งที่อยู่รอบ ๆ ผิววัสดุมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มอัตราการระเหยน้ำได้อีกโดยการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ในการอบ หรือลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ซึ่งเป็นการทำให้ผลต่างของอัตราส่วนความชื้นของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น

### (2) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling drying rate period)

ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤต การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิววัสดุเท่านั้น แต่เกิดการถ่ายเทในเนื้อวัสดุด้วย การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความร้อนจากผิววัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง อัตราการระเหยของน้ำจะถูกควบคุมโดยความต้านต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุนั้น ทำให้เกิดเกรเดียนต์ความชื้นและอุณหภูมิในวัสดุ ซึ่งอุณหภูมิในวัสดุจะมีค่าสูงขึ้นและสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ การเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของของเหลว ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มของความชื้น

#### 2.2.2 สมการอบแห้งเบื้องต้น (สมชาติ, 2540)

สมการอบแห้ง คือ สมการที่อาจเขียนขึ้นโดยใช้ทฤษฎีหรือผลการทดลองหรือทั้งสองประกอบกันเพื่อนำมาใช้ทำนายอัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ตลอดจนถึงผล

ของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการอบแห้งผลิตภัณฑ์นั้น ๆ สมการอบแห้งชั้นบางสามารถแบ่งได้เป็น สมการอบแห้งทางทฤษฎี สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎีและสมการอบแห้งเอมพิริคัล

### 2.2.2 1 สมการอบแห้งทางทฤษฎี

ได้มีการนำหลักการทางทฤษฎีหลายทฤษฎีมาอธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง Luikov (1996) ได้เสนอกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุ ซึ่งอาจเกิดขึ้นในแบบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจาก capillary flow ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว (Surface force)

2) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลว เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (liquid diffusion)

3) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจากการแพร่ของความชื้นบนผิวของรูพรุนเล็ก ๆ (surface diffusion)

4) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (vapor diffusion)

5) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (thermal diffusion)

6) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวและไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม (hydrodynamic flow)

จากกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุดังกล่าว Luikov (1996) ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุ อุณหภูมิของวัสดุ และความดันรวม เนื่องจากแบบจำลองของ Luikov (1996) มีความยุ่งยากมาก เพราะมีตัวแปรและค่าพารามิเตอร์หลายตัว ดังนั้นจึงยังไม่มีกานำแบบจำลองนี้ไปใช้เป็นที่ยอมรับกัน โดยทั่วไปว่าการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุโดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของของเหลวที่เป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น อาจเขียนได้ดังสมการที่ (2.7)

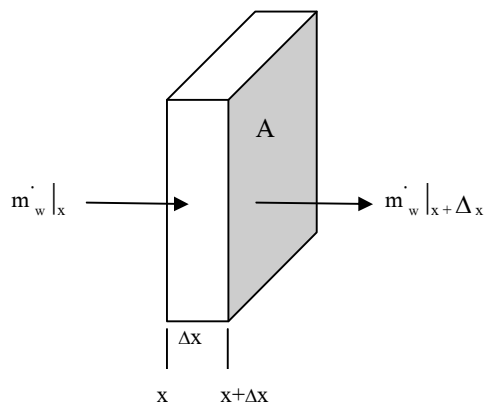
$$\dot{m}_w = -AD \frac{\partial C}{\partial X} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $\dot{m}_w$  คือ อัตราการถ่ายเทมวล, kg/h

A คือ พื้นที่การถ่ายเทมวล, m<sup>2</sup>

- C คือ ความเข้มข้นของความชื้น,  $\text{kg}/\text{m}^3$   
 x คือ ระยะ, m  
 D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่,  $\text{m}^2/\text{h}$

พิจารณาอัตราการเคลื่อนที่เข้าและออกจากปริมาตรควบคุม แสดงดังภาพประกอบที่ 2.14 และอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลในปริมาตรควบคุม (พิจารณาเพียงทิศทางเดียว)



ภาพประกอบที่ 2.14 ปริมาตรควบคุม

อัตราการถ่ายเทมวลทางเข้า คือ

$$\dot{m}_w|_x = -AD \frac{\partial C}{\partial x}|_x$$

อัตราการถ่ายเทมวลที่ทางออก คือ

$$\dot{m}_w|_{x+\Delta x} = -AD \frac{\partial C}{\partial x}|_{x+\Delta x}$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลในปริมาตรควบคุม คือ

$$\Delta \dot{m}_w = -A \frac{\partial C}{\partial x} \cdot \Delta x$$

เมื่อ t คือ เวลา, h

ทำ mass balance จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2.8)$$

นำค่าความหนาแน่นหารสมการ (2.8) ตลอด จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial M}{\partial x} \right) = \frac{\partial M}{\partial t} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $M$  คือความชื้นวัสดุ, decimal

ถ้าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าคงที่ จะได้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (2.10)$$

การหาคำตอบของสมการที่ (2.10) ต้องกำหนดสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต ดังนี้

สภาวะเริ่มต้น	$M(x, 0) = M_{in}$
สภาวะขอบเขต	$M(0, t) = M(\ell, t) = M_{eq}$

เมื่อ	$\ell$	คือ ความหนาของวัสดุ, m
	$M_{in}$	คือ ความชื้นเริ่มต้น, decimal
	$M_{eq}$	คือ ความชื้นสมดุล, decimal

จากสมการที่ (2.10) หากกำหนดสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตสำหรับวัสดุที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีความกว้าง  $l_x$  ความยาว  $l_y$  และความหนา  $l_z$  ส่วนวัสดุรูปทรงกลมที่มีรัศมี  $r$  ที่ใช้ในการแก้สมการ เป็นดังนี้

1) สำหรับวัสดุรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีความกว้าง  $l_x$  ความยาว  $l_y$  และความหนา  $l_z$

สภาวะเริ่มต้น	$M(x, y, z, 0) = M_{in}$
สภาวะขอบเขต	$M(x, y, z, t) = M(x, 0, z, t) = M(x, y, 0, t) = M_{eq}$
	$M(l_x, y, z, t) = M(x, l_y, z, t) = M(x, y, l_z, t) = M_{eq}$

2) สำหรับวัสดุรูปทรงกลมที่มีรัศมี  $r$

สภาวะเริ่มต้น	$M(r, 0) = M_{in}$
สภาวะขอบเขต	$M(r_0, t) = M_{eq}$

เมื่อ	$r$	คือ ระยะทางวัดจากจุดกึ่งกลางของวัสดุ, m
	$r_0$	คือ ความกว้างหรือรัศมี, m

M	คือ ความชื้น, decimal
M <sub>in</sub>	คือ ความชื้นเริ่มต้น, decimal
M <sub>eq</sub>	คือ ความชื้นสมดุล, decimal

และกำหนดให้

$$MR = \frac{(M_t - M_{eq})}{(M_{in} - M_{eq})} \quad (2.11)$$

เมื่อ	MR	คือ อัตราส่วนความชื้น, decimal
	M <sub>t</sub>	คือ ความชื้นที่เวลา t ใด ๆ, decimal

จากวิธีเชิงวิเคราะห์ ได้คำตอบสำหรับการเคลื่อนที่ความชื้นภายในวัสดุรูปทรงต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1) สำหรับวัสดุรูปทรงแผ่นแบนราบกว้างและยาว (infinite slab)

$$MR = \left( \frac{8}{\pi^2} \right) \sum_{p=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(2p+1)^2} \right] \exp \left[ \frac{-(2p+1)^2 \pi^2 Dt^2}{\ell^2} \right] \quad (2.12)$$

1.1) เมื่อพิจารณาเพียงสามเทอมแรก

$$MR = \left( \frac{8}{\pi^2} \right) \left[ \exp \left\{ \frac{-\pi^2 Dt}{\ell^2} \right\} + \frac{1}{9} \exp \left\{ \frac{-9\pi^2 Dt}{\ell^2} \right\} + \frac{1}{25} \exp \left\{ \frac{-25\pi^2 Dt}{\ell^2} \right\} \right]$$

2) สำหรับวัสดุรูปทรงกลม (sphere)

$$MR = \left( \frac{6}{\pi^2} \right) \sum_{p=1}^{\infty} \left( \frac{1}{n^2} \right) \exp \left( \frac{-p^2 \pi^2 X^2}{9} \right) \quad (2.13)$$

2.1) เมื่อพิจารณาเพียงสามเทอมแรก

$$MR = \left( \frac{6}{\pi^2} \right) \left[ \exp \left( \frac{-\pi^2 Dt}{r_0^2} \right) + \frac{1}{4} \exp \left( \frac{-4\pi^2 Dt}{r_0^2} \right) + \frac{1}{9} \exp \left( \frac{-9\pi^2 Dt}{r_0^2} \right) \right]$$

3) สำหรับวัสดุทรงลูกบาศก์ (cubic shape)

$$MR = \left( \frac{8}{\pi^2} \right)^3 \sum_{p=0}^{\infty} \left( \frac{1}{(2p+1)^2} \right)^3 \exp \left( \frac{-(2p+1)^2 3\pi^2 Dt}{\ell^2} \right) \quad (2.14)$$



3.1) เมื่อพิจารณาเพียงสามเทอมแรก

$$MR = \left( \frac{8}{\pi^2} \right) \left[ \exp\left( -\frac{3\pi^2 Dt}{\ell^2} \right) + \frac{3}{9} \exp\left( -\frac{11\pi^2 Dt}{\ell^2} \right) + \frac{3}{25} \exp\left( -\frac{27\pi^2 Dt}{\ell^2} \right) \right]$$

4) สำหรับรูปทรงกระบอกยาวมาก (infinite cylinder)

$$MR = \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{4}{\lambda_n^2} \right) \exp\left( -\frac{\lambda_n^2 X^2}{4} \right) \quad (2.15)$$

5) สำหรับวัสดุทรงกระบอกตัน (finite cylinder)

$$MR = \left\{ \left( \frac{8}{\pi^2} \right) \sum_{p=0}^{\infty} \left( \frac{1}{(2p+1)^2} \right) \exp\left( -\frac{(2p+1)^2 \pi^2 Dt}{\ell^2} \right) \right\} \times \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{4}{\lambda_n^2} \right) \exp\left( -\frac{\lambda_n^2 X^2}{4} \right) \right\} \quad (2.16)$$

$$\text{เมื่อ } X = \frac{A}{V} (Dt)^{1/2}$$

A คือ พื้นที่ผิว,  $m^2$

V คือ ปริมาตร,  $m^3$

P คือ จำนวนเต็มมีค่าเป็น 1, 2, 3,...

$\lambda_n$  คือ รากของเบสเซลฟังก์ชันอันดับที่ศูนย์  $\lambda_1 = 2.4048$ ,  $\lambda_2 = 5.5201$ ,  
 $\lambda_3 = 8.6537$

$\ell$  คือ ความหนาของแผ่นแบนกว้างและยาวมาก, m

r คือ รัศมีของทรงกระบอก, m

$r_0$  คือ รัศมีที่มีปริมาตรเทียบเท่ากับวัสดุ, m

และสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นและอุณหภูมิอบแห้งได้จากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ในรูปแบบสมการดังนี้

$$D = D_0 \exp\left[ -\frac{E_a}{R(T + 273.15)} \right] \quad (2.17)$$

เมื่อ D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น,  $m^2/s$

$D_0$  คือ ค่าคงตัว

$E_a$  คือ Activation Energy, kcal/kmol

R คือ ค่าคงตัวของก๊าซ,  $R = 8.314 \text{ kJ/kmol K}$

T คือ อุณหภูมิอบแห้ง,  $^{\circ}C$

### 2.2.2.2 สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี

เนื่องจากการนำสมการทางทฤษฎีที่ประกอบด้วยจำนวนพจน์ที่ไม่สิ้นสุดมาใช้งานไม่เป็นที่นิยม จึงพยายามทำให้ง่ายขึ้น โดยการตัดพจน์หลัง ๆ ซึ่งมีค่าน้อย ๆ ทิ้งไปเพื่อให้สะดวกต่อการคำนวณ ซึ่งจากสมการที่ (2.12) ถ้าคงไว้เพียงพจน์แรกจะทำให้ได้สมการ ดังนี้

$$MR = \left(\frac{8}{\pi^2}\right) \exp\left(\frac{-D\pi^2 t}{\ell^2}\right) \quad (2.18)$$

หรือ

$$MR = \left(\frac{8}{\pi^2}\right) \exp(-kt) \quad (2.19)$$

เมื่อ  $\ell$  คือ ความหนาของวัสดุ, m

$k$  คือ ค่าคงตัวของการอบแห้ง,  $h^{-1}$

สมการที่ (2.18) และ (2.19) จะให้ค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อเวลาการอบแห้งมีค่ามาก และค่าความแตกต่างจะน้อยกว่า 5% ถ้าอัตราส่วน  $\frac{D\pi^2 t}{\ell^2}$  มีค่ามากกว่า 1.2 (สมชาติ, 2540)

สามารถสร้างแบบจำลองการอบแห้งง่าย ๆ โดยการสมมติว่าอัตราการอบแห้งภายใต้สภาวะคงที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของความชื้นของวัสดุและความชื้นสมดุล ข้อสมมติฐานดังกล่าวคล้ายกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) เมื่อเขียนในรูปสมการอบแห้งจะได้ดังนี้

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_{eq}) \quad (2.20)$$

สภาวะเริ่มต้น  $M(0) = M_{in}$

สภาวะขอบเขต  $M(t) = M_{eq}$

คำตอบของสมการ (2.19) คือ

$$MR = \exp(-kt) \quad (2.21)$$

เมื่อ  $k$  คือ ค่าคงตัวของการอบแห้ง,  $h^{-1}$

$MR$  คือ อัตราส่วนความชื้น

$M$  คือ ความชื้นของวัสดุ, decimal

$M_{in}$  คือ ความชื้นเริ่มต้น, decimal

$M_{eq}$  คือ ความชื้นสมดุล, decimal

t คือ เวลา, h

### 2.2.2 3 สมการออบแห้งเอมพิริคัล (empirical equation)

สมการออบแห้งเอมพิริคัล คือ สมการที่สร้างจากข้อมูลการทดลองสำหรับวัสดุ ในช่วงอุณหภูมิ ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของอากาศอบแห้งหนึ่ง ๆ พบว่า สามารถใช้ทำนายอัตราการอบแห้งได้ดี แต่มีข้อจำกัดในเรื่องเงื่อนไขการอบแห้งที่ต้องการต้องตรงกับสภาวะการทดลอง

นอกจากสมการออบแห้งเอมพิริคัลที่ใช้ทำนายการอบแห้ง ในช่วงสภาวะอากาศอบแห้งที่ระบุไว้ สมการออบแห้งเอมพิริคัลยังคงเป็นสมการที่นำไปใช้เป็นแบบจำลองการออกแบบเครื่องอบแห้งขนาดใหญ่ ที่ช่วงสภาวะอบแห้งเดียวกันได้อย่างดี ตัวอย่างเช่น

$$\text{Newton model} \quad MR = \exp(-kt) \quad (2.22)$$

$$\text{Page model} \quad MR = \exp(-kt^n) \quad (2.23)$$

$$\text{Modified page model} \quad MR = \exp[-(kt)^n] \quad (2.24)$$

$$\text{Henderson and Pabis mode} \quad MR = a \exp(-kt) \quad (2.25)$$

$$\text{Wang and Singh model} \quad MR = 1 + at + bt^2 \quad (2.26)$$

เป็นต้น

เมื่อ a, b, n และ k คือ ค่าคงตัว  
t คือ เวลา, h

## 2.3 พารามิเตอร์พื้นฐานสำหรับการอบแห้งใบเตย

### 2.3.1 คุณสมบัติทางความชื้น

#### 2.3.1.1 ความชื้น (สมชาติ, 2540)

ค่าความชื้น หมายถึง ปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุ ชื้นหรือแห้ง ความ ชื้นในวัสดุสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry-basis) นิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น เนื่องจากมวลของวัสดุแห้งจะมีค่า คงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง และความชื้นมาตรฐานเปียก (wet-basis) ซึ่งนิยมใช้ในวงการค้าโดยทั่ว ๆ ไปจะอ้างในรูปของเปอร์เซ็นต์

### 2.3.1.2 ความชื้นสัมพัทธ์

ความชื้นสัมพัทธ์ คือ อัตราส่วนของเศษส่วนเชิงโมล (mole fraction) หรือความดันไอของไอน้ำในอากาศต่อเศษส่วนเชิงโมล หรือความดันไอของไอน้ำในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศเดียวกัน ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าระหว่าง 0-1

### 2.3.1.3 ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content)

ความชื้นสมดุลของวัสดุมีความสำคัญต่อการศึกษาระบวนการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่แล้วความชื้นของวัสดุก็จะลดต่ำลงจนถึงจุด ๆ หนึ่งซึ่งจะไม่เปลี่ยนแปลงอีกต่อไปในขณะนั้น ความชื้นในวัสดุจะมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบ ๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศของอากาศรอบ ๆ ด้วย เรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ค่าความชื้นสมดุลนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลที่กำหนดให้ทั้งกระบวนการคายความชื้น (desorption) และกระบวนการดูดซับความชื้น (adsorption) กับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อุณหภูมิกิ่งที่ค่าหนึ่ง เรียกว่า เส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอม (equilibrium moisture isotherm) เมล็ดพืชและวัสดุอาหารโดยส่วนใหญ่มีเส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอมเป็นรูปตัวซิกมอยด์ (sigmoid shape) แต่เส้นโค้งของกระบวนการคายความชื้นกับกระบวนการดูดซับความชื้นที่ได้จากวัสดุชนิดเดียวกันอาจจะมีค่าแตกต่างกัน ความแตกต่างของกระบวนการคายความชื้นและดูดความชื้นนี้ เรียกว่า ปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซิส (hysteresis effect)

วิธีการหาความชื้นสมดุล มีอยู่ 2 วิธีใหญ่ ๆ คือ วิธีสถิตและวิธีจลน์

#### (1) วิธีสถิต

เป็นที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายมาก่อน โดยมีหลักการคือ จะต้องทำให้ความชื้นของเมล็ดพืชเข้าสู่สมดุลกับอากาศรอบ ๆ ซึ่งอยู่นิ่ง สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

(ก) การหาความชื้นของวัสดุในภาชนะปิดโดยการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์และ อุณหภูมิให้คงที่โดยใช้สารละลายอิ่มตัวหรือสารละลายกรด ซึ่งค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิ่มตัวนี้จะแตกต่างกันตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (นิยมใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวมากกว่า เพราะมีเสถียรภาพและการกักความร้อน โลหะน้อยกว่ารวมทั้งราคาจะถูกด้วย) และจะชั่งน้ำหนักของ วัสดุจนกระทั่งน้ำหนักของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลงก็แสดงว่า วัสดุเข้าสู่สมดุลแล้วและความชื้นของวัสดุขณะนั้นก็คือความชื้นสมดุลนั่นเอง วิธีนี้มีข้อยอมรับได้ แต่มีข้อเสียคือ ใช้เวลานานหลายวันกว่าจะทำให้วัสดุเข้าสู่สมดุลและที่ค่าความชื้น

สัมพัทธ์สูงกว่า 80 % อาจเกิดเชื้อราขึ้นที่ผิววัสดุก่อนที่จะถึงจุดสมดุลทำให้ความชื้นสมดุลมีค่าคลาดเคลื่อนได้

(ข) การวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่อยู่ในสมดุลกับวัสดุที่ทราบค่าความชื้นภายในภาชนะปิดที่ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ซึ่งค่าความชื้นสัมพัทธ์นี้สามารถวัดได้ด้วยเครื่องไฮโกรมิเตอร์ เมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์คงที่ก็แสดงว่าวัสดุเข้าสู่สมดุลแล้ว วิธีนี้ถ้าจำกัดปริมาณอากาศรอบ ๆ วัสดุให้น้อยที่สุดได้ จะช่วยให้ถึงจุดสมดุลในระยะเวลาที่รวดเร็วกว่าแบบแรก

## (2) วิธีจลน์

เป็นวิธีที่ปรับปรุงมาจากวิธีสถิต มีลักษณะเหมือนกับวิธีสถิตต่างกันตรงที่วิธีจลน์อากาศรอบ ๆ วัสดุจะมีการเคลื่อนที่ในขณะที่วิธีสถิตอากาศจะอยู่นิ่ง จึงทำให้วัสดุเข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่าวิธีสถิตมาก คือประมาณ 1-2 วันหรือน้อยกว่า แต่มีข้อเสียคือ การควบคุมสภาวะของอากาศซึ่งเคลื่อนที่ให้มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่มีความยุ่งยากและซับซ้อน

ในการหาความชื้นสมดุลด้วยวิธีสถิตนั้นสารละลายเกลืออิ่มตัวที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติดังนี้ คือ ความชื้นสัมพัทธ์จะต้องไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ใช้ ความเข้มข้นและอุณหภูมิ สารละลายเกลืออิ่มตัวและสารละลายกรดต่าง ๆ ที่นิยมใช้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์

ตารางที่ 2.3 ความชื้นสัมพัทธ์ (%) เหนือสารละลายอิ่มตัวของเกลือบางอย่างที่อุณหภูมิต่าง ๆ

Temperature (°C)	LiCl	MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	NaCl	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	KNO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
10.0	13.3	34.2	57.8	75.4	81.8	95.5	97.9
32.2	11.9	32.6	51.9	75.6	80.0	90.0	96.5
48.9	11.5	31.6	47.3	74.8	79.1	85.3	95.8
68.3	11.1	30.3	42.2	73.2	78.0	78.0	95.0

## สมการความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content equation)

ได้มีการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุลทั้งสมการทางทฤษฎี กึ่งทฤษฎี และสมการที่ได้จากการทดลอง (empirical) หลายสมการ เพื่อใช้หาค่าความชื้นสมดุลของวัสดุชนิดต่าง ๆ สมการทางทฤษฎีที่มีอยู่ในปัจจุบันยังไม่มีสมการใดที่สามารถอธิบายความชื้นสมดุลได้อย่างถูกต้องตลอดช่วงของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่พิจารณา สมการที่จัดว่าสามารถอธิบายความชื้นสมดุลได้ดีพอสมควรคือ สมการของ BET (1938) ซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$\frac{RH}{(1-RH) M_{eq}} = \frac{1}{M_m C} + \frac{RH (C-1)}{M_m C} \quad (2.27)$$

เมื่อ  $C$  คือ ค่าคงตัว

$M_{eq}$  คือ ความชื้นสมดุล, % dry-basis

$RH$  คือ ความชื้นสัมพัทธ์, decimal

$M_m$  คือ ความชื้นสูงสุดในหนึ่งชั้น โมเลกุล, % dry-basis

และสมการของ Chung & Pfof (1967) ซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$\ln(RH) = \left( \frac{-A}{RT} \right) \exp(-BM_{eq}) \quad (2.28)$$

เมื่อ  $A, B$  คือ เป็นค่าคงตัวของวัสดุแต่ละชนิด

$M_{eq}$  คือ ความชื้นสมดุล, % dry-basis

$RH$  คือ ความชื้นสัมพัทธ์, decimal

$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์, K

$R$  คือ ค่าคงตัวของก๊าซ เท่ากับ 8.314 kJ/kg mol K

จากข้อจำกัดของสมการทางทฤษฎีทำให้มีการสร้างสมการกึ่งทฤษฎี (semi empirical) และสมการที่ได้จากการทดลอง (empirical) ขึ้น โดยมีสมการกึ่งทฤษฎีที่เป็นที่รู้จักกันมากที่สุดสมการหนึ่งคือ สมการของ Henderson (1952) โดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$1-RH = \exp(-kTM_{eq}^n) \quad (2.29)$$

เมื่อ  $k, n$  คือ เป็นค่าคงที่ของวัสดุแต่ละชนิด ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

$M_{eq}$  คือ ความชื้นสมดุล, % dry-basis

$RH$  คือ ความชื้นสัมพัทธ์, decimal

$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์, K

นอกจากนี้ยังมีผู้เสนอสมการความชื้นสมดุล ซึ่งสมการที่ได้จากทฤษฎี กึ่งทฤษฎี และจากการทดลองอีกหลายสมการ เช่น

$$\text{Hasey (1948);} \quad RH = \exp\left[\left(\frac{-A}{RT}\right)M_{eq}^B\right] \quad (2.30)$$

$$\text{Oswin (1946);} \quad M_{eq} = A\left(\frac{RH}{1-RH}\right)^B \quad (2.31)$$

เมื่อ	RH	คือ	ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ, decimal
	T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์, K
	$M_{cu}$	คือ	ความชื้นสมดุล, % dry-basis
	A, B	คือ	ค่าคงตัวของสมการ
	R	คือ	ค่าคงตัวของก๊าซ เท่ากับ 8.314 kJ/kg mol K

## 2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Apintanapong (2009) ศึกษาผลการอบแห้งของกระเพราแดงที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ โดยใช้คลื่นอินฟราเรดเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อน และศึกษาสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ และประสาทสัมผัส ในการทดลองใบกระเพราแดงจะถูกนำมาอบแห้งโดยใช้คลื่นรังสีอินฟราเรดและลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70°C แล้วศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton และ Page หลังการอบแห้ง ผลการทดลองพบว่า การอบแห้งโดยใช้คลื่นอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าแบบลมร้อน ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งพบว่าแบบจำลองของ Page ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่สูงกว่าแบบจำลองของ Newton เมื่อใช้คลื่นอินฟราเรดหลังการอบแห้ง และวิเคราะห์ค่า  $L^*$  ( $a^*$  และ  $b^*$ ) พบว่าใบกระเพราที่อบแห้งและที่ผ่านการดูดซับน้ำกลับ มีค่า  $L^*$  ลดลงทั้งในการอบแห้งแบบลมร้อนและคลื่นอินฟราเรด ขณะที่ค่า  $a^*$  และ  $b^*$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในการอบแห้งแบบลมร้อนแต่ลดลงเมื่อใช้คลื่นอินฟราเรด หมายเหตุ: ( $a^*$  คือค่าความเป็นสีแดง,  $b^*$  คือค่าความเป็นสีเหลือง,  $L^*$  คือ ค่าความสว่าง)

Arslan et al. (2006) การศึกษาลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับความชื้นของชาที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C ความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 0.1 – 0.9 พบว่าไอโซเทอมที่ได้มีลักษณะเป็นแบบ BET (Brunauer, S., Emmett, P.H. and Teller, E.) type II โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความชื้นสมดุลจะลดลง แบบจำลองของ Peleg เหมาะสมที่สุดในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลและความชื้นสัมพัทธ์สำหรับช่วงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ศึกษา อีกทั้งแบบจำลองของ BET สามารถนำมาหาค่าความชื้นที่ monolayer ( $a_w$ ) สมการของ Clausius–Clapeyron ใช้ในการประเมินค่า Isosteric heat ของการดูดซับ โดยค่า Isosteric heat และค่าเอนโทรปีการดูดซับลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความชื้นต่ำจะเกิดการคายความร้อนมากกว่าการดูดความร้อน

Cunningham et al. (2007) ศึกษาแบบการดูดซับน้ำของพาสต้า โดยทดลองการกินรูปของพาสต้าในน้ำที่อุณหภูมิ 20, 40, 60 และ 80°C และประยุกต์แบบจำลอง Peleg และ Weibull มาใช้สำหรับคาดคะเนปริมาณการดูดซึมน้ำของพาสต้า จากการทดลองพบว่า แบบจำลองของ Peleg ซึ่งมีรูปแบบสมการ คือ  $X_t = X_0 + [t/(k_1 + k_2t)]$  โดยค่าคงที่  $k_1$  และ  $k_2$  ลดลงตามอุณหภูมิ

ส่วนแบบจำลองของ Weibull ซึ่งมีรูปแบบสมการ คือ  $(X_{(t)} - X_e)/(X_0 - X_e) = \exp[-(t/\beta)^\alpha]$  โดยค่า  $\alpha$  เป็นค่าคงที่ที่แปรผันตามอุณหภูมิ ในขณะที่ ค่า  $\beta$  จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในกระบวนการคั้นรูปของพาสต้าแห้งจะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากทรูพูนที่มีลักษณะเป็นเม็ดแป้งเล็กๆ ไปเป็น โครงสร้างที่มีรูพรุนเม็ดแป้งบวมขึ้นที่ภายในเมทริกซ์โปรตีน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โครงสร้างก็จะมีพัฒนาไปเป็นโปรตีนที่จับกันเป็นก้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการดูดซับน้ำ

Gable et al. (2006) ศึกษาการอบแห้งหัวหอมโดยวิธีการสลายความร้อนผ่านอินฟราเรดแบบที่มีอากาศหมุนเวียน และไม่มีอากาศหมุนเวียน และวิธีการพาคความร้อนโดยใช้อากาศที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C พบว่า วิธีการสลายความร้อนผ่านอินฟราเรดแบบทั้งที่มี และไม่มีอากาศหมุนเวียนของอากาศ ต่างก็มีอัตราการอบแห้งสูงสุด ระยะเวลาที่ใช้สั้น และค่าคงที่การอบแห้งมากกว่าวิธีการพาคความร้อน โดยใช้อากาศที่องค์ประกอบความชื้นสูงกว่า 50% (dry-basis) สำหรับคุณภาพของหัวหอมอบแห้งนั้นจะวัดเป็น ความระดับของนูน ซึ่งพบว่าวิธีการอบแห้งทั้ง 2 ที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C นั้นมีความนูนใกล้เคียงกันนอกจากนี้ ลักษณะสีที่ได้ยังเป็นตัวชี้วัดได้อีกด้วย (สีขาว และสีเหลืองอ่อนจะดีกว่า) โดยพบว่าวิธีการสลายความร้อนผ่านอินฟราเรดที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะทำให้สีที่ดีกว่า วิธีการพาคความร้อน โดยใช้อากาศที่อุณหภูมิสูงกว่า ส่วนลักษณะที่ใหม่ (หรือสีน้ำตาล) มีสาเหตุจากการให้ความร้อนที่สูงของวิธีการสลายความร้อนผ่านอินฟราเรด และ การใช้เวลานานของวิธีการพาคความร้อน โดยใช้อากาศ ส่วนจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิตที่พบนั้นพบว่าไม่มีความแตกต่างระหว่างทั้งสองวิธีอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม สิ่งที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดนั้น คือจำนวนยีสต์ และราที่พบในตัวอย่างอบแห้งของวิธีการสลายความร้อนผ่านอินฟราเรดนั้นน้อยกว่าวิธีการพาคความร้อน โดยใช้อากาศอย่างชัดเจน ดังนั้นวิธีการสลายความร้อนผ่านอินฟราเรดจึงเหมาะสมกับการนำมาใช้ในขั้นตอนการอบแห้งหัวหอม

Marfil et al. (2008) ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการสูญเสียสารอาหารในผลิตภัณฑ์มะเขือเทศอบแห้ง โดยวิเคราะห์จากปริมาณสาร ascorbic acid ซึ่งมีอยู่ในผลิตภัณฑ์เป็นตัวยับยั้งปริมาณสารอาหาร พบว่า อัตราการสูญเสียสาร ascorbic acid ขึ้นอยู่กับการ pretreatment มะเขือเทศก่อนการอบแห้งและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง โดยอัตราการสูญเสียสาร ascorbic acid จะลดลง เมื่อทำการ osmotic pretreatment ก่อนการอบแห้ง และอัตราการสูญเสียจะเพิ่มขึ้น เมื่อใช้มะเขือเทศแบบผ่าซีก และใช้อุณหภูมิมอบแห้งสูงขึ้น

Nathakaranakule et al. (2010) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งลำไยด้วยลมร้อน และใช้รังสีอินฟราเรด ร่วมกับลมร้อนและบีบความร้อน ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 84-86% wet-basis และความชื้นสุดท้ายประมาณ 18% wet-basis โดยทำการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับบีบ



ความร้อน อุณหภูมิอบแห้ง 55°C และการอบแห้งด้วยการใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน อุณหภูมิอบแห้ง 65°C ให้มีการวนกลับของอากาศร้อนเท่ากับ 80% กำลังอินฟราเรด 250 350 และ 450 W ผลการการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับการใช้ลมร้อน และป้อนความร้อน พบว่าสามารถลดระยะเวลาการอบแห้ง หรือเพิ่มอัตราการอบแห้งลำไย เพราะการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุนขึ้นในลำไยอบแห้ง และเมื่อเพิ่มความเข้มรังสีอินฟราเรดจะเพิ่มความเป็นรูพรุนมากขึ้น กรณีตัวอย่างการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด โครงสร้างรูพรุนในผลิตภัณฑ์ทำให้ลำไยเกิดการหดตัวค้ำ และอัตราการคืนตัวสูงขึ้น ความแข็ง และความเหนียวลดลง ต่ำกว่าตัวอย่างอบแห้งในกรณีที่ไม่มีการใช้รังสีอินฟราเรด ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับลำไยอบแห้งในร้านค้าทั่วไป

Prachayawarakorn et al. (2008) ศึกษาจลนพลศาสตร์และคุณภาพของกล้วยไข่มัน ต่ำที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด ที่อุณหภูมิในช่วง 110-140°C กำหนดความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 4% dry-basis และใช้ Fick's second law ในการศึกษาค่า effective diffusion coefficient จากผลการทดลอง พบว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น จะใช้เวลาในการอบแห้งลดลง และอัตราการอบแห้งจะสูงขึ้น อีกทั้งทำให้รูพรุนภายในเนื้อวัสดุกว้างมากขึ้น ค่า effective diffusion coefficient ที่อุณหภูมิอบแห้งที่สูงกว่าจะมากกว่าที่อุณหภูมิอบแห้งที่ต่ำกว่า

Singh et al. (2007) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิของอากาศที่มีผลต่อการอบแห้ง และการคืนตัว (rehydration) ของกระเจี๊อม (water chestnut or trapa natans) โดยใช้อุณหภูมิอบแห้ง ในช่วง 50 – 90°C ความเร็วลม 1.5 m/s ความหนาของกระเจี๊อม  $4 \pm 0.4$  cm ก่อนทำการอบแห้ง นำไปแช่ในสารละลาย potassium metabisulphite (KMS) เข้มข้น 0.5% และ กรดซิตริก (citric) นาน 30 นาที ทำการอบแห้งจนกระทั่งความชื้นภายในวัสดุคงที่ จากนั้นวิเคราะห์การคืนตัว โดยการแช่ในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ คือ ที่ 25, 40 และ 80°C นาน 30 นาที จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้น ส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งลดลงและอัตราการอบแห้งสูงขึ้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายคุณลักษณะการอบแห้งกระเจี๊อมได้ดี คือ แบบจำลองของ Page การวิเคราะห์การคืนตัวของกระเจี๊อมภายหลังการอบแห้ง พบว่า อัตราการคืนตัวมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้นมีผลทำให้เกิด caramelization ที่ผิวของวัสดุมากขึ้น ทำให้น้ำแพร่เข้ามายังเนื้อวัสดุน้อยลง

Sinija et al. (2008) ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับความชื้นของผงชาเขียวและเมล็ดชาเขียวที่อุณหภูมิในช่วง 20-50°C ค่า water activity ในช่วง 0.11-0.90 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ Peleg, Modified Henderson และ GAB พบว่าแบบจำลองของ Peleg สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสมดุลและปริมาณความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของผงชา

เขียวและเมล็ดชาเขียวได้ดีที่สุด ค่าความร้อน (isosteric heat) ในการดูดซับของผงชาเขียวมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 44.71-48.54 kJ/mol ที่ระดับความชื้นในช่วง 1-9 g/g dry matter สำหรับเมล็ดชาเขียวมีค่าความร้อนเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 44.10-47.96 kJ/mol ที่ระดับความชื้นในช่วง 0.2-1.4 g/g dry matter

Varith et al. (2007) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งลำไยแบบไม่มีเมล็ดด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสองชั้น คือ ชั้นแรกอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่สภาวะหนึ่ง เป็นเวลา 1.7 ชั่วโมง จากนั้นชั้นที่สองอบแห้งโดยลดกำลังคลื่นไมโครเวฟ แต่เพิ่มอุณหภูมิลมร้อน และอบจนกระทั่งได้ความชื้นสุดท้ายตามที่ต้องการ โดยความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 18% dry-basis อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 40, 50 และ 60°C ระดับคลื่นไมโครเวฟที่ 100, 180, 300 และ 450 W พบว่า การอบแห้งลำไยด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนจะพบอัตราการอบแห้งเพียงสองช่วงคือ ช่วงอัตราอบแห้งเพิ่มขึ้น ในช่วงแรก ๆ ของการอบแห้ง และช่วงอัตราอบแห้งลดลง แต่เมื่อเทียบกับการอบแห้งลำไยด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวพบว่า มีช่วงอัตราอบแห้งทั้งสามช่วง โดยพบว่ามีช่วงอัตราอบแห้งคงที่ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสองชั้น พบว่า การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสองชั้นนี้ โดยชั้นแรกอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่กำลัง 450 W ลมร้อน 40°C เป็นเวลา 1.7 ชั่วโมง จากนั้นชั้นที่สองอบแห้งโดยลดกำลังคลื่นไมโครเวฟอยู่ที่ 300 W แต่เพิ่มอุณหภูมิลมร้อนอยู่ที่ 60°C และอบจนกระทั่งได้ความชื้นสุดท้ายตามที่ต้องการ จะช่วยย่นระยะเวลาอบแห้งได้ถึง 64.3% และลดค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้ถึง 48.2% ซึ่งจากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า การเพิ่มกำลังของคลื่นไมโครเวฟในช่วงแรกจะไปช่วยกระตุ้นการถ่ายเทน้ำภายในวัสดุมากยิ่งขึ้น และการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อน แต่ลดกำลังคลื่นไมโครเวฟในช่วงที่สอง ก็จะช่วยการถ่ายเทน้ำจากผิวมายังอากาศแวดล้อมได้ดีขึ้น ทำให้ช่วยลดปริมาณการสิ้นเปลืองพลังงานและย่นระยะเวลาการอบแห้งด้วย

จารุวรรณ และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบที่ระเหยง่าย ได้แก่ ethyl acetate, butyl acetate และ isoamyl acetate และคุณภาพของกล้วยแผ่นทางด้าน การหดตัว สี และเนื้อ สัมผัส โดยใช้กล้วยหอมทองหั่นตามขวางหนา 3 mm ทำการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 70, 80, 90 และ 100°C จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิการอบแห้งสูง และความชื้นสูงจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพสูง มีการหดตัวน้อย กรอบมากและความแข็งน้อยลง ขณะที่มิสีน้ำตาลเข้มข้น สำหรับปริมาณ isoamyl acetate ลดลงมากเมื่อใช้อุณหภูมิการอบแห้ง

สูงขึ้น ในขณะที่ ethyl acetate และ butyl acetate ลดลงน้อย ยกเว้นที่อุณหภูมิ 100°C butyl acetate มีค่าเพิ่มขึ้นจากตอนเริ่มต้น

ศิวะ และคณะ (2551) ได้ศึกษาอิทธิพลของกำลังอินฟราเรดที่มีต่อการอบแห้งลำไยทั้งลูก โดยพิจารณาจากค่าอัตราส่วนความชื้น อัตราการอบแห้งจำเพาะ อุณหภูมิเนื้อลำไย อิทธิพลของความเร็วลม อุณหภูมิลมร้อนที่มีผลต่อการอบแห้ง และแท่งรังสีอินฟราเรด 20 cm กำลังอินฟราเรด 300, 500 และ 700 W อุณหภูมิลมร้อน 60°C และความเร็วลม 1 m/s ผลการศึกษาพบว่าเมื่อกำลังอินฟราเรดเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งจำเพาะและอุณหภูมิเนื้อลำไยเพิ่มขึ้น การอบแห้งลำไยทั้งลูกด้วยอินฟราเรดที่ไม่มีลมไหลผ่านลำไยทำให้อุณหภูมิเนื้อลำไยและอัตราการอบแห้งจำเพาะสูงกว่าการอบแห้งที่มีอากาศไหลผ่านลำไย และการอบแห้งลำไยด้วยอินฟราเรดโดยให้ลมร้อนที่ 60°C และมีความเร็ว 1.0 m/s ไหลผ่านลำไยจะทำให้อุณหภูมิเนื้อลำไย และอัตราการอบแห้งจำเพาะสูงกว่าการอบแห้งไม่ใช้อากาศร้อนไหลผ่านลำไย

สำหรับงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับสารหอมระเหย มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Yahya et al. (2010) ได้ทำการศึกษาผลของการสกัดสารหอมระเหย 2-acetyl-1-pyrroline (2AP) จากใบเตยด้วยวิธี supercritical carbon dioxide extraction ที่อุณหภูมิ 50°C ความดัน 20 MPa เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย และได้ทำการเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดแบบ soxhlet extraction พบว่า การสกัดด้วยวิธี supercritical carbon dioxide extraction ให้ร้อยละผลได้ (% yield) ของสารหอมระเหย 2AP มากกว่าวิธีการสกัดแบบ soxhlet extraction

อรัญญา และคณะ (2548) ได้ศึกษาการเตรียมสารสกัดและน้ำมันจากสมุนไพรไทย โดยใช้ supercritical carbon dioxide fluid เปรียบเทียบกับการสกัดแบบดั้งเดิม พบว่า วิธีการใช้วิธีการสกัดแบบ supercritical carbon dioxide fluid มีประสิทธิภาพสูงและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม ตัวทำละลายที่ใช้คือ คาร์บอน ไดออกไซด์ เนื่องจากไม่มีสารตกค้างและสะดวก

Paramita Bhattacharjee et al. (2005) ได้ศึกษาการสกัดสาร 2-acetyl-1-pyrroline (2AP) ในใบเตยด้วยวิธี supercritical carbon dioxide extraction ที่สภาวะต่าง ๆ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดสาร 2AP คือที่สภาวะ ความดัน 450 bar อุณหภูมิ 60 °C เวลา 3 ชั่วโมง เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าวให้ผลได้ของสาร 2AP ถึง 7.16 ppm ซึ่งมากกว่าการสกัดด้วยวิธี solvent extraction หรือ Likens–Nickerson extraction

เจริญขวัญ และคณะ (2539) ได้ทำการศึกษาผลการอบแห้งที่มีต่อคุณภาพของเห็ดหอมโดยพิจารณาถึงคุณภาพทางด้านกลิ่นและรสของเห็ดหอม ซึ่งสารที่ใช้กำหนดคุณภาพคือ สาร Lenthionine การวิเคราะห์ปริมาณสาร Lenthionine ทำโดยการนำเห็ดหอมไปต้มในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปสกัดด้วยวิธี soxhlet และวิเคราะห์ปริมาณ โดยวิธีแก๊ส

โครมาโตกราฟ พบว่าปริมาณสาร Lenthionine ที่หาได้จากเห็ดหอมสดมีค่าเฉลี่ย  $2.7 \times 10^{-5}$  กรัม/กรัมเห็ดแห้ง และเห็ดหอมแห้งมีค่าอยู่ในช่วง  $3.84-8.92 \times 10^{-4}$  กรัม/กรัมเห็ดแห้ง แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งมีผลให้ปริมาณปริมาณสาร Lenthionine มีแนวโน้มลดลง

จากงานวิจัยที่ได้ศึกษารูปได้ว่า การอบแห้งด้วยลมร้อน เป็นการอบแห้งที่ใช้กันมาเป็นระยะเวลานานและมีใช้กันอยู่ทั่วไป โดยในปัจจุบันได้มีการนำแหล่งพลังงานจากไมโครเวฟและรังสีอินฟราเรด มาประยุกต์ใช้ รังสีอินฟราเรดและคลื่นไมโครเวฟสามารถให้พลังงานโดยตรงแก่ผลิตภัณฑ์ ทำให้พลังงานที่ใช้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ใช้อุณหภูมิในการอบแห้งต่ำ เวลาในการอบแห้งน้อยลง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีคุณภาพดี เป็นที่ยอมรับได้ทางการค้า

## บทที่ 3

### วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

#### 3.1 วัสดุดิบ

ใบเตย (*Pandanus amaryllifolius* Roxb.) ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจากตลาดสด พลาซ่า อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา นำมาล้างทำความสะอาด และหั่นให้มีขนาดประมาณ  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  และหาความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน AOAC (1995)



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 3.1 ใบเตยที่ล้างทำความสะอาด (ก) และใบหั่นขนาดประมาณ  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  (ข)

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.1 เครื่องอบแห้งแบบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อน ดังภาพประกอบที่

3.2 โดยมีรายละเอียดของเครื่องอบแห้งดังนี้

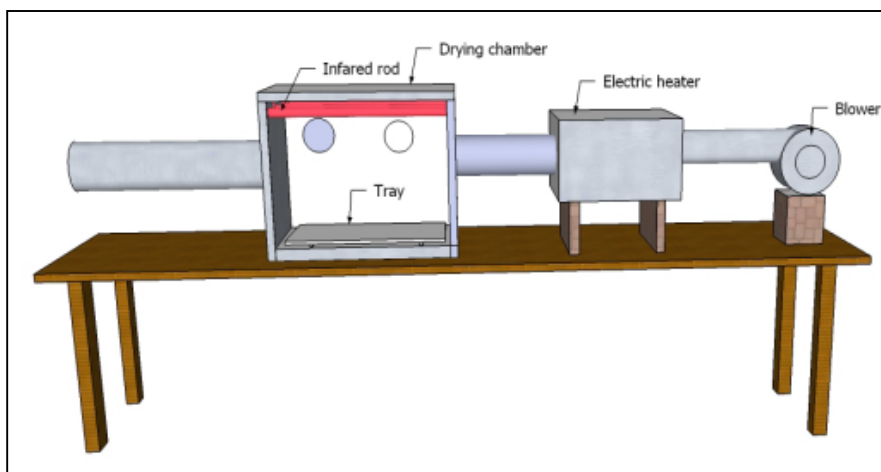


ภาพประกอบที่ 3.2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อน

- 1) ห้องอบแห้งเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด  $50 \times 100 \times 25 \text{ cm}^3$  ต่อกับเครื่องวัดอุณหภูมิ (data logger) ความละเอียด  $\pm 1^\circ\text{C}$
- 2) พัดลม ยี่ห้อ Daichi กำลัง 200 W
- 3) เครื่องทำความร้อน (heater) แบบครีป ประกอบด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้า กำลัง 1 kW จำนวน 3 ตัว ถาดอบแห้ง ขนาด  $46 \times 94 \text{ cm}^2$  จำนวน 1 ถาด

3.2.2 เครื่องอบแห้งแบบถาด ดังภาพประกอบที่ 3.3 โดยมีรายละเอียดของเครื่องอบแห้งดังนี้

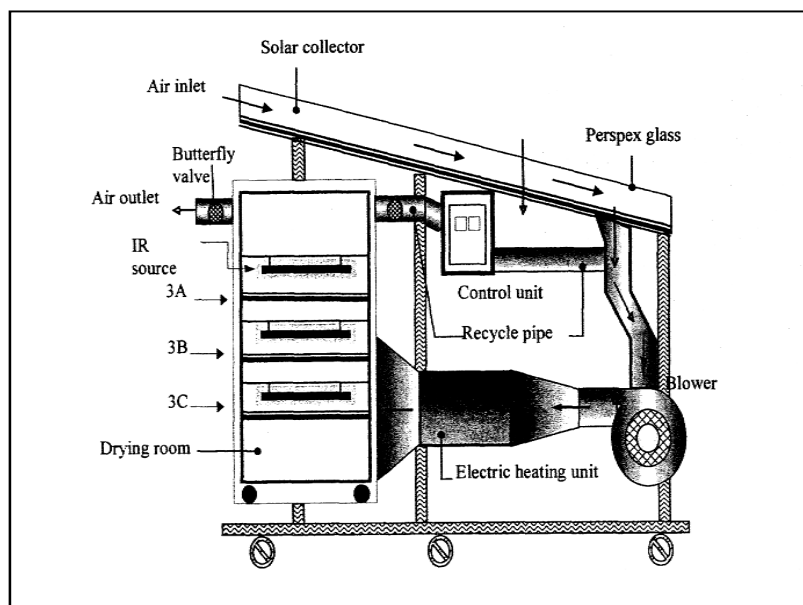
- 1) ห้องอบแห้งรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด  $61 \times 48 \times 53 \text{ cm}^3$  โดยมีเทอร์โมคัปเปิลต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูลสัญญาณเวลา (data logger, Yogokawa model FX100) ความละเอียด  $\pm 1^\circ\text{C}$
- 2) แท่งรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 W จำนวน 3 แท่ง
- 3) เครื่องทำความร้อน (heater) แบบครีป ประกอบด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้ากำลัง 1 kW จำนวน 3 ตัว
- 4) พัดลม ยี่ห้อ Daichi กำลัง 200 W 0.5 แรงม้า
- 5) ถาดอบแห้ง ขนาด  $41.5 \times 47.5 \text{ cm}^2$  จำนวน 1 ถาด



ภาพประกอบที่ 3.3 เครื่องอบแห้งแบบถาด

3.2.3 เครื่องอบแห้งแบบใช้พลังงานความร้อนร่วม ได้แก่ ลมร้อน รังสีอินฟราเรด และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ดังภาพประกอบที่ 3.4 โดยมีรายละเอียดของเครื่องอบแห้งดังนี้

- 1) ห้องอบแห้งรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด  $60 \times 80 \times 158.5$  cm<sup>3</sup> โดยมีเทอร์โมคัปเปิลเปิดต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูลสัญญาณเวลา (Yogokawa, model FX100) ความละเอียด  $\pm 1^{\circ}\text{C}$
- 2) เครื่องทำความร้อน (heater) ขนาด 1,000 W จำนวน 10 ตัว
- 3) แท่งรังสีอินฟราเรดกำลัง 500 W จำนวน 3 แท่ง วางในแนวขนานกับถาดอบแห้งและห่างจากวัสดุอบแห้ง 0.12 m
- 4) แผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด  $32.5 \times 133 \times 240$  cm<sup>3</sup> วางทำมุมเอียง 14 องศา กับแนวระดับ
- 5) ถาดอบแห้งสแตนเลสขนาด  $44 \times 70 \times 5$  cm<sup>3</sup> จำนวน 3 ถาด (3C เป็นถาดล่าง 3B เป็นถาดที่ 2 และ 3A เป็นถาดที่ 3)
- 6) พัดลม มีใบพัดแบบโค้งหน้าขนาด 1 hp จำนวน 1 ตัว
- 7) ท่ออากาศไหลกลับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm จำนวน 2 ท่อ



ภาพประกอบที่ 3.4 เครื่องอบแห้งแบบพลังงานความร้อนร่วม (Tirawanichakul *et al.*, 2008)

3.2.4 เครื่องอบไมโครเวฟ ยี่ห้อ DAEWOO รุ่น KOR-63D7

3.2.5 เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ ยี่ห้อ YOKOKAWA ต่อกับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K เพื่อวัดอุณหภูมิภายในตู้อบแห้ง อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิกระเปาะเปียก

3.2.6 เครื่องชั่งน้ำหนัก ยี่ห้อ A&D รุ่น GF 3000 ค่าความละเอียด  $\pm 0.01$  g

3.2.7 เครื่องวัดความเร็วลม ยี่ห้อ DIGICON รุ่น DA-45 ความละเอียด  $\pm 0.01$  m/s

3.2.9 เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ ความละเอียด  $\pm 0.05$  mm

3.2.10 ขวดโหลแก้วปิดสนิท ขนาด 2 ลิตร มีแผ่นยางรองได้ฝาเพื่อป้องกันการระเหิดของสารละลายเกลืออิมตัวและสามารถใช้กับตู้อบอุณหภูมิ  $40-100^{\circ}\text{C}$  ได้ เพื่อทำการทดลองหาค่าความชื้นสัมบูรณ์

3.2.11 อุปกรณ์เครื่องแก้ว ได้แก่ บีกเกอร์ขนาด 100 ml และ 250 ml

3.2.12 เครื่องวัดสี ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น JP7100 โดยระบบ CIELAB

3.2.13 เครื่องบดไฟฟ้า ยี่ห้อ Phillips รุ่น RH2011

3.2.14 เครื่องสกัด Supercritical fluid extractor (SFT, 150/250 SFE)

3.2.15 เครื่อง FTIR Spectrometer (Perkin-Elmer, Model 1600)

3.2.16 ตู้อบไฟฟ้า ยี่ห้อ Memmert



ภาพประกอบที่ 3.5 เครื่อง Supercritical fluid extractor



ภาพประกอบที่ 3.6 เครื่อง FTIR spectrometer

(ที่มา : <http://www.perkinelmer.com>)



### 3.3 สารเคมี

3.3.1 Sodium chloride (A.R. grade, Ajax Finechem, New Zealand)

3.3.2 Lithium chloride (A.R. grade, Ajax Finechem, New Zealand)

3.3.3 Magnesium Chloride Hexahydrate (Riedel-dehaen, Germany)

3.3.4 Magnesium nitrate hexahydrate (A.R. grade, Ajax Finechem, New Zealand)

3.3.5 Ammonium sulfate (Fluka Analytical, Germany)

3.3.6 Potassium nitrate (A.R. grade, J.T. baker, USA)

### 3.4 วิธีการวิจัย

แบ่งออกเป็นขั้นตอน ดังนี้

#### 3.4.1 ศึกษาผลของความชื้นสมดุล

การหาความชื้นสมดุลจะควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมให้คงที่ การควบคุมอุณหภูมิทำได้โดยใช้ตู้อบไฟฟ้าที่มีเทอร์โมสแตทเป็นตัวควบคุมการทำงานของหลอดไฟฟ้า ส่วนความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมควบคุมได้โดยการใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวของ LiCl, NaCl, KNO<sub>3</sub>, MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O และ Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O โดยทั่วไปจะบรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัวในขวดแก้วขนาดเล็ก แล้ววางตัวอย่างไบเตย หันขนาด 1×1 cm<sup>2</sup> วางบนตะแกรง ซึ่งแขวนไว้เหนือสารละลายเกลืออิ่มตัว ปิดฝาขวดให้แน่น เพื่อป้องกันการถ่ายเทมวลระหว่างอากาศภายในขวดและภายนอกขวด จากนั้นจึงนำไปใส่ในตู้อบในช่วงอุณหภูมิ 40-65°C ที่ไว้ให้เข้าสู่สมดุลและหาความชื้นสมดุลตามมาตรฐาน AOAC (1995) โดยค่าความชื้นสัมพัทธ์เหนือสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.3

#### 3.4.2 ศึกษาการอบแห้งไบเตยด้วยพลังงานความร้อนต่าง ๆ

(1) นำไบเตยมาล้างทำความสะอาด และหั่นไบเตยให้มีขนาดประมาณ 1×1 cm<sup>2</sup> มาทำการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ ดังนี้

สภาวะที่ 1 อบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (solar)

สภาวะที่ 2 อบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อน (solar+HA) อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 45-65°C โดยสภาวะที่ 1 และ 2 อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (ภาพประกอบที่ 3.2)

สภาวะที่ 3 อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (MW) กำลังของไมโครเวฟ 472, 584 และ 704 W

สภาวะที่ 4 อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสองขั้นตอน (MW, HA) โดยขั้นตอนแรกอบด้วยกำลังของไมโครเวฟ 472 W เป็นเวลา 3 นาที และขั้นตอนที่สองอบแห้งด้วยลมร้อนด้วยอุณหภูมิอบแห้งในช่วง 45-65°C

สภาวะที่ 5 อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับรังสีอินฟราเรดแบบสองขั้นตอน (MW, IR) โดยขั้นตอนแรกอบด้วยกำลังของไมโครเวฟ 472 W เป็นเวลา 3 นาที และขั้นตอนที่สองอบแห้งกำลังของอินฟราเรด 500 และ 1,000 W อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 45-65°C

สภาวะที่ 3-5 อบแห้งด้วยเครื่องอบไมโครเวฟ และเครื่องอบแห้งแบบถาดในขั้นตอนที่สอง (ภาพประกอบที่ 3.3)

สภาวะที่ 6 อบแห้งด้วยลมร้อน (HA) อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 45-65°C

สภาวะที่ 7 อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (IR) กำลังของอินฟราเรดในช่วง 500-1,500 W อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 45-65°C

สภาวะที่ 8 อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด (HA+IR) กำลังของอินฟราเรด 500 และ 1,000 W อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 45-65°C

สภาวะที่ 6-8 อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วม (ภาพประกอบที่ 3.4)

โดยกำหนดความชื้นสุดท้ายของทุกสภาวะการทดลองในช่วง 8-12% dry-basis

(2) บันทึกผลการทดลอง ได้แก่ น้ำหนักใบเตย อุณหภูมิกระเปาะเปียก กระเปาะแห้ง และ อุณหภูมิอบแห้งภายในห้องอบแห้ง

(3) บันทึกปริมาณพลังงานที่ใช้ด้วย Watt-hour meter

(4) หาค่าความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายตามมาตรฐาน AOAC (1995)

วิธีการหาค่าตามมาตรฐานของ Association of Official Agricultural Chemists (AOAC, 1995) ใช้การอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 103±2°C เป็นเวลา 72-96 ชั่วโมง เมื่อครบตามกำหนดเวลาแล้วนำออกจากตู้อบไปวางไว้ในเคชิตเตอร์จนเย็นเท่ากับอุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำวัสดุไปชั่งน้ำหนัก โดยถือว่าน้ำหนักของวัสดุที่ผ่านการอบที่อุณหภูมินี้มาแล้วเป็นน้ำหนักแห้ง จากนั้นนำไปคำนวณหาความชื้นตามสมการ

$$M_d = \frac{w-d}{d} \times 100 \quad \text{หรือ} \quad M_w = \frac{w-d}{w} \times 100$$

เมื่อ  $M_d$  คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง, % dry-basis

$M_w$	คือ	ความชื้นมาตรฐานเปียก, % wet-basis
$d$	คือ	มวลแห้ง, kg
$w$	คือ	มวลแห้งและน้ำ, kg

### 3.5 การทดสอบคุณภาพของใบเตยภายหลังการอบแห้ง

#### 3.5.1 คุณภาพทางกายภาพ

##### 3.6.1.1 คุณภาพสี

การทดสอบคุณภาพทางด้านสีของผลิตภัณฑ์ใบเตยด้วยเครื่องวัดสีอาหาร ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น JP7100 วัดค่าสีของผลิตภัณฑ์ใบเตยในเทอมของตัวแปร  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  โดยค่า  $L^*$  (lightness parameter) แสดงค่าความสว่าง ค่า  $a^*$  (redness parameter) แสดงค่าสีแดงหรือสีเขียว และ ค่า  $b^*$  (yellowness parameter) แสดงค่าสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน ก่อนวัดสีของตัวอย่างให้ทำการสอบเทียบ (calibrate) ด้วยแผ่นสีมาตรฐาน ( $L^*=96.98$ ,  $a^*=0.03$ ,  $b^*=1.84$ ) แต่ละตัวอย่างวัด 3 ซ้ำ โดยนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ใบเตยมาวางลงบนช่องทดสอบแล้วครอบด้วยฝาสีดำอีกชั้น จึงทำการวัดและคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม ค่าสีที่ปรากฏให้เห็น (hue) และ ค่าแสดงความบริสุทธิ์ของสี (chroma) ดังสมการที่ (3.1) - (3.3) ตามลำดับ

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L_f^*)^2 + (a_0^* - a_f^*)^2 + (b_{01}^* - b_f^*)^2} \quad (3.1)$$

$$h^\circ = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (3.2)$$

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $L_0^*$ ,  $a_0^*$  และ  $b_0^*$  คือ ค่าความสว่าง, สีแดง (หรือเขียว) และสีเหลือง (หรือน้ำเงิน) ที่สภาวะเริ่มต้น ตามลำดับ

$L_f^*$ ,  $a_f^*$  และ  $b_f^*$  คือ ค่าความสว่าง, สีแดง(หรือเขียว) และสีเหลือง (หรือน้ำเงิน) ที่สภาวะสุดท้าย ตามลำดับ

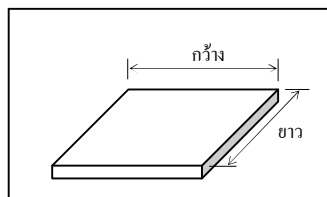
$L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  คือ ค่าความสว่าง, สีแดง(หรือเขียว) และสีเหลือง (หรือน้ำเงิน) ที่สภาวะใด ๆ ตามลำดับ

$\Delta E$  คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม

$h^{\circ}$	คือ ค่าสีที่ปรากฏให้เห็น (เจดสี)
$C^*$	คือ ค่าที่แสดงความบริสุทธิ์ (purity) ของสี

### 3.5.1.2 การหดตัว (shrinkage)

ในการทดสอบการหดตัวจะวัดทางด้านกว้างและด้านยาวด้วยทั้งก่อนและหลังการทำให้แห้งด้วย เวย์เนียร์คาร์ลิปเปอร์ ความละเอียด  $\pm 0.05$  mm โดยใช้ตัวอย่างทั้งหมด 10 ตัวอย่างในแต่ละการวัด ดังภาพประกอบ 3.7 แล้วนำมาคำนวณตามสมการที่ (3.4)



ภาพประกอบที่ 3.7 การวัดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ไบเบต

$$\% \text{Shrinkage} = \frac{L_{\text{initial}} - L_{\text{final}}}{L_{\text{initial}}} \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ  $L_{\text{initial}}$  และ  $L_{\text{final}}$  คือ ความยาวเฉลี่ยของไบเบตที่วัดได้ก่อนและหลังอบแห้งตามลำดับ

### 3.5.1.3 การคืนตัว (rehydration)

การทดสอบการคืนตัว ใช้วิธีการคืนตัวในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ  $90 \pm 3^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 10 นาที โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักวัสดุอบแห้งที่นำมาทำการทดสอบ
2. นำไบเบตอบแห้งที่ทดสอบใส่ลงในน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ  $90 \pm 3^{\circ}\text{C}$  โดยใช้ระยะเวลาในการทดสอบทั้งหมด 10 นาที
3. นำมาคำนวณค่าการคืนตัวของวัสดุจากสมการที่ (3.5)

$$\% \text{Rehydration} = \frac{W_r - W_d}{W_d} \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ	$W_t$	คือ มวลของวัสดุที่ทำการคืนตัว, g
	$W_d$	คือ มวลของวัสดุแห้ง, g

### 3.5.2 คุณภาพทางเคมี

#### 3.5.2.1 การทดสอบสกัดสารหอมระเหยโดยวิธี supercritical fluid extraction

supercritical fluid extraction เป็นวิธีการเตรียมสารสกัดจากสมุนไพรโดยใช้ตัวทำละลายยิ่งยวด ซึ่งจะอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อสารอยู่ในอุณหภูมิและความดันที่เป็นจุดวิกฤตยิ่งยวด (critical point) จะมีคุณสมบัติในการซึมผ่านของแข็งได้เหมือนแก๊ส และสามารถละลายสารได้เหมือนของเหลว จึงสามารถประยุกต์สำหรับการสกัดสารได้เป็นอย่างดี ตัวทำละลายวิกฤตยิ่งยวดที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด (supercritical carbon dioxide) ซึ่งจะทำการสกัดที่สภาวะความดัน 450 bar อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (Paramita *et al.*, 2005) โดยใบเตยที่นำมาสกัดนั้นจะต้องบดให้ละเอียดจนเป็นผงด้วยเครื่องบดไฟฟ้า

#### 3.5.2.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารสกัดด้วย Fourier transform infrared spectrometer (FT-IR)

โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ ดังนี้ (Silverstein *et al.*, 1991)

##### 1. การ Calibrate ความยาวคลื่น

ทำการ Calibrate ความยาวคลื่นจากสารมาตรฐาน เช่น แผ่น film ของ polystyrene และตรวจสอบค่าความยาวคลื่นที่วัดได้จากเครื่องเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน การทำ calibration เพื่อให้ทราบว่าเครื่อง FT-IR ที่ใช้มีระบบการทำงานที่ทำให้การวัดการดูดกลืนแสงถูกต้อง

##### 2. การเตรียมสารตัวอย่างที่เป็น liquid และ solution

###### 2.1 neat liquid

สำหรับของเหลวที่มีจุดเดือดสูงกว่า 100°C การเตรียมสารตัวอย่าง โดยการหยด Neat liquid บนแผ่น Infrared-transmitting window และประกบด้วย window อีกแผ่นหนึ่ง กดแผ่นทั้งสองเข้าด้วยกัน จะทำให้เกิด film หนาประมาณ 0.01 mm แผ่นทั้งสองจะยึดกันด้วย Capillary action

###### 2.2 sealed liquid cell

สำหรับสารตัวอย่างที่มีจุดเดือดต่ำกว่า 100°C หรืออยู่ในรูปสารละลาย จะใช้ sealed liquid cell การบรรจุสารทำโดยใช้ syringe ฉีดเข้าสู่ liquid cell และปิดช่อง

ใส่สารด้วยพลาสติก โดยสารตัวอย่างอาจเป็นสารละลายที่เตรียมจาก liquid, solid, หรือ dissolved gas โดยทั่วไปจะใช้ solution cell ซึ่งมีความหนาประมาณ 0.1-1 mm ความเข้มข้น 0.05-10%

### 3. การเตรียมสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง

#### 3.1 pellet (pressed disk)

โดยบดผสมสารที่ต้องการวิเคราะห์กับ KBr ใน smooth agate motar แล้วนำมาอัดด้วยเครื่องอัดให้เป็นแผ่นบางและใส ด้วยแรงดัน 10,000 – 15,000 psi ในสภาวะสุญญากาศ

#### 3.2 Mull

เตรียมโดยบดสาร 2-5 mg ใน smooth agate motar และเติม mulling agent 1-2 หยด และบดให้เข้ากัน อนุภาคที่ได้มีขนาดเล็กกว่า 2  $\mu\text{m}$  ทำให้สามารถลดการกระเจิงของรังสีได้ ในการวัดจะใส่ mull บน salt plate และประกบด้วย salt plate ให้สารตัวอย่างเป็นแผ่นบาง ๆ และทำการวัด

4. บันทึก FT-IR spectrum ของสารตัวอย่าง ใช้ software spectrum lite ช่วยในการดูพีค (peak) ของแต่ละสเปกตรัม

### 3.5.3 การทดสอบลักษณะทางประสาทสัมผัส (sensory evaluation)

ทำการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส โดยใช้วิธี มผช. โดยการนำไบเบตยที่ได้มาทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสซึ่งพิจารณาลักษณะของไบเบตยอบแห้ง ลักษณะสี กลิ่น รสชาติจากการชง และความชอบโดยรวม โดยใช้ผู้ชิม 10-15 คน แล้วให้คะแนนความชอบ (hedonic scale) 1-9 คะแนน (1= ไม่ชอบมากที่สุด และ 9 = ชอบมากที่สุด)

### 3.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ผลการทดลองที่ได้จะนำมาวิเคราะห์โดยอาศัยหลักวิชาการทางสถิติของคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี และทางด้านประสาทสัมผัส โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS (Statistical Package for the Social Sciences), version 12 และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองโดย Duncan's multiple-range test ซึ่งพิจารณาค่าที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p < 0.05$ )

## บทที่ 4

### ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้สามารถแยกวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลองออกเป็น

1. ศึกษาความชื้นสมดุล การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
2. ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบเตยด้วยลมร้อน รังสีอินฟราเรด คลื่นไมโครเวฟและการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมด้วยรูปแบบต่าง ๆ
3. ศึกษาคุณภาพของใบเตยแห้งที่ผ่านกระบวนการในข้อ 2 ทางด้านกายภาพ ทางเคมี และทางด้านประสาทสัมผัส

#### 4.1 ผลการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของใบเตย

ผลการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของใบเตยแบบคายความชื้น (desorption) ที่อุณหภูมิ 40-65°C โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 0.10-0.90 และใช้ตู้อบเป็นอุปกรณ์ในการควบคุมอุณหภูมิ โดยทำการดัดแปลงรูปแบบสมการความชื้นสมดุลของ Oswin (1946) Modified Oswin (1946) Handerson (1952) Modified Henderson (1952) และ BET (Brunauer et al. 1938) จากผลการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของใบเตย และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (สมชาติ, 2540) โดยทำการวิเคราะห์สมการถดถอยด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด สามารถหาค่าคงตัวของสมการความชื้นสมดุลแบบต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1

จากตารางที่ 4.1 พบว่า รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุลของใบเตยของค่าความชื้นสมดุลของใบเตยของ BET (Brunauer et al. 1938) สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ซึ่งเท่ากับ 0.9875 และมีค่า RMSE เท่ากับ 0.0125 ซึ่งมีค่าน้อยที่สุด และเมื่อนำค่าคงตัวแทนกลับเข้าไปในสมการ แล้วนำไปเขียนกราฟเปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังภาพประกอบที่ 4.1 ซึ่งการที่วัสดุจะเข้าสู่สมดุลความชื้นกับอากาศแวดล้อมรอบ ๆ ตัว ที่ความชื้นสัมพัทธ์หนึ่ง ๆ ย่อมมีความแตกต่างกัน เช่นเดียวกันกับในกรณีของการอบแห้งมักจะเกี่ยวข้องกับการคายความชื้นเป็นส่วนใหญ่ เมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงตัว ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุด ๆ

หนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศรอบๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆ ด้วย ความชื้นที่ลดลงเกิดจากการระเหยของน้ำที่ได้รับความร้อนจากตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้ง

ตารางที่ 4.1 ค่าคงตัวของรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุลของไบโเคย

Name of model	Model	Constant of model	R <sup>2</sup>	RMSE
Oswin (1946)	$M_{eq} = A \left( \frac{RH}{1-RH} \right)^B$	A=0.1377 B=0.5003	0.7779	0.0528
Modified Oswin (1946)	$RH = \frac{1}{\left( \frac{A+BT}{M_{eq}} \right)^C + 1}$	A=-1.1190 B=0.0038 C=0.5847	0.9672	0.0203
Handerson (1952)	$1-RH = \exp(-ATM_{eq}^B)$	A=0.0300 B=1.3903	0.7444	0.0566
Modified Henderson (1952)	$RH = 1 - \exp[-A(T+B)M_{eq}^C]$	A=207.6740 B=-292.1088 C=1.0992	0.9373	0.0280
BET (Brunauer et al., 1938)	$\ln \frac{RH}{(1-RH)M_{eq}} = \frac{1}{M_m C} + \frac{(C-1)RH}{M_m C}$	$M_m = 1.4694 - 0.0050T$ $C = -0.3715 - 0.0025T$	0.9875	0.0125

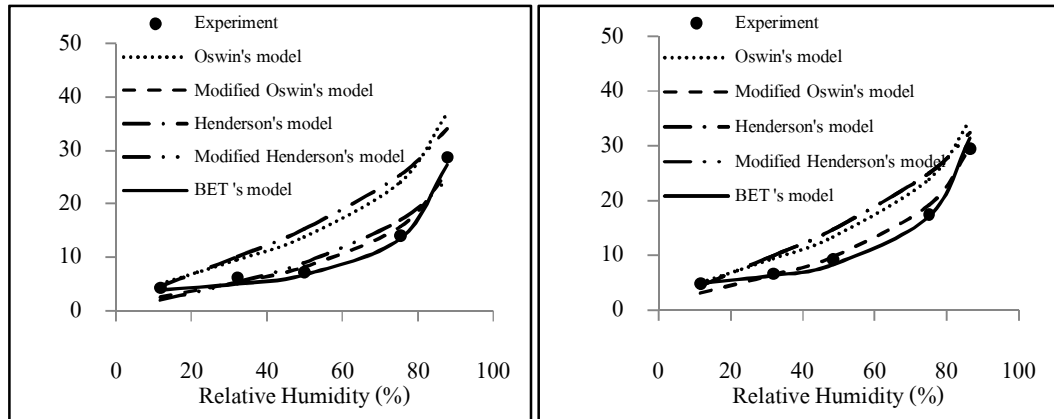
หมายเหตุ : A, B, C และ M<sub>m</sub> คือ ค่าคงตัว; M<sub>eq</sub> คือ ค่าความชื้นสมดุล (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง); RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (เศษส่วน); T คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ (K)

โดยคำนวณค่า RMSE (Root mean square error) จากสมการดังนี้

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{Data}_{\text{predicted},i} - \text{Data}_{\text{experiment},i})^2}{N}}$$

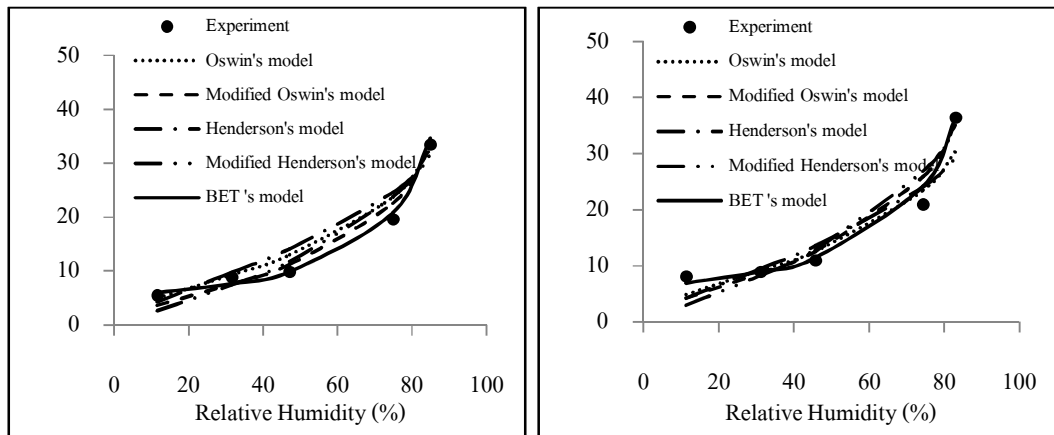
เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด





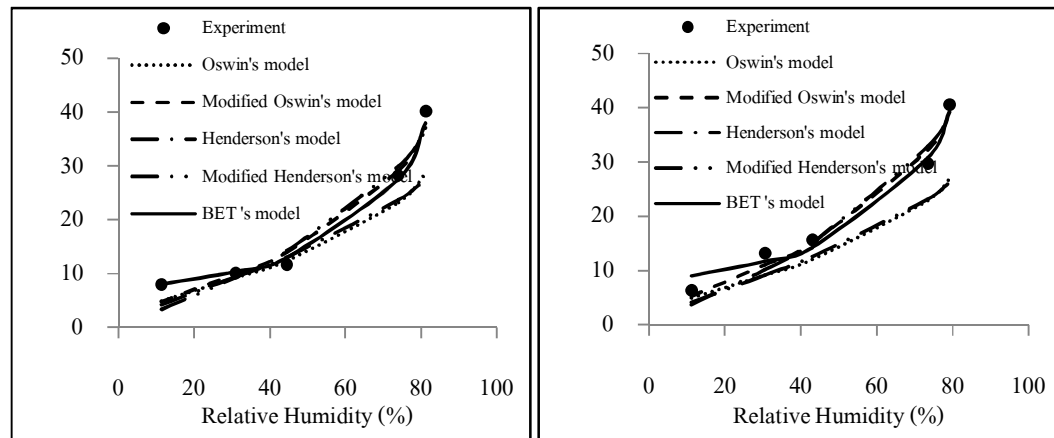
(ก) 40°C

(ข) 45°C



(ค) 50°C

(ง) 55°C



(จ) 60°C

(ฉ) 65°C

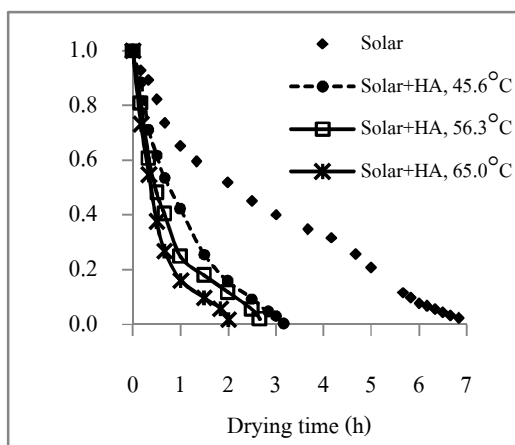
ภาพประกอบที่ 4.1 เปรียบเทียบความชื้นสมดุลของผลการทดลองและผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิต่างๆ ของใบเตยแห้งขนาด  $1 \times 1 \text{ cm}^2$

## 4.2 ผลการทดลองหาจลนพลศาสตร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งใบเตยที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ

### 4.2.1 จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งใบเตย

#### 4.2.1.1 การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อน

จากการทดลองอบแห้งใบเตยด้วยพลังงานความร้อนร่วมระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์ (solar) และลมร้อน พบว่า มีแนวโน้มของการลดลงของความชื้นเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกันกับการอบแห้งใบเตยด้วยลมร้อน รังสีอินฟราเรด และคลื่นไมโครเวฟ



ภาพประกอบที่ 4.2 อัตราส่วนความชื้นของใบเตยอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อน ในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 45-65°C ความชื้นเริ่มต้น 464-525% dry-basis ความชื้นสุดท้าย 10-12 % dry-basis ความเร็วลมเฉลี่ย 1.1 m/s

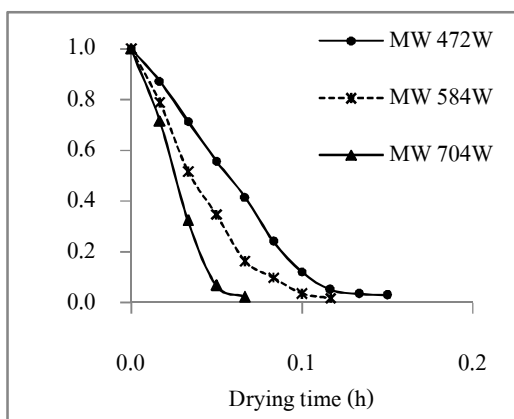
ภาพประกอบที่ 4.2 เป็นผลการอบแห้งใบเตยด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิอบแห้ง 45.6, 56.3 และ 65.0°C ใช้ระยะเวลาอบแห้งเท่ากับ 3.17, 2.67 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว คิดเป็น 58.66%, 60.98% และ 70.73% ตามลำดับ แต่การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมนี้ยังคงใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิใกล้เคียงกัน

การอบแห้งใบเตยด้วยพลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์ ถือว่าพลังงานแสงอาทิตย์นั้นเป็นพลังงานที่ได้เปล่า และสะอาด แต่ข้อเสียของพลังงานแสงอาทิตย์ คือ ไม่สามารถอบแห้งได้ต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน เนื่องจากปริมาณแสงแดดที่ไม่สม่ำเสมอ หรือในช่วง

ฤดูฝน ทำให้ไม่สามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้ ดังนั้นการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมจากพลังงานแสงอาทิตย์จึงควรคำนึงถึงสภาพอากาศในแต่ละวัน เช่น ฝน แสงแดด ลม เป็นต้น

#### 4.2.1.2 การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ภาพประกอบที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งใบเตยที่กำลังของไมโครเวฟ 472, 584 และ 704 W พบว่า กำลังของไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้น จะใช้ระยะเวลาอบแห้งลดลง ซึ่งใช้ระยะเวลาอบแห้งเท่ากับ 0.15, 0.12 และ 0.05 ชั่วโมง ทั้งนี้การเพิ่มกำลังของไมโครเวฟจะเป็นการเพิ่มการถ่ายโอนของความชื้นภายในวัสดุ ทำให้น้ำที่อยู่ภายในเนื้อวัสดุจึงถูกถ่ายเทไปยังกับอากาศแวดล้อมเร็วขึ้น อัตราการอบแห้งก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

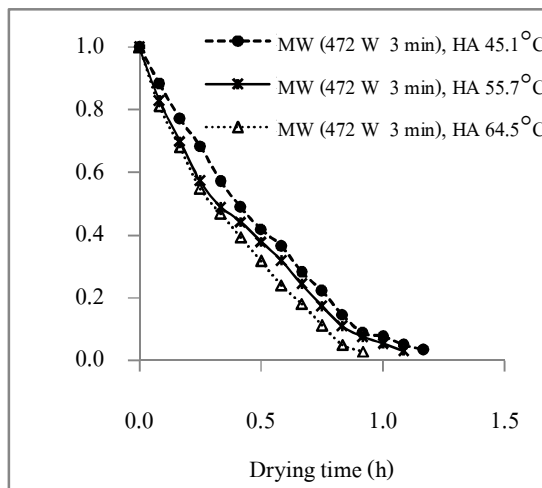


ภาพประกอบที่ 4.3 อัตราส่วนความชื้นของใบเตยอบแห้งด้วยกำลังของไมโครเวฟ 472 584 และ 704 W ความชื้นเริ่มต้น 394-426% dry-basis ความชื้นสุดท้าย 8-12% dry-basis

#### 4.2.1.3 การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน/ ริงฮีอินฟราเรดแบบสองขั้นตอน

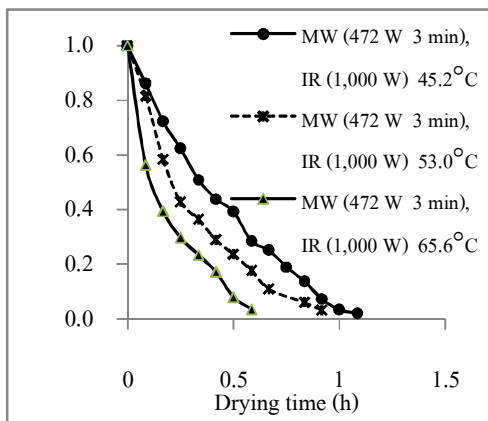
จากการศึกษาในส่วนของ การอบแห้งใบเตยด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกอบแห้งด้วยกำลังของไมโครเวฟ และตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนหรือริงฮีอินฟราเรดในขั้นตอนที่สอง สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนในขั้นตอนที่สอง กำหนดให้อุณหภูมิลมร้อนคงที่ตลอดการทดลอง และสำหรับการอบแห้งด้วยริงฮีอินฟราเรดในขั้นตอนที่สองที่กำลังของอินฟราเรดหนึ่ง ๆ และควบคุมอุณหภูมิคงที่ตลอดการทดลองเช่นกัน

ภาพประกอบที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งใบเตยด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกทำการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 472 W เป็นเวลา 3 นาที และขั้นตอนที่สองนำไปอบแห้งด้วยลมร้อน อุณหภูมิอบแห้ง 45.1, 55.7 และ 64.5°C จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 1.17, 1.08 และ 0.92 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่า เมื่ออุณหภูมิลมร้อนในขั้นตอนที่สองเพิ่มขึ้น จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง



ภาพประกอบที่ 4.4 อัตราส่วนความชื้นของใบเตยอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสองขั้นตอน ในขั้นตอนแรกอบแห้งกำลังของไมโครเวฟ 472 W (3 นาที) ร่วมกับลมร้อนในขั้นตอนที่สอง ช่วงอุณหภูมิลมร้อน 45-65°C ความชื้นเริ่มต้น 394-426% dry-basis ความชื้นสุดท้าย 8-12% dry-basis ความเร็วลมเฉลี่ย 1.1 m/s

ภาพประกอบที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งใบเตยด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับรังสีอินฟราเรดแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกทำการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 472 W เป็นเวลา 3 นาที และขั้นตอนที่สองนำไปอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด กำลังของอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิอบแห้ง 45.2, 53.0 และ 65.6°C จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 1.08, 0.92 และ 0.58 ชั่วโมง ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดในขั้นตอนที่สอง สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิอบแห้งใกล้เคียงกัน

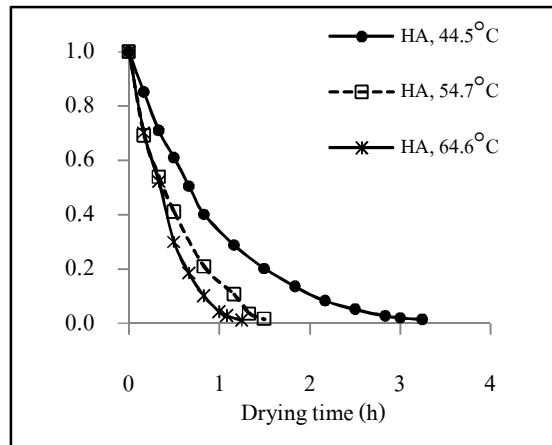


ภาพประกอบที่ 4.5 อัตราส่วนความชื้นของใบเตยอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับรังสีอินฟราเรดแบบสองขั้นตอน ในขั้นตอนแรกอบแห้งกำลังของไมโครเวฟ 472 W (3 นาที) ร่วมกับรังสีอินฟราเรดในขั้นตอนที่สองกำลังของอินฟราเรด 1,000 W ช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 45-66°C ความชื้นเริ่มต้น 394-426% dry-basis ความชื้นสุดท้าย 8-12% % dry-basis

จากผลการทดลองอบแห้งแบบสองขั้นตอนดังกล่าว พบว่า การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟในขั้นตอนแรกเป็นการช่วยกระตุ้นให้น้ำภายในวัสดุถ่ายเทมายังผิววัสดุและอากาศแวดล้อม และเมื่ออบแห้งในขั้นตอนที่สองด้วยลมร้อน ทำให้น้ำที่เหลือถ่ายเทมายังอากาศแวดล้อมได้เร็วขึ้น จึงใช้เวลาอบแห้งสั้นลง และหากเปลี่ยนแหล่งพลังงานในขั้นตอนที่สองมาเป็นรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000 W พบว่า ที่อุณหภูมิอบแห้งใกล้เคียงกันจะใช้เวลาอบแห้งน้อยกว่าใช้ลมร้อน เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟและรังสีอินฟราเรดเป็นการแผ่รังสีความร้อนทั้งคู่ จึงเป็นการเพิ่มการถ่ายเทความชื้น ทำให้น้ำในวัสดุถ่ายเทมายังอากาศแวดล้อมได้ดีขึ้น แต่ทั้งสองวิธียังคงใช้เวลาในการอบแห้งมากกว่าการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว

#### 4.2.1.4 การอบแห้งด้วยลมร้อน

จากการทดลองอบแห้งใบเตยด้วยลมร้อน ด้วยเครื่องอบแห้งแบบพลังงานความร้อนร่วม อุณหภูมิที่ช่วง 44-65°C เปรียบเทียบกับใบเตยที่อบแห้งโดยใช้แหล่งพลังงานธรรมชาติคือ พลังงานแสงอาทิตย์ (solar) โดยความชื้นมีแนวโน้มลดลงที่เวลาใด ๆ แสดงดังภาพประกอบที่

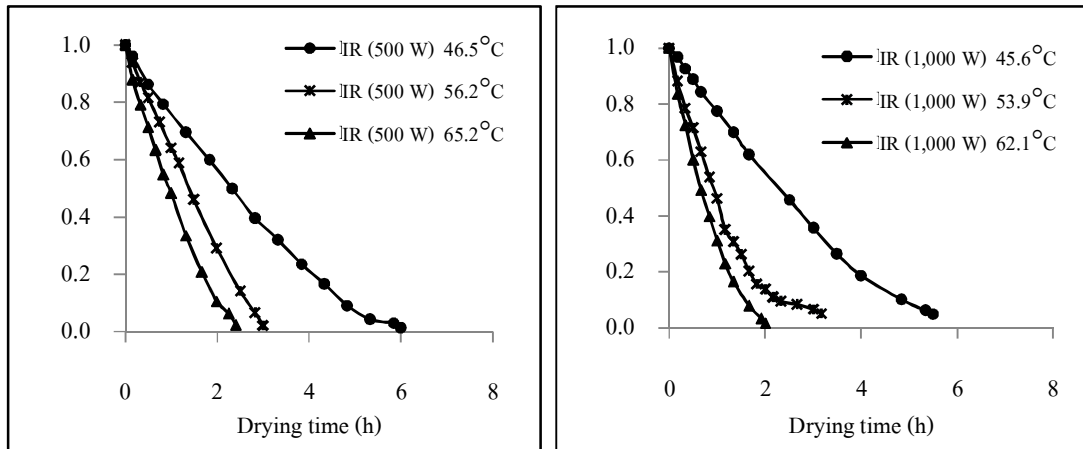


**ภาพประกอบที่ 4.6** อัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งใบเตยด้วยลมร้อน โดยอุณหภูมิอบแห้ง 44-65°C ความชื้นเริ่มต้น 485-626 % dry-basis ความชื้นสุดท้าย 10-12 % dry-basis ความเร็วลมเฉลี่ย 1.1 m/s การวนกลับของอากาศ 95%

จากผลการทดลองอบแห้งใบเตยด้วยลมร้อน พบว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งและระยะเวลาอบแห้งสูงขึ้น ความชื้นของใบเตยมีแนวโน้มลดลง จากภาพประกอบที่ 4.6 ใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ 44.5, 54.7 และ 64.6°C ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นดังนี้ 3.25, 1.5 และ 1.25 ชั่วโมง ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับใบเตยอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (solar) พบว่า ใบเตยที่อบแห้งด้วยลมร้อนใช้เวลาสั้นกว่าคิดเป็น 52.44%, 78.05% และ 81.71% ตามลำดับ โดยใบเตยอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ใช้ระยะเวลาอบแห้งรวม 6.83 ชั่วโมง

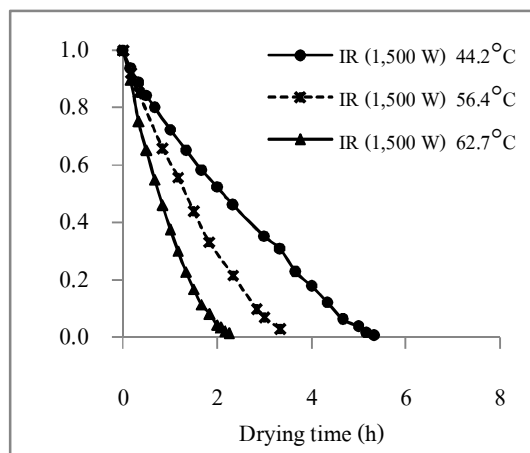
#### 4.2.1.5 การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

ภาพประกอบที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งใบเตยด้วยกำลังของอินฟราเรดเท่ากับ 500, 1,000 และ 1,500 W ตามลำดับ จากการทดลองอบแห้งด้วยกำลังของอินฟราเรด 500 W ในช่วงอุณหภูมิ 46-65°C จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 6, 3 และ 2.42 ชั่วโมง ตามลำดับ สำหรับใบเตยอบแห้งด้วยกำลังของอินฟราเรด 1,000 W ในช่วงอุณหภูมิ 45-62°C จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 5.50, 3.33 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ และสำหรับใบเตยอบแห้งด้วยกำลังของอินฟราเรด 1,500 W ในช่วงอุณหภูมิ 44-63°C จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 5.33, 3.17 และ 2.25 ชั่วโมง ตามลำดับ



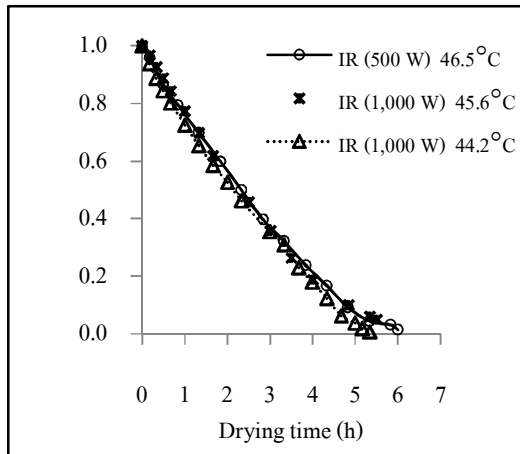
(ก) IR (500 W)

(ข) IR (1,000 W)

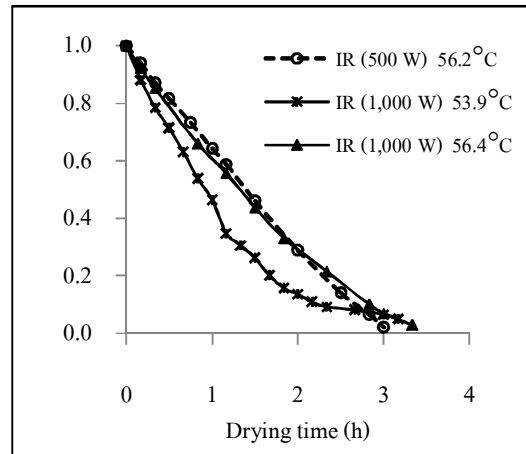


(ค) IR (1,500 W)

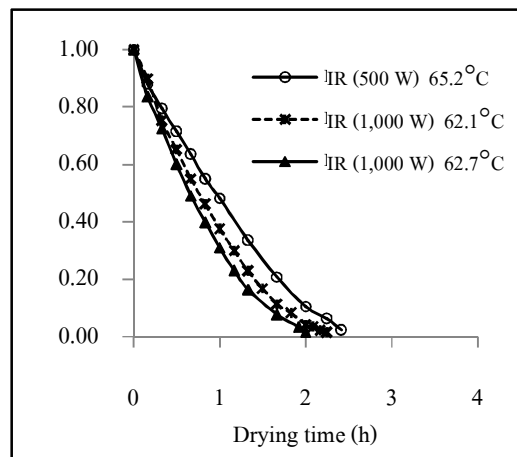
ภาพประกอบที่ 4.7 อัตราส่วนความชื้นของใบเตยด้วยกำลังของอินฟราเรด 500 W (ก) 1,000 W (ข) และ 1,500 W (ค) ช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 44-65°C ความชื้นเริ่มต้น 383-597% dry-basis ความชื้นสุดท้าย 8-12 % dry-basis



(ก)



(ข)



(ค)

**ภาพประกอบที่ 4.8** อัตราส่วนความชื้นของใบเตยอบแห้งด้วยกำลังของอินฟราเรด 500, 1,000 และ 1,500 W โดยเปรียบเทียบที่อุณหภูมิอบแห้งใกล้เคียงกันที่ 44-46°C (ก) 53-56°C (ข) และ 62-65°C (ค) ตามลำดับ

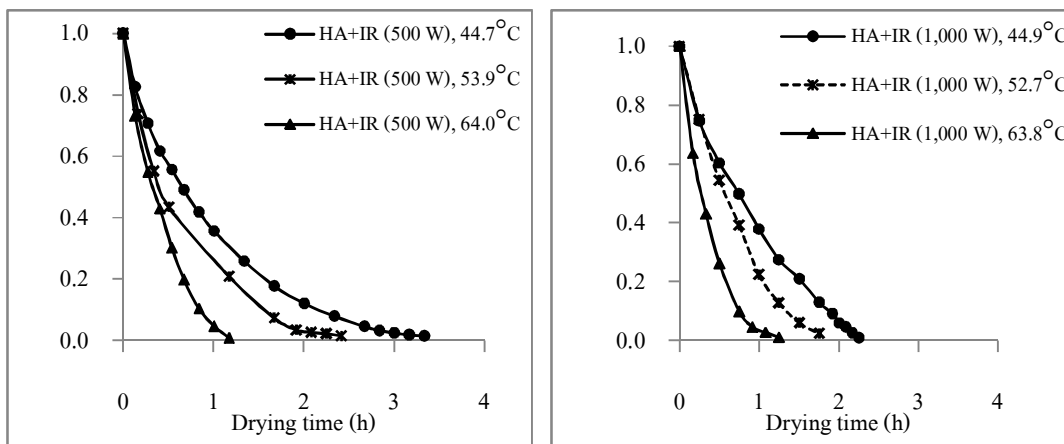
จากการทดลองจะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นที่กำลังของอินฟราเรดค่าหนึ่งจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิระหว่างแหล่งพลังงานและวัสดุมีค่าเพิ่มมากขึ้น อัตราการถ่ายโอนความชื้นยิ่งสูงมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิอบแห้งใกล้เคียงกัน แสดงดังภาพประกอบที่ 4.8 ใบเตยอบแห้งด้วยกำลังของอินฟราเรด 1,500 W จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่กำลังของอินฟราเรด 1,000



และ 500 W ตามลำดับ โดยสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อกำลังของอินฟราเรดเพิ่มขึ้นจะเป็นการเพิ่มพลังงานของหน่วยพื้นที่มากขึ้น ส่งผลต่ออัตราการถ่ายโอนพลังงานความร้อนและถ่ายโอนมวลของความชื้นเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น เมื่อกำลังของอินฟราเรดเพิ่มขึ้น

#### 4.2.1.6 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

ภาพประกอบที่ 4.9 เป็นผลการทดลองอบแห้งใบเตยด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 500 W (ก) และ 1,000 W (ข) พบว่า ที่กำลังของอินฟราเรดหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้นจะใช้เวลาในการอบแห้งลดลง ซึ่งการอบแห้งที่กำลังของอินฟราเรด 500 W ร่วมกับลมร้อน อุณหภูมิ 44.7, 53.9 และ 64 °C ใช้ระยะเวลาอบแห้ง 3.33, 2.42 และ 1.17 ชั่วโมง ตามลำดับ และที่ กำลังของอินฟราเรด 1,000 W ร่วมกับลมร้อน อุณหภูมิ 44.9, 52.7 และ 63.8 °C ใช้ระยะเวลาอบแห้ง 2.25, 1.75 และ 1.25 ชั่วโมง ตามลำดับ



(ก)

(ข)

ภาพประกอบที่ 4.9 อัตราส่วนความชื้นของใบเตยอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 44-64°C กำลังของรังสีอินฟราเรด 500 W (ก) และ 1,000 W (ข) ความชื้นเริ่มต้น 439-603% dry-basis ความชื้นสุดท้าย 8-12% dry-basis ความเร็วลมเฉลี่ย 1.1 m/s การวนกลับของอากาศ 95%

จากภาพประกอบที่ 4.6, 4.7 และ 4.9 พบว่า สาเหตุที่การอบแห้งใบเตยด้วยพลังงานความร้อนร่วมของลมร้อนกับรังสีอินฟราเรดใช้ระยะเวลาสั้นกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว ตามลำดับ เพราะขณะทำการอบแห้งเกิดการถ่ายเทความร้อนทั้ง

การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนไปยังวัสดุพร้อม ๆ กัน ส่งผลให้น้ำภายในวัสดุได้รับพลังงานจากลมร้อนที่ผิวสัมผัสและการแผ่รังสีความร้อนไปยังภายในวัสดุได้โดยตรง ทำให้น้ำที่อยู่ภายในเนื้อวัสดุถูกถ่ายเทไปยังอากาศแวดล้อมเร็วกว่าการอบแห้งด้วยอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะมีแต่การแผ่รังสีความร้อนไปยังวัสดุเพียงอย่างเดียว ในทำนองเดียวกันการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว การถ่ายเทน้ำจะเริ่มจากการกระตุ้นที่ผิววัสดุไปยังอากาศแวดล้อมก่อน

#### 4.2.2 สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

##### 4.2.2.1 สมการเอมพิริคัล

จากการทดลองอบแห้งใบเตย ความชื้นเริ่มต้นของใบเตยอยู่ในช่วง 400-600% dry-basis โดยใช้ลมร้อนอุณหภูมิในช่วง 45-65°C ความเร็วลมเฉลี่ย 1.1 m/s ใช้รังสีอินฟราเรดที่ กำลังของอินฟราเรด 500 1,000 และ 1,500 W และคลื่นไมโครเวฟในช่วงกำลัง 400-700 W เมื่อนำข้อมูลการอบแห้งมาคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยได้เปรียบเทียบผลการทดลองกับสมการทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล 6 สมการ โดยมีรูปแบบสมการดังสมการที่ (4.1) – (4.6)

$$\text{Newton model} \quad MR = \exp(-kt) \quad (4.1)$$

$$\text{Page model} \quad MR = \exp(-kt^n) \quad (4.2)$$

$$\text{Henderson and Pabis model} \quad MR = a \exp(-kt) \quad (4.3)$$

$$\text{Logarithmic model} \quad MR = a \exp(-kt) + c \quad (4.4)$$

$$\text{Two term model} \quad MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t) \quad (4.5)$$

$$\text{Logistic model} \quad MR = \frac{a}{1 + \exp(kt)} \quad (4.6)$$

เมื่อ  $a, b, c, k, n$  คือ ค่าคงตัว  
 $t$  คือ เวลา, h

รูปแบบสมการที่อธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุดจะพิจารณาค่า  $R^2$  ที่สูงสุด และ ค่า RMSE ที่ต่ำสุด เมื่อนำค่าคงตัวของสมการดังกล่าวแทนกลับในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงดังตาราง 4.2 แล้วนำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลจากแบบจำลองได้ผลดังภาพประกอบที่ 4.10 – 4.16

ตารางที่ 4.2 รูปแบบสมการเอมพิริคัลและค่าคงตัวของไบเดยอบแห้งที่สภาวะการต่าง ๆ

Name of model	Parameter	R <sup>2</sup>	RMSE	$\chi^2$
Solar + HA				
Newton	$k = -13.375 + 0.045T$	0.9944	0.0242	0.0006
Page	$k = -12.774 + 0.043T$ $n = 0.976$	0.9946	0.0238	0.0006
Henderson and Pabis	$k = -13.479 + 0.045T$ $a = 0.999$	0.9944	0.0242	0.0006
Logarithmic	$k = -13.646 + 0.046T$ $a = 1.317$ $c = 0.011$	0.9932	0.0238	0.0006
<u>Two term</u>	$k_1 = 0.090 + 0.004T$ $k_2 = -5.822 + 0.0219T$ $a = -1.487$ $b = 2.478$	0.9950	0.0229	0.0006
Logistic	$k = -19.229 + 0.062T$ $a = 1.047$	0.9314	0.0848	0.0079
MW				
Newton	$k = 0.037P$	0.9379	0.0877	0.0085
Page	$k = 0.108P$ $n = 1.358$	0.9538	0.0757	0.0063
Henderson and Pabis	$k = 0.039P$ $a = 1.063$	0.9437	0.0836	0.0077
<u>Logarithmic</u>	$k = 0.027P$ $a = 1.249$ $c = -0.339$	0.9932	0.0478	0.0025
Two term	$k_1 = 0.039P$ $k_2 = 0.039P$ $a = 0.531$ $b = 0.531$	0.9437	0.0836	0.0077
Logistic	$k = 0.006P$ $a = 1.018$	0.8189	0.1498	0.0247

หมายเหตุ : “\_\_\_\_\_” หมายถึง แบบจำลองที่เลือกใช้; T คือ อุณหภูมิอบแห้ง (K); P คือ กำลังของไมโครเวฟ (W)

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) รูปแบบสมการอิมพีริคัลและค่าคงตัวของไบโเดยอบแห้งที่สภาวะการต่าง ๆ

Name of model	Parameter	R <sup>2</sup>	RMSE	χ <sup>2</sup>
MW (472 W 3 min) + HA				
Newton	$k=-7.282+0.029T$	0.9792	0.0432	0.0020
Page	$k=1.104+0.004T$ $n=1.170$	0.9783	0.0441	0.0021
Henderson and Pabis	$k=-7.577+0.030T$ $a=1.034$	0.9809	0.0414	0.0018
<u>Logarithmic</u>	$k=-2.023+0.010T$ $a=1.317$ $c=-0.339$	0.9932	0.0242	0.0006
Two term	$k_1=0.093+0.007T$ $k_2=0.093+0.007T$ $a=0.516$ $b=0.516$	0.9739	0.0484	0.0025
Logistic	$k=-3.347+0.015T$ $a=1.083$	0.8957	0.0969	0.0101
MW (472 W 3 min) + IR				
Newton	$k=-42.114+0.139T$	0.9839	0.0381	0.0016
Page	$k=-12.254+0.046T$ $n=0.872$	0.948	0.0685	0.0051
Henderson and Pabis	$k=-42.703+0.141T$ $a=1.011$	0.9841	0.0379	0.0016
<u>Logarithmic</u>	$k=-36.055+0.119T$ $a=1.050$ $c=-0.053$	0.9875	0.0359	0.0014
Two term	$k_1=1.145+1.614T$ $k_2=-10.120+0.039T$ $a=0.059$ $b=0.941$	0.9372	0.0752	0.0062
Logistic	$k=-18.502+0.063T$ $a=1.065$	0.9204	0.0847	0.0079

หมายเหตุ : “\_\_\_\_\_” หมายถึง แบบจำลองที่เลือกใช้ ; T คือ อุณหภูมิอบแห้ง (K)

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) รูปแบบสมการเอมพิริคัลและค่าคงตัวของไบเดยอบแห้งที่สภาวะการต่าง ๆ

Name of model	Parameter	R <sup>2</sup>	RMSE	χ <sup>2</sup>
HA				
Newton	$k=-21.951+0.073T$	0.9922	0.0289	0.0009
Page	$k=-24.516+0.081T$	0.9945	0.0242	0.0006
	$n=1.103$			
Henderson and Pabis	$k=-22.175+0.073T$	0.9924	0.0284	0.0008
	$a=1.014$			
<u>Logarithmic</u>	$k=-19.086+0.063T$	0.9955	0.0216	0.0005
	$a=1.055 \quad c=-0.057$			
Two term	$k_1=-38.111+0.125T$	0.9950	0.0232	0.0006
	$k_2=-24.152+0.112T$			
	$a=-5.089 \quad b=6.081$			
Logistic	$k=-13.577+0.045T$	0.9157	0.0948	0.0096
	$a=1.057$			
IR (500 W)				
Newton	$k=-8.2445+0.027T$	0.9572	0.0693	0.0052
Page	$k=-0.032+0.002T$	0.9945	0.1173	0.0149
	$n=1.128$			
Henderson and Pabis	$k=-9.309+0.030T$	0.9640	0.0623	0.0042
	$a=1.077$			
<u>Logarithmic</u>	$k=-3.685+0.012T$	0.9964	0.0181	0.0004
	$a=1.685 \quad c=-0.675$			
Two term	$k_1=-18.965+0.062T$	0.9879	0.0369	0.0015
	$k_2=-15.173+0.049T$			
	$a=-3.679 \quad b=4.637$			
Logistic	$k=-19.642+0.060T$	0.8643	0.1225	0.0162
	$a=1.093$			

หมายเหตุ : “\_\_\_” หมายถึง แบบจำลองที่เลือกใช้ ; T คือ อุณหภูมิอบแห้ง (K)

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) รูปแบบสมการเอมพิริคัลและค่าคงตัวของไบเดยอบแห้งที่สภาวะการต่าง ๆ

Name of model	Parameter	$R^2$	RMSE	$\chi^2$
IR (1,000 W)				
Newton	$k=-15.126+0.049T$	0.9665	0.0616	0.0041
Page	$k=-15.334+0.049T$ $n=1.263$	0.9816	0.0456	0.0023
Henderson and Pabis	$k=-15.041+0.048T$ $a=1.059$	0.9640	0.0556	0.0034
<u>Logarithmic</u>	$k=-8.690+0.028T$ $a=1.315$ $c=-0.299$	0.9863	0.0386	0.0016
Two term	$k_1=-2.998+0.001T$ $k_2=-11.299+0.036T$ $a=-0.396$ $b=1.445$	0.9772	0.0502	0.0027
Logistic	$k=-19.534+0.060T$ $a=1.085$	0.8925	0.1095	0.0130
IR (1,500 W)				
Newton	$k=-12.506+0.041T$	0.9724	0.0545	0.0031
Page	$k=-12.873+0.042T$ $n=1.273$	0.9903	0.0307	0.0010
Henderson and Pabis	$k=-13.088+0.043T$ $a=1.060$	0.9764	0.0504	0.0027
<u>Logarithmic</u>	$k=-7.971+0.026T$ $a=1.220$ $c=-0.205$	0.9904	0.0257	0.0007
Two term	$k_1=-11.586+0.034T$ $k_2=-13.781+0.044T$ $a=-0.004$ $b=1.035$	0.9875	0.0374	0.0015
Logistic	$k=0.680-0.001T$ $a=1.103$	0.7874	0.1501	0.0239

หมายเหตุ : “\_\_\_\_\_” หมายถึง แบบจำลองที่เลือกใช้ ; T คือ อุณหภูมิอบแห้ง (K)

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) รูปแบบสมการเอมพิริคัลและค่าคงตัวของไบเดยอบแห้งที่สภาวะการต่าง ๆ

Name of model	Parameter	R <sup>2</sup>	RMSE	χ <sup>2</sup>
HA+IR (500 W)				
Newton	$k = -19.787 + 0.066T$	0.9943	0.0215	0.0005
Page	$k = -19.309 + 0.064T$ $n = 0.982$	0.9944	0.0215	0.0005
Henderson and Pabis	$k = -19.557 + 0.065T$ $a = 0.987$	0.9945	0.0211	0.0004
Logarithmic	$k = -18.716 + 0.062T$ $a = 0.998$ $c = -0.018$	0.9950	0.0198	0.0004
<u>Two term</u>	$k_1 = -0.610 + 0.006T$ $k_2 = -2.637 + 0.012T$ $a = -6.454$ $b = 7.433$	0.9966	0.0161	0.0003
Logistic	$k = -18.862 + 0.062T$ $a = 1.048$	0.9234	0.0885	0.0085
HA+IR (1,000 W)				
Newton	$k = -22.571 + 0.074T$	0.9771	0.0484	0.0026
Page	$k = -0.035 + 0.005T$ $n = 0.935$	0.8939	0.1042	0.0121
Henderson and Pabis	$k = 0.724 + (1.59 \times 10^{-7} T)$ $a = 0.987$	0.9778	0.0477	0.0025
<u>Logarithmic</u>	$k = -17.856 + 0.059T$ $a = 1.121$ $c = -0.121$	0.9875	0.0349	0.0014
Two term	$k_1 = -25.195 + 0.083T$ $k_2 = -25.525 + 0.108T$ $a = 1.131$ $b = -0.135$	0.9807	0.0444	0.0022
Logistic	$k = -14.559 + 0.048T$ $a = 1.049$	0.8955	0.1035	0.0119

หมายเหตุ : “\_\_\_\_\_” หมายถึง แบบจำลองที่เลือกใช้ ; T คือ อุณหภูมิอบแห้ง (K)

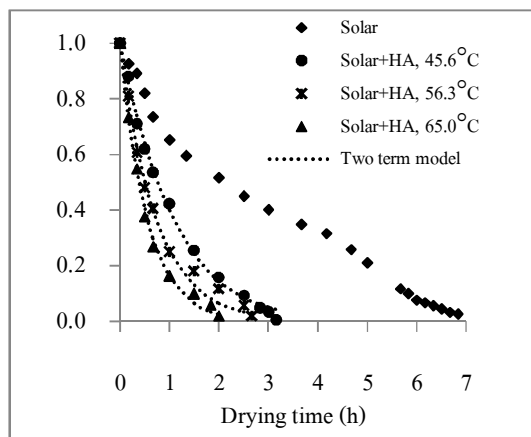
จากตารางที่ 4.2 สามารถหารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งได้ โดยพิจารณาค่า  $R^2$ , RMSE (Root mean square error) และค่า Chi-square ( $\chi^2$ ) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{Data}_{\text{experiment},i} - \text{Data}_{\text{predicted},i})^2}$$

$$\chi^2 = \frac{1}{N - n_1} \sum_{i=1}^N (\text{Data}_{\text{experiment},i} - \text{Data}_{\text{predicted},i})^2$$

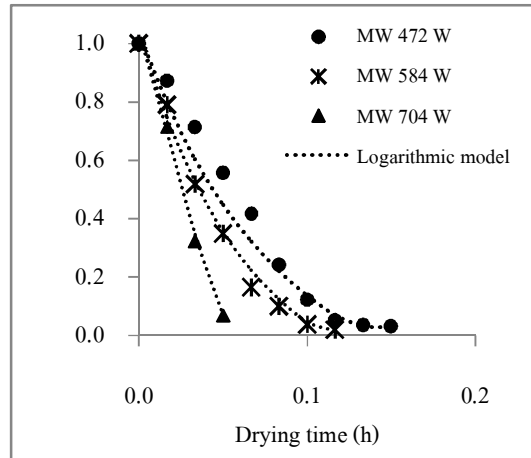
เมื่อ  $N$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด  
 $n_1$  คือ จำนวนพารามิเตอร์ในสมการ

จากตารางที่ 4.2 พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Logarithmic เหมาะสมที่จะนำมาทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบเตยด้วยลมร้อน รังสีอินฟราเรด (500 1,000 และ 1,500 W) คลื่นไมโครเวฟ (472, 584 และ 704 W) คลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน/รังสีอินฟราเรดแบบสองขั้นตอน และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ 1,000 W สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ Two term เหมาะสมที่จะนำมาทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบเตยด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อน และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ 500 W

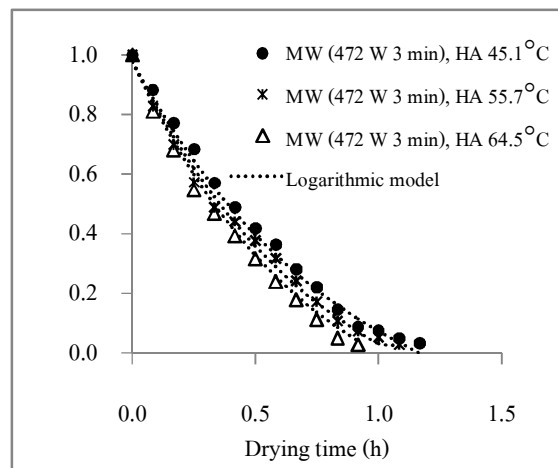


ภาพประกอบที่ 4.10 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ Two term ของใบเตยอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อน ช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 45-65°C

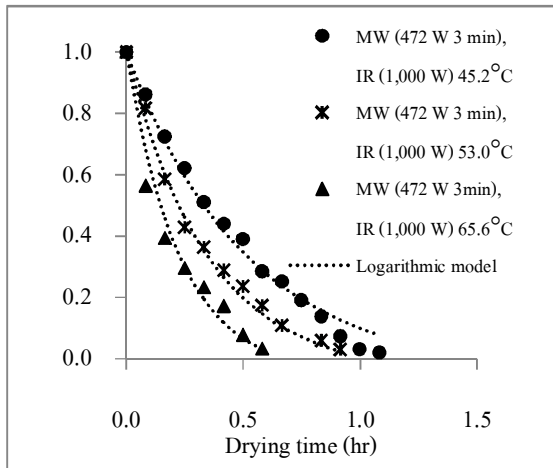




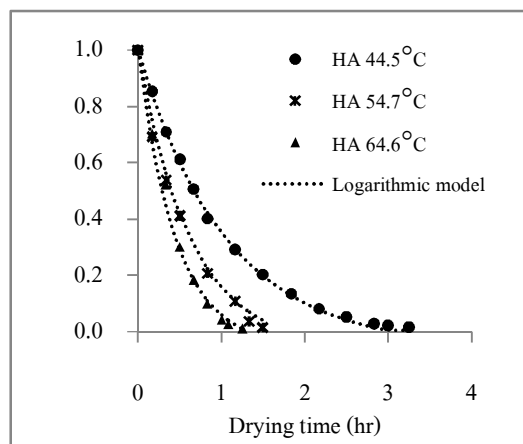
ภาพประกอบ 4.11 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ Logarithmic ของใบเตยอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟกำลังของไมโครเวฟในช่วง 472-702 W



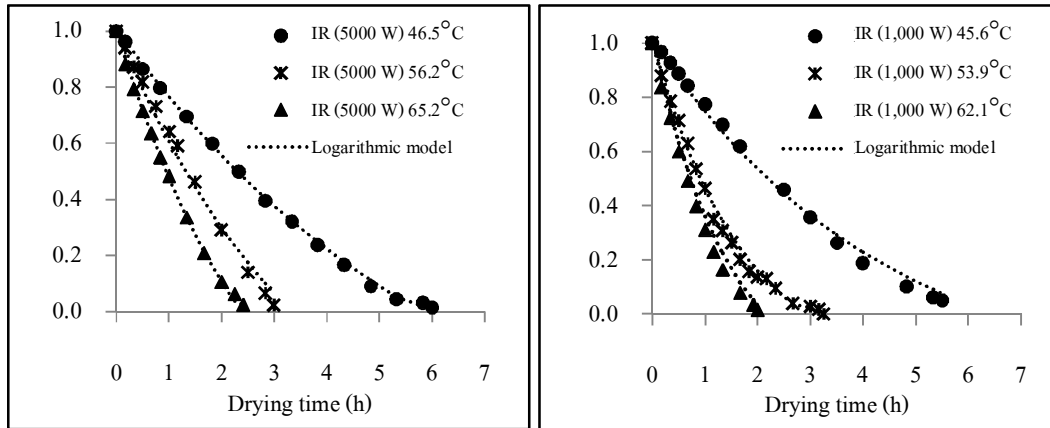
ภาพประกอบที่ 4.12 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ Logarithmic ของใบเตยอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (472 W) เป็นเวลา 3 นาที ร่วมกับลมร้อนแบบสองขั้นตอน ช่วงอุณหภูมิ 45-65°C



ภาพประกอบ 4.13 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ Logarithmic ของใบเตยอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (472 W) เป็นเวลา 3 นาที ร่วมกับรังสีอินฟราเรด (1,000 W) แบบสองขั้นตอน ช่วงอุณหภูมิ 45-66°C

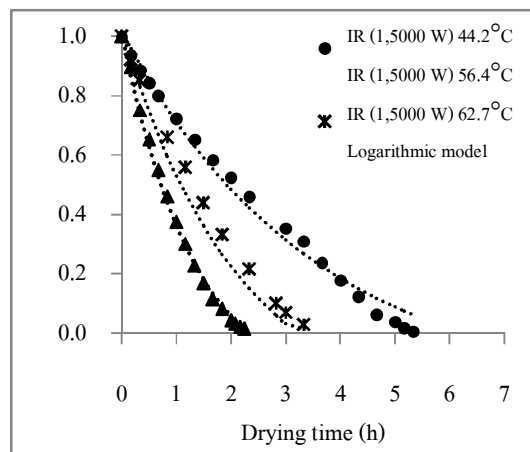


ภาพประกอบที่ 4.14 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ Logarithmic ของใบเตยอบแห้งด้วยลมร้อน ช่วงอุณหภูมิตั้ง 44-65°C



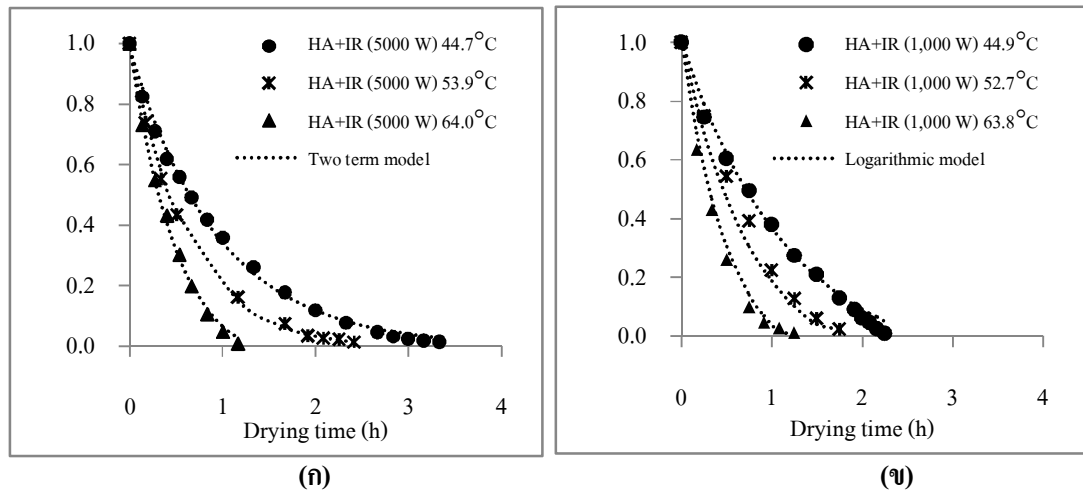
(ก)

(ข)



(ค)

ภาพประกอบที่ 4.15 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ Logarithmic ของใบเตยอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 500 W (ก) 1,000 W (ข) และ 1,500 W (ค) ช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 44-64°C



**ภาพประกอบที่ 4.16** อัตราส่วนความชื้นจากผลการทดลอง เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ Two term สำหรับใบเตยอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด 500 W (ก) และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ Logarithmic สำหรับของใบเตยอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด 1,000 W (ข) ช่วงอุณหภูมิ 44-64°C

#### 4.2.2.2 สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี

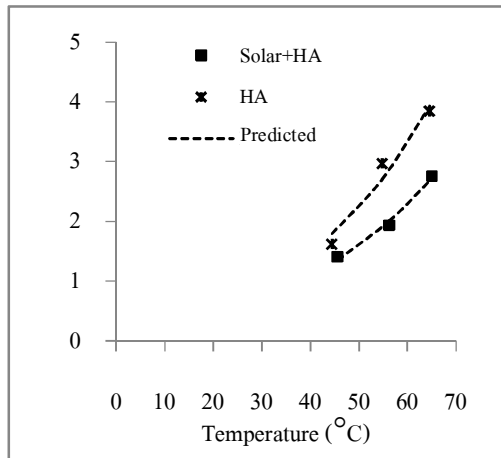
จากการทดลองอบแห้งใบเตย ความชื้นเริ่มต้นของใบเตยอยู่ในช่วง 400-600% dry-basis โดยใช้ลมร้อน อุณหภูมิอบแห้ง 45-65°C ความเร็วลมเฉลี่ย 1.1 m/s ใช้รังสีอินฟราเรดที่กำลังของอินฟราเรด 500-1500 W และความเข้มของคลื่นไมโครเวฟในช่วง 472-704 W จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของใบเตยภายหลังการอบแห้งทั้งแบบขั้นตอนเดียวและแบบสองขั้นตอน โดยพิจารณาให้ใบเตยมีรูปทรงแบนราบ ซึ่งใช้สมการที่ (2.12) ในการคำนวณใช้ค่าความหนาของใบเตยเท่ากับ 0.00026 เมตร โดยแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ด้วยสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3 และอยู่ในรูปแบบสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ดังสมการที่ (2.17)

$$D = D_0 \exp\left[-\frac{E_a}{R(T + 273.15)}\right] \quad (2.17)$$

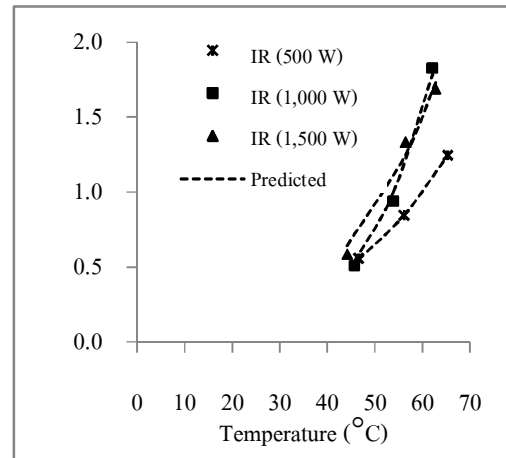
ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของการอบแห้งใบเตยที่สภาวะต่าง ๆ

Source	Drying temp. (°C)	Diffusivity constant, $D_0$ ( $m^2/s$ )	Activation energy, $E_a$ (kJ/kmol)	Diffusivity, $D$ ( $\times 10^{-12} m^2/s$ )	$R^2$	RMSE
Solar + HA	45.6-65.0	$2.73 \times 10^{-7}$	34,787.40	1.35-2.72	0.9912	0.0524
MW (472 W 3min), HA (2 stage)	45.1-64.5	$2.50 \times 10^{-10}$	31,744.79	2.95-3.81	0.9901	0.0105
MW (472W 3 min), IR (1,000 W) (2 stage)	45.2-65.6	$5.47 \times 10^{-6}$	37,867.62	3.34-7.91	0.9996	0.0303
HA	44.5-64.6	$9.42 \times 10^{-7}$	39,436.58	1.79-3.96	0.9565	0.1910
IR (500 W)	46.5-65.2	$1.52 \times 10^{-6}$	44,849.35	0.55-1.24	0.9998	0.0043
IR (1,000 W)	45.6-62.1	$2.27 \times 10^{-2}$	47,605.62	0.54-1.79	0.9938	0.0431
IR (1,500 W)	44.2-62.7	$4.38 \times 10^{-5}$	36,347.86	0.64-1.73	0.9817	0.0621
HA+IR (500 W)	44.7-64.0	$1.58 \times 10^{-6}$	36,347.86	1.68-3.69	0.9942	0.0639
HA+IR (1,000 W)	44.9-63.8	$1.76 \times 10^{-12}$	31,809.05	1.57-4.30	0.9785	0.1661

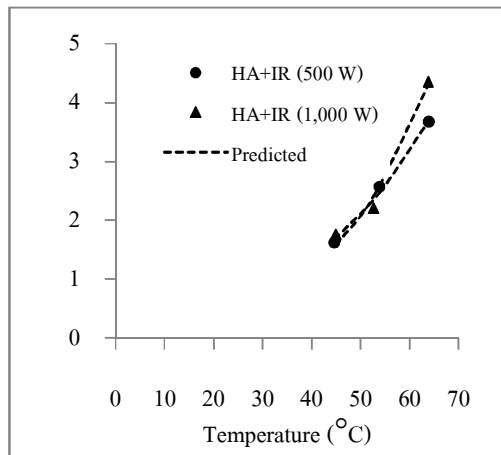
จากตารางที่ 4.3 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นขึ้นกับอุณหภูมิอบแห้ง ดังภาพประกอบที่ 4.17 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าสูงขึ้น ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ผ่านมา (สมชาติ, 2540; Tirawanichakul *et al.*, 2004; Tirawanichakul and Tirawanichakul, 2008) อธิบายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลทำให้ความดันไอกายในและภายนอกขึ้นวัสดุแตกต่างกันมากหรือเกิดเกรเดียนต์ของอุณหภูมิมากขึ้น ทำให้น้ำเคลื่อนที่จากภายในมาสู่ผิวภายนอกได้เร็วขึ้น



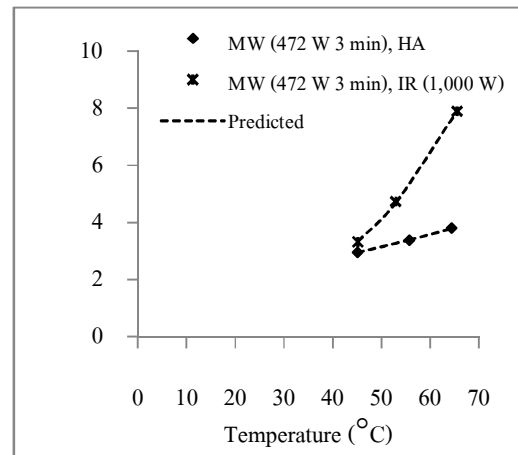
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

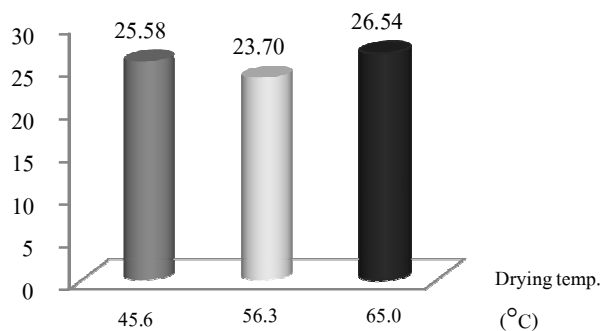
ภาพประกอบที่ 4.17 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนขึ้นประสิทธิภาพของการอบแห้งไปเตยที่อบแห้งด้วยลมร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อน (ก) รังสีอินฟราเรด (ข) ลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด (ค) และ คลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน/รังสีอินฟราเรดแบบสองขั้นตอน (ง)

### 4.3 ความสิ้นเปลืองของพลังงานจำเพาะในการอบแห้งใบเตย

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งคิดจากพลังงานไฟฟ้า สำหรับการเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งจะพิจารณาถึงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งใบเตยด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ และแสดงดังภาพประกอบที่ 4.17-4.20 และตารางที่ 4.4 ดังนี้

#### 4.3.1 การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อน

ภาพประกอบที่ 4.18 แสดงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อน โดยใช้อุณหภูมิลมร้อนในช่วง 45.6-65.0°C ความเร็วลมเฉลี่ย 1.1 m/s มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ในช่วง 23.70-26.54 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย พบว่า เมื่ออุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้น ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง ทั้งนี้อันเนื่องมาจาก ที่อุณหภูมิลมร้อนต่ำกว่าใช้เวลาในการอบแห้งมากกว่า

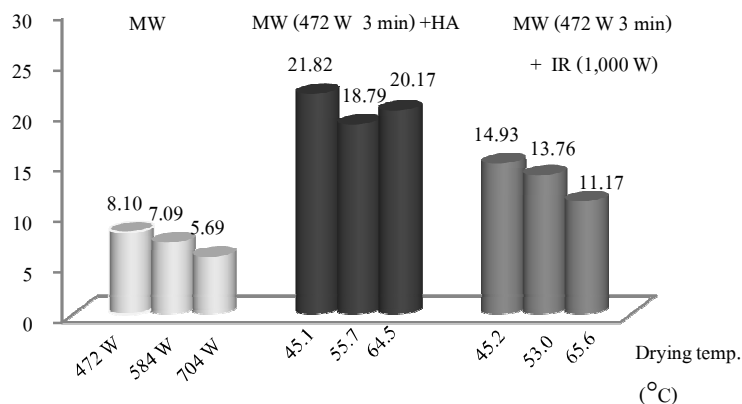


ภาพประกอบที่ 4.18 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งใบเตยด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อน อุณหภูมิลมร้อน 45.6-65.0°C

#### 4.3.2 การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ภาพประกอบที่ 4.19 แสดงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งใบเตยด้วยคลื่นไมโครเวฟ กำลังของไมโครเวฟ 472, 584 และ 704 W มีค่าอยู่ในช่วง 5.69-8.10 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย พบว่า เมื่อกำลังของไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงตามลำดับ

### 4.3.3 การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน/ รังสีอินฟราเรด แบบสอง ขั้นตอน



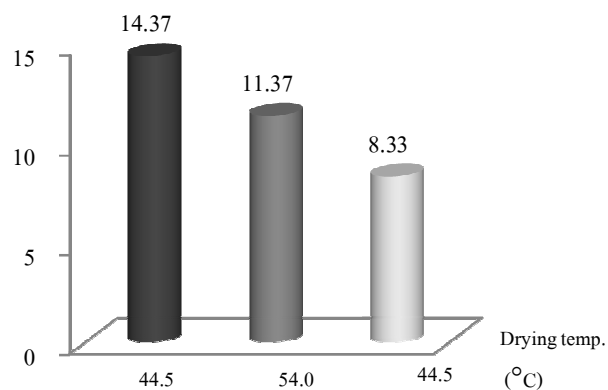
ภาพประกอบที่ 4.19 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งใบเตยด้วยคลื่นไมโครเวฟและคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน/ รังสีอินฟราเรด กำลังรังสีอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 44.5-64.6°C

จากภาพประกอบ 4.19 แสดงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน อุณหภูมิลมร้อนในช่วง 18.79-21.82°C มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ในช่วง 23.07-28.83 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย พบว่า อุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้น ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนสูงขึ้น และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ในช่วง 11.17-14.93 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย กลับพบว่า อุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่ม ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงอย่างชัดเจน

### 4.3.4 การอบแห้งด้วยลมร้อน

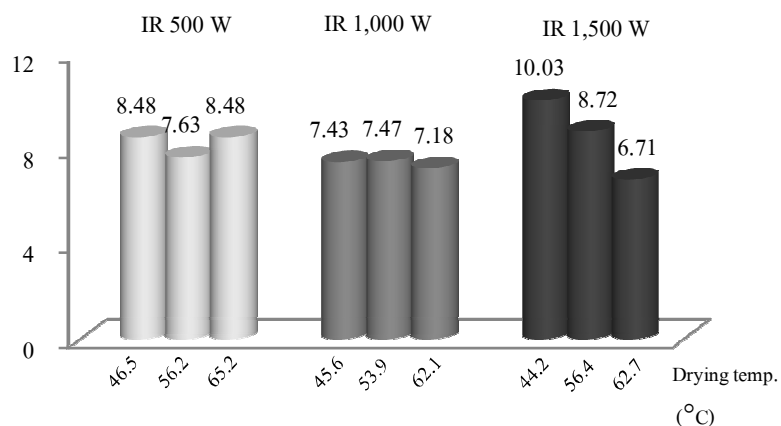
ภาพประกอบที่ 4.20 แสดงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งด้วยลมร้อน โดยใช้อุณหภูมิลมร้อนในช่วง 44.5-64.6°C ความเร็วลมเฉลี่ย 1.1 เมตรต่อวินาที มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ในช่วง 8.33-14.37 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย พบว่า เมื่ออุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้น ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง ทั้งนี้อันเนื่องมาจาก ที่อุณหภูมิลมร้อนต่ำกว่าใช้เวลาในการอบแห้งมากกว่า





ภาพประกอบที่ 4.20 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งใบเตยด้วยลมร้อน อุณหภูมิลมร้อน 44.5-64.6°C

#### 4.3.5 การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

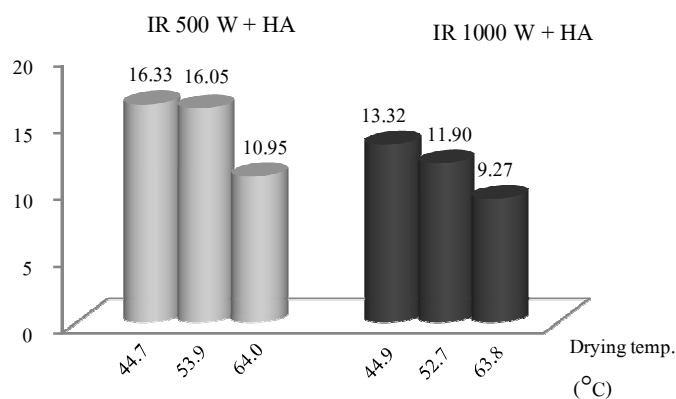


ภาพประกอบที่ 4.21 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 500, 1,000 และ 1,500 W

ภาพประกอบที่ 4.21 แสดงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งใบเตยด้วยกำลังของอินฟราเรด 500 W ในช่วงอุณหภูมิ 46.5-65.2°C มีค่าอยู่ในช่วง 7.63-8.46 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย สำหรับที่กำลังของอินฟราเรด 1,000 W ที่ช่วงอุณหภูมิ 45.6-62.1°C มีค่าอยู่ในช่วง 7.18-7.47 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย และสำหรับที่กำลังของอินฟราเรด 1,500 W ที่ช่วงอุณหภูมิ 44.2-62.7°C มีค่าอยู่ในช่วง 6.71-10.03 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม

ของน้ำที่ระเหย พบว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงตามลำดับ หากเปรียบเทียบค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งใบเตยทั้งสามกำลังของอินฟราเรดที่อุณหภูมิอบแห้งใกล้เคียงกัน พบว่า ที่กำลังอินฟราเรด 1500 W มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงกว่าที่กำลังของรังสีอินฟราเรด 500 และ 1,000 W ตามลำดับ ซึ่งพบว่า ที่กำลังอินฟราเรด 1,000 W ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยทั้งสามอุณหภูมิ

#### 4.3.6 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด



**ภาพประกอบที่ 4.22** ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งใบเตยด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด กำลังรังสีอินฟราเรด 500 และ 1,000 W อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 44.5-64.6°C

ภาพประกอบที่ 4.22 แสดงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 500 และ 1,000 W โดยใช้อุณหภูมิลมร้อนในช่วง 44.7-64.0°C ความเร็วลมเฉลี่ย 1.1 เมตรต่อวินาที โดยที่ กำลังรังสีอินฟราเรด 500 W มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ในช่วง 10.95-16.33 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย และที่ กำลังรังสีอินฟราเรด 1,000 W มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ในช่วง 9.27-13.32 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย จากทั้งสองแหล่งพลังงานดังกล่าว พบว่า เมื่ออุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้น ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจาก ที่อุณหภูมิลมร้อนต่ำกว่าใช้เวลาในการอบแห้งมากกว่า เมื่อพิจารณากำลังรังสีอินฟราเรดที่เพิ่มขึ้นของแหล่งพลังงานความร้อนร่วม พบว่า กำลังรังสีอินฟราเรดที่เพิ่มขึ้น ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.4 อัตราการอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

Source	Drying temp. (°C)	Drying time (h)	Drying rate (kg/h)		SEC (MJ/kg of water evap.)
			average	maximum	
Solar	32.5	6.83	0.0060	0.0186	-
Solar + HA	45.6	3.17	0.0307	0.0957	25.58
	56.3	2.67	0.0466	0.1779	23.70
	65.0	2.00	0.0453	0.1134	26.54
MW 472 W	-	0.15	0.1482	0.2874	8.10
MW 584 W	-	0.12	0.2177	0.4302	7.09
MW 704 W	-	0.05	0.3795	0.6096	5.69
MW (472 W 3 min), HA (2 stage)	45.1	1.17	0.0339	0.0572	21.82
	55.7	1.08	0.0339	0.0786	18.79
	64.5	0.92	0.0255	0.0545	20.17
MW (472 W 3 min), IR (1,000 W) (2 stage)	45.2	1.08	0.0254	0.0516	14.93
	53.0	0.92	0.0243	0.0489	13.76
	65.6	0.58	0.0234	0.0338	11.17
HA	44.5	3.25	0.0933	0.2269	14.37
	54.7	1.50	0.1759	0.4551	11.37
	64.6	1.25	0.2093	0.4943	8.33
IR (500 W)	46.5	6.00	0.0422	0.0729	10.17
	56.2	3.00	0.0863	0.1079	9.16
	65.2	2.42	0.1103	0.1869	10.17
IR (1,000 W)	45.6	5.50	0.0560	0.0766	8.91
	53.9	3.33	0.1310	0.1954	8.97
	62.1	2.00	0.1208	0.2318	8.61

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) อัตราการอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

Source	Drying temp. (°C)	Drying time (h)	Drying rate (kg/h)		SEC (MJ/kg of water evap.)
			average	maximum	
IR (1,500 W)	44.2	5.33	0.0482	0.0950	10.03
	56.4	3.17	0.0892	0.1402	8.72
	62.7	2.25	0.1103	0.2366	6.71
HA+IR (500 W)	44.7	3.33	0.0924	0.3368	16.33
	53.9	2.42	0.1215	0.4022	16.05
	64.0	1.17	0.2282	0.5140	10.95
HA+IR (1,000 W)	44.9	2.25	0.0766	0.1979	13.32
	52.7	1.75	0.1674	0.2985	11.90
	63.8	1.25	0.1918	0.5221	9.27

จากตารางที่ 4.4 แสดงอัตราการอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะพบว่า การอบแห้งใบเตยด้วยคลื่นไมโครเวฟมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าด้วยพลังงานความร้อนอื่น ๆ ทั้งนี้ เพราะใช้เวลาในการอบแห้งสั้น และส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำ ในขณะที่เดียวกันก็พบว่า การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มีอัตราการอบแห้งค่อนข้างต่ำ และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูง ทั้งนี้เนื่องจากการใช้เวลาอบแห้งมาก

#### 4.4 คุณภาพของใบเตยภายหลังอบแห้ง

ในการทดลองนี้ได้ทดสอบคุณภาพของกึ่งภายหลังการอบแห้งโดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี และทางด้านประสาทสัมผัส

##### 4.4.1 คุณภาพทางกายภาพ

###### 4.4.1.1 สี

การทดสอบคุณภาพสีของใบเตยหลังการอบแห้งด้วยเครื่องวัดสี Hunter Lab รุ่น JP7100 โดยวัดค่าสีของใบเตยแห้งในทอมของตัวแปร  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  จากเงื่อนไขและสภาวะการอบแห้งในแต่ละกรณี พบว่า กระบวนการอบแห้งแบบต่าง ๆ และเวลาที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อ

คุณภาพสีของใบเตย การเปลี่ยนแปลงค่าสีมีน้อย อย่างไรก็ตามตัวแปรอีกตัวแปรที่สามารถบ่งบอกการเปลี่ยนแปลงสีของใบเตย คือ  $a^*$  โดยที่ค่า  $a^*$  ที่ติดลบนั้นหมายถึงค่อนข้างเขียว

ตารางที่ 4.5 ค่าสีของใบเตยภายหลังการอบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ

Drying temp. (°C)	L*	a*	b*	$\Delta E$	$h^\circ$	C*
Fresh						
-	30.42 <sup>h</sup>	-10.84 <sup>k</sup>	21.22 <sup>ab</sup>	0 <sup>h</sup>	-1.10 <sup>a</sup>	23.83 <sup>ab</sup>
Solar						
	45.46 <sup>ab</sup>	-6.90 <sup>de</sup>	15.20 <sup>ijk</sup>	16.67 <sup>ab</sup>	-1.14 <sup>bcd</sup>	16.69 <sup>hi</sup>
HA						
44.5	33.37 <sup>efgh</sup>	-8.61 <sup>i</sup>	19.58 <sup>bcdefg</sup>	5.30 <sup>fg</sup>	-1.16 <sup>bcd</sup>	21.38 <sup>de</sup>
54.7	34.61 <sup>efgh</sup>	-9.99 <sup>jk</sup>	22.31 <sup>a</sup>	5.02 <sup>fg</sup>	-1.15 <sup>bcd</sup>	24.44 <sup>a</sup>
64.6	37.93 <sup>def</sup>	-10.38 <sup>jk</sup>	20.92 <sup>abcd</sup>	8.01 <sup>def</sup>	-1.11 <sup>a</sup>	23.36 <sup>abc</sup>
IR (500 W)						
46.5	37.10 <sup>defg</sup>	-6.92 <sup>de</sup>	19.59 <sup>bcdefg</sup>	8.35 <sup>def</sup>	-1.23 <sup>gh</sup>	20.78 <sup>ef</sup>
56.2	41.18 <sup>bcd</sup>	-8.28 <sup>hi</sup>	18.68 <sup>efg</sup>	11.96 <sup>bcd</sup>	-1.15 <sup>bcd</sup>	20.43 <sup>ef</sup>
65.2	47.63 <sup>a</sup>	-8.39 <sup>hi</sup>	19.69 <sup>bcdef</sup>	17.93 <sup>a</sup>	-1.17 <sup>bcde</sup>	21.41 <sup>de</sup>
IR (1,000 W)						
45.6	32.10 <sup>gh</sup>	-6.95 <sup>de</sup>	14.09 <sup>k</sup>	7.99 <sup>def</sup>	-1.11 <sup>a</sup>	15.71 <sup>i</sup>
53.9	35.25 <sup>efgh</sup>	-5.66 <sup>abc</sup>	14.67 <sup>jk</sup>	9.58 <sup>def</sup>	-1.20 <sup>efg</sup>	15.72 <sup>i</sup>
62.1	43.00 <sup>abc</sup>	-7.68 <sup>efgh</sup>	19.90 <sup>bcdef</sup>	13.48 <sup>bc</sup>	-1.20 <sup>efg</sup>	21.33 <sup>def</sup>
IR (1,500 W)						
44.2	34.74 <sup>efgh</sup>	-6.36 <sup>cd</sup>	19.25 <sup>defg</sup>	6.74 <sup>efg</sup>	-1.25 <sup>hi</sup>	20.28 <sup>ef</sup>
56.4	36.55 <sup>defg</sup>	-7.39 <sup>efg</sup>	15.83 <sup>ij</sup>	8.91 <sup>def</sup>	-1.13 <sup>ab</sup>	17.47 <sup>gh</sup>
62.7	44.37 <sup>ab</sup>	-7.87 <sup>ghi</sup>	18.56 <sup>fg</sup>	14.91 <sup>ab</sup>	-1.17 <sup>bcde</sup>	20.16 <sup>ef</sup>

หมายเหตุ : a-k คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยพิจารณาทุกสภาวะการทดลอง

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) ค่าสีของใบเตยภายหลังการอบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ

Drying temp. (°C)	L*	a*	b*	$\Delta E$	$h^\circ$	C*
HA+IR (500 W)						
44.7	30.41 <sup>h</sup>	-8.64 <sup>i</sup>	21.28 <sup>ab</sup>	2.51 <sup>gh</sup>	-1.18 <sup>cdef</sup>	22.97 <sup>abcd</sup>
53.9	37.69 <sup>def</sup>	-8.37 <sup>hi</sup>	21.05 <sup>abc</sup>	8.17 <sup>def</sup>	-1.19 <sup>defg</sup>	22.66 <sup>bcd</sup>
64.0	45.53 <sup>ab</sup>	-4.92 <sup>a</sup>	15.22 <sup>ijk</sup>	17.86 <sup>a</sup>	-1.26 <sup>hi</sup>	16.00 <sup>hi</sup>
HA+IR (1,000 W)						
44.9	38.58 <sup>cde</sup>	-6.97 <sup>de</sup>	16.60 <sup>hi</sup>	10.35 <sup>fg</sup>	-1.17 <sup>bcde</sup>	18.01 <sup>g</sup>
52.7	37.69 <sup>def</sup>	-8.37 <sup>hi</sup>	21.05 <sup>abc</sup>	8.17 <sup>def</sup>	-1.19 <sup>defg</sup>	22.66 <sup>bcd</sup>
63.8	45.54 <sup>ab</sup>	-4.92 <sup>a</sup>	15.22 <sup>ijk</sup>	17.87 <sup>a</sup>	-1.26 <sup>hi</sup>	16.00 <sup>hi</sup>
MW						
472 W	32.99 <sup>fgh</sup>	-5.36 <sup>ab</sup>	19.39 <sup>cdefg</sup>	6.46 <sup>efg</sup>	-1.30 <sup>jk</sup>	20.12 <sup>ef</sup>
584 W	34.00 <sup>efgh</sup>	-5.00 <sup>a</sup>	20.14 <sup>bcdef</sup>	7.24 <sup>ef</sup>	-1.33 <sup>k</sup>	20.75 <sup>ef</sup>
704 W	32.60 <sup>fgh</sup>	-5.84 <sup>bc</sup>	19.44 <sup>cdefg</sup>	5.98 <sup>efg</sup>	-1.28 <sup>ij</sup>	20.31 <sup>ef</sup>
MW (472 W 3 min), HA						
45.1	32.95 <sup>fgh</sup>	-7.06 <sup>def</sup>	19.38 <sup>cdefg</sup>	5.06 <sup>fg</sup>	-1.22 <sup>fgh</sup>	20.62 <sup>ef</sup>
55.7	35.43 <sup>efgh</sup>	-8.11 <sup>ghi</sup>	18.83 <sup>efg</sup>	6.50 <sup>efg</sup>	-1.16 <sup>bcde</sup>	20.50 <sup>ef</sup>
64.5	34.61 <sup>efgh</sup>	-7.90 <sup>ghi</sup>	17.92 <sup>gh</sup>	6.32 <sup>efg</sup>	-1.16 <sup>bcd</sup>	19.59 <sup>f</sup>
MW (472 W 3 min), IR (1,000 W)						
45.2	35.34 <sup>efgh</sup>	-7.81 <sup>fghi</sup>	20.37 <sup>bcde</sup>	6.34 <sup>efg</sup>	-1.20 <sup>efg</sup>	21.82 <sup>cde</sup>
53.0	35.98 <sup>efgh</sup>	-7.33 <sup>efg</sup>	19.07 <sup>efg</sup>	7.23 <sup>ef</sup>	-1.20 <sup>efg</sup>	20.45 <sup>ef</sup>
65.6	37.51 <sup>def</sup>	-8.37 <sup>hi</sup>	19.76 <sup>bcdef</sup>	8.06 <sup>def</sup>	-1.17 <sup>bcde</sup>	21.46 <sup>de</sup>

หมายเหตุ : a-k คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยพิจารณาทุกสภาวะการทดลอง

จากตาราง 4.4 แสดงค่าสีของใบเตยภายหลังอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ พบว่า อุณหภูมิอบแห้งที่สูงจะส่งผลให้ค่าความสว่าง (L\*) ของใบเตยอบแห้ง มีแนวโน้มสูง การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และร่วมกับลมร้อน มีแนวโน้มค่าความสว่าง (L\*) สูงกว่าการอบแห้งที่สภาวะ

อื่น ๆ สำหรับค่าสีเขียว (-a\*) ที่ทุกสภาวะมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับใบเตยสด โดยใบเตยที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน มีการเปลี่ยนแปลงของค่าสีเขียว (-a\*) น้อยที่สุด สำหรับค่าสีที่ปรากฏ (h°) พบว่า ในแต่ละสภาวะการทดลองค่า h° ไม่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับใบสด และค่าแสดงความบริสุทธิ์ของสี (C\*) พบว่า ใบเตยที่อบแห้งด้วยลมร้อน มีค่า C\* ค่อนข้างสูงและใกล้เคียงกับใบเตยสด

#### 4.4.1.2 คุณภาพด้านการหดตัว และการคืนตัว

จากตารางที่ 4.6 แสดงค่าร้อยละการหดตัวและการคืนตัว พิจารณาปัจจัยของอุณหภูมิเมื่ออบแห้งด้วยสภาวะเดียวกัน พบว่า อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 44.2-65.6°C ทำให้ค่าร้อยละการหดตัวของใบเตยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) พบว่า ร้อยละการหดตัวของใบเตยที่ผ่านการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อน มีแนวโน้มสูงกว่าสภาวะการอบแห้งอื่น ๆ สำหรับร้อยละการคืนตัว พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 3.71% - 5.64%

ตารางที่ 4.6 ร้อยละการหดตัว และคืนตัวของใบเตยอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ

Source	Drying temp. (°C)	%Shrinkage	%Rehydration
Solar	32.5	14.56±0.97 <sup>ab</sup>	4.38±0.05 <sup>cde</sup>
Solar+HA	45.6	13.71±0.61 <sup>abc</sup>	5.60±0.08 <sup>ab</sup>
	56.3	12.53±1.90 <sup>abcd</sup>	5.60±0.20 <sup>a</sup>
	65.0	10.72±0.89 <sup>bcdef</sup>	5.61±0.03 <sup>a</sup>
HA	44.5	7.97±0.36 <sup>ef</sup>	4.77±0.30 <sup>def</sup>
	54.7	9.94±0.47 <sup>cdef</sup>	5.30±0.28 <sup>abc</sup>
	64.6	8.06±1.01 <sup>ef</sup>	5.20±0.52 <sup>abcd</sup>
IR (500 W)	46.5	16.14±2.37 <sup>a</sup>	3.71±0.01 <sup>h</sup>
	56.2	8.89±0.77 <sup>def</sup>	4.83±0.02 <sup>cde</sup>
	65.2	11.38±1.97 <sup>bcde</sup>	5.31±0.03 <sup>abc</sup>
IR (1,000 W)	45.6	9.86±0.66 <sup>cdef</sup>	4.10±0.03 <sup>gh</sup>
	53.9	6.82±0.99 <sup>f</sup>	4.14±0.08 <sup>gh</sup>
	62.1	8.26±0.41 <sup>ef</sup>	4.38±0.01 <sup>efg</sup>

หมายเหตุ : a-f คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยพิจารณาทุกสภาวะการทดลอง

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) ร้อยละการหดตัว และคืนตัวของใบเตยอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ

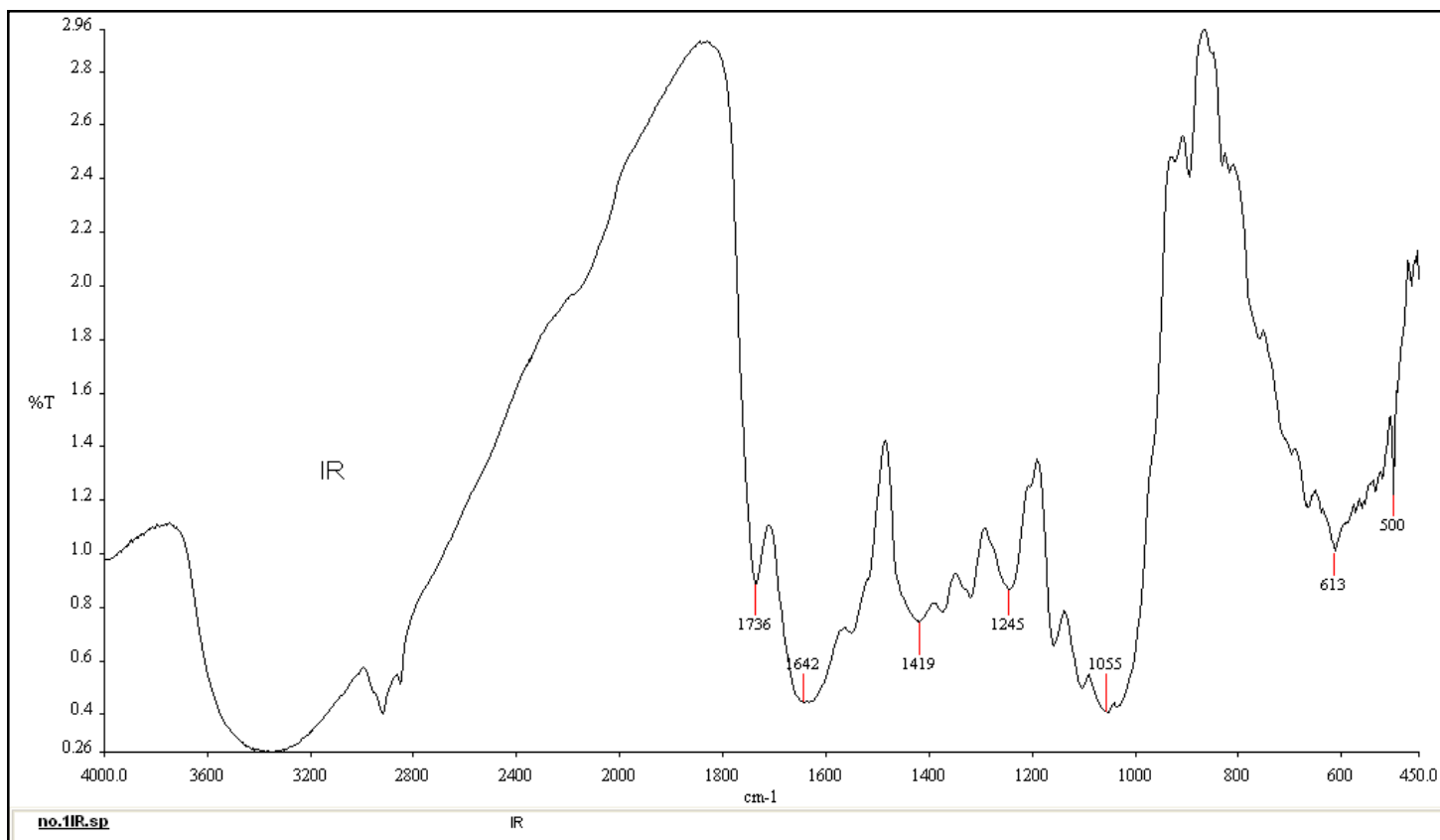
Source	Drying temp. (°C)	%Shrinkage	%Rehydration
IR (1,500 W)	44.2	10.17±0.62 <sup>cdef</sup>	4.02±0.04 <sup>gh</sup>
	56.4	10.86±0.40 <sup>bcdef</sup>	4.28±0.01 <sup>fg</sup>
	62.7	11.11±1.08 <sup>bcd</sup>	5.08±0.02 <sup>abcd</sup>
MW 472 W	-	11.28±1.04 <sup>bcde</sup>	5.46±0.03 <sup>ab</sup>
MW 584 W	-	9.22±0.76 <sup>def</sup>	5.36±0.06 <sup>abc</sup>
MW 704 W	-	10.59±0.08 <sup>bcdef</sup>	5.56±0.09 <sup>ab</sup>
HA+IR (500 W)	44.7	10.91±0.76 <sup>bcde</sup>	5.60±0.04 <sup>ab</sup>
	53.9	11.81±1.57 <sup>bcde</sup>	5.64±0.13 <sup>a</sup>
	64.0	12.57±2.08 <sup>abcd</sup>	5.64±0.28 <sup>a</sup>
HA+IR (1,000 W)	44.9	13.50±0.89 <sup>abc</sup>	5.23±0.06 <sup>abcd</sup>
	52.7	14.60±1.80 <sup>ab</sup>	5.51±0.07 <sup>ab</sup>
	63.8	9.31±0.26 <sup>def</sup>	5.15±0.07 <sup>abcd</sup>
MW (472W 3 min), HA (2 stage)	45.1	12.08±1.63 <sup>bcde</sup>	5.25±0.06 <sup>abcd</sup>
	55.7	9.72±0.98 <sup>cdef</sup>	5.42±0.11 <sup>ab</sup>
	64.5	10.74±0.75 <sup>bcdef</sup>	5.46±0.08 <sup>ab</sup>
MW (472W 3 min), IR (1,000 W) (2 stage)	45.2	11.51±0.43 <sup>bcde</sup>	5.29±0.42 <sup>abc</sup>
	53.0	12.54±1.03 <sup>abcd</sup>	5.05±0.05 <sup>bcd</sup>
	65.6	10.26±1.23 <sup>cdef</sup>	5.18±0.12 <sup>abcd</sup>

หมายเหตุ : a-f คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยพิจารณาทุกสภาวะการทดลอง

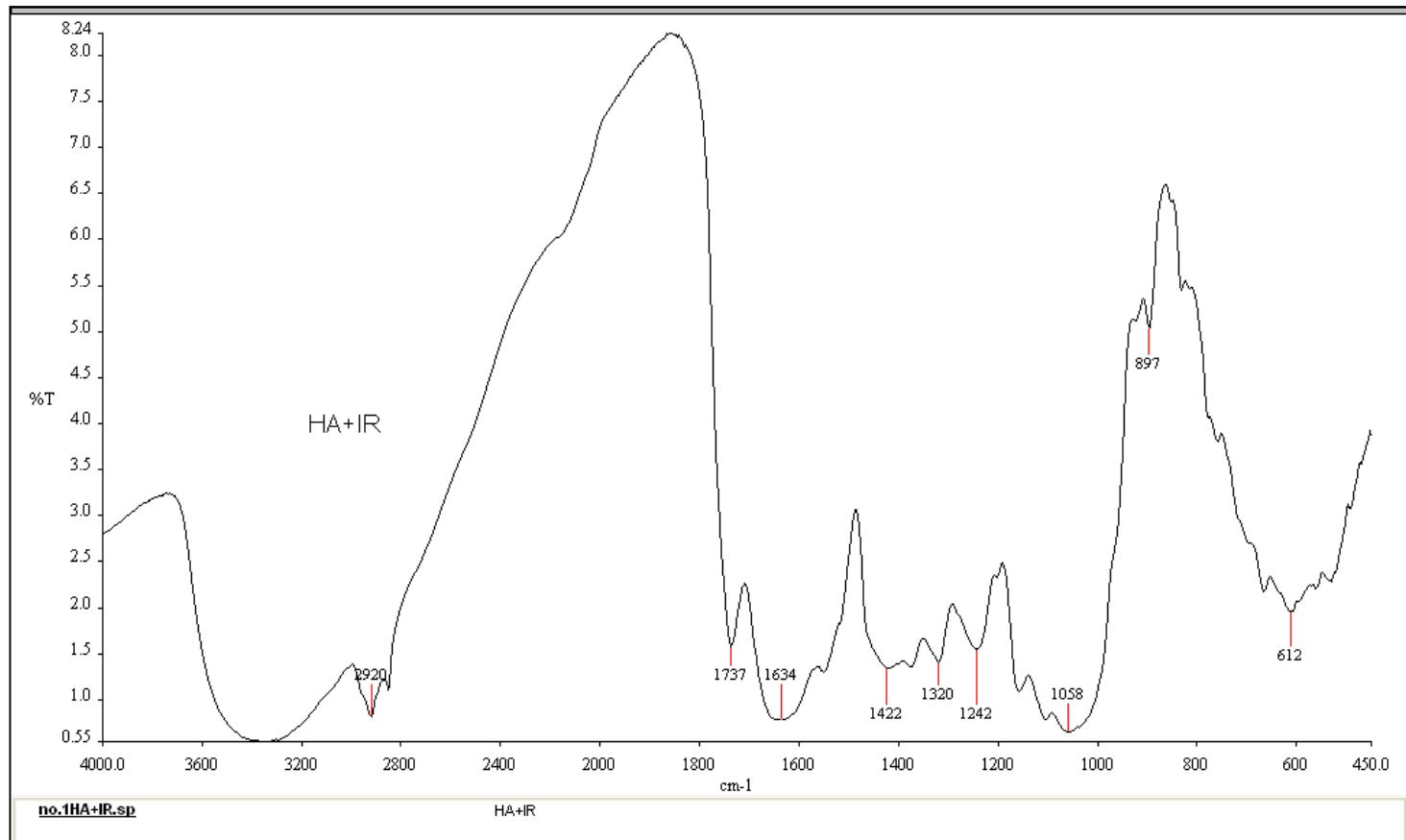
#### 4.4.2 คุณภาพทางเคมี

การทดสอบคุณภาพทางเคมีด้วยการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารระเหยภายในผลิตภัณฑ์ใบเตยอบแห้ง ซึ่งวิเคราะห์ด้วยด้วย เครื่อง FT-IR (Fourier transform infrared spectrometer) โดยการวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (IR) ของสารขณะที่มีการสั่นของอะตอมระหว่างพันธะของสาร รังสีอินฟราเรดจะมีความยาวคลื่นในช่วง 0.8-200 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) และมีเลขคลื่น ( $\text{V}$ )  $12,500\text{-}50\text{ cm}^{-1}$  ดังภาพประกอบที่ 4.23-4.28

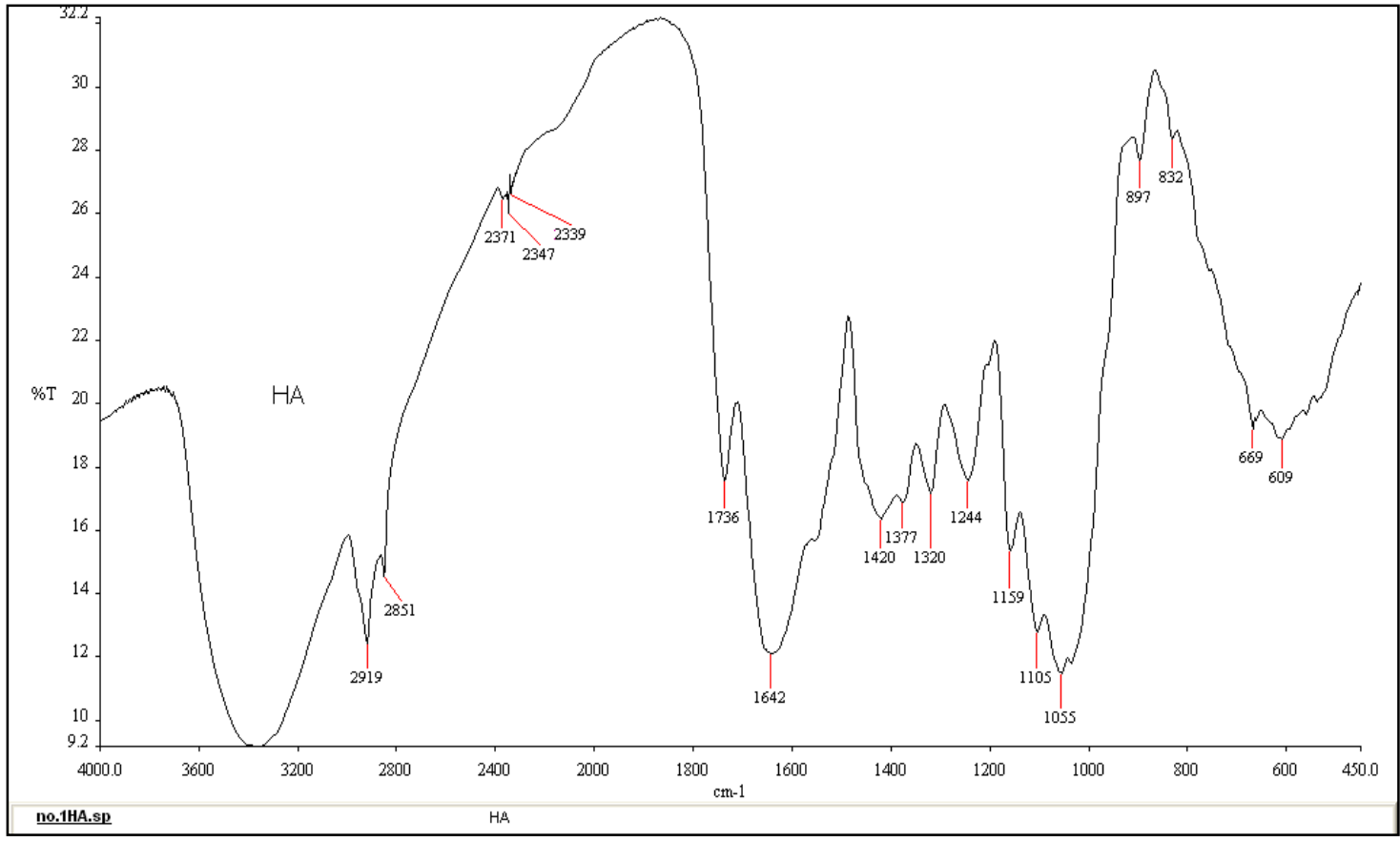




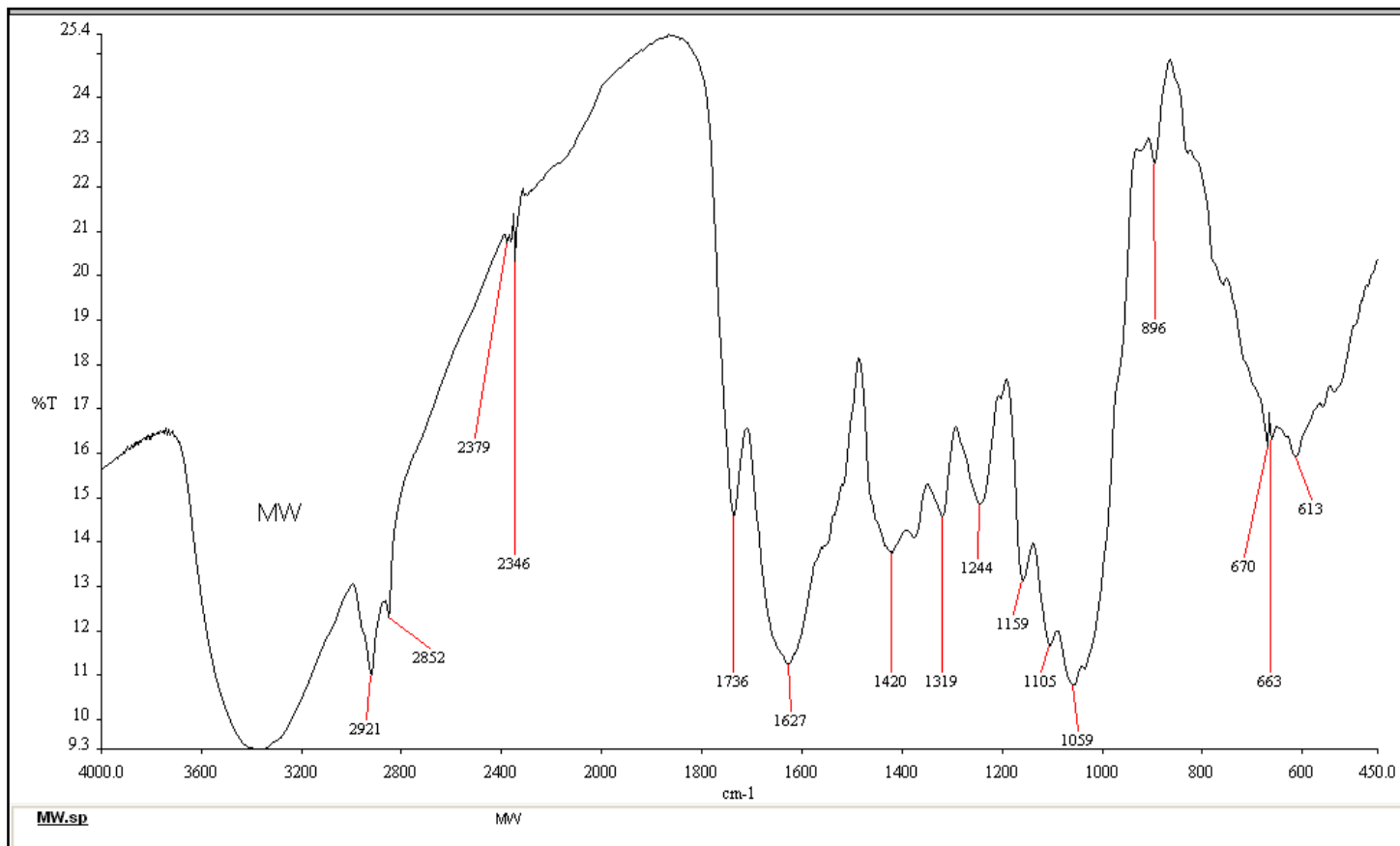
ภาพประกอบที่ 4.23 แสดงหมู่ฟังก์ชันของสารหอมระเหยในใบเตยที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,000 W อุณหภูมิอบแห้ง 62.1°C



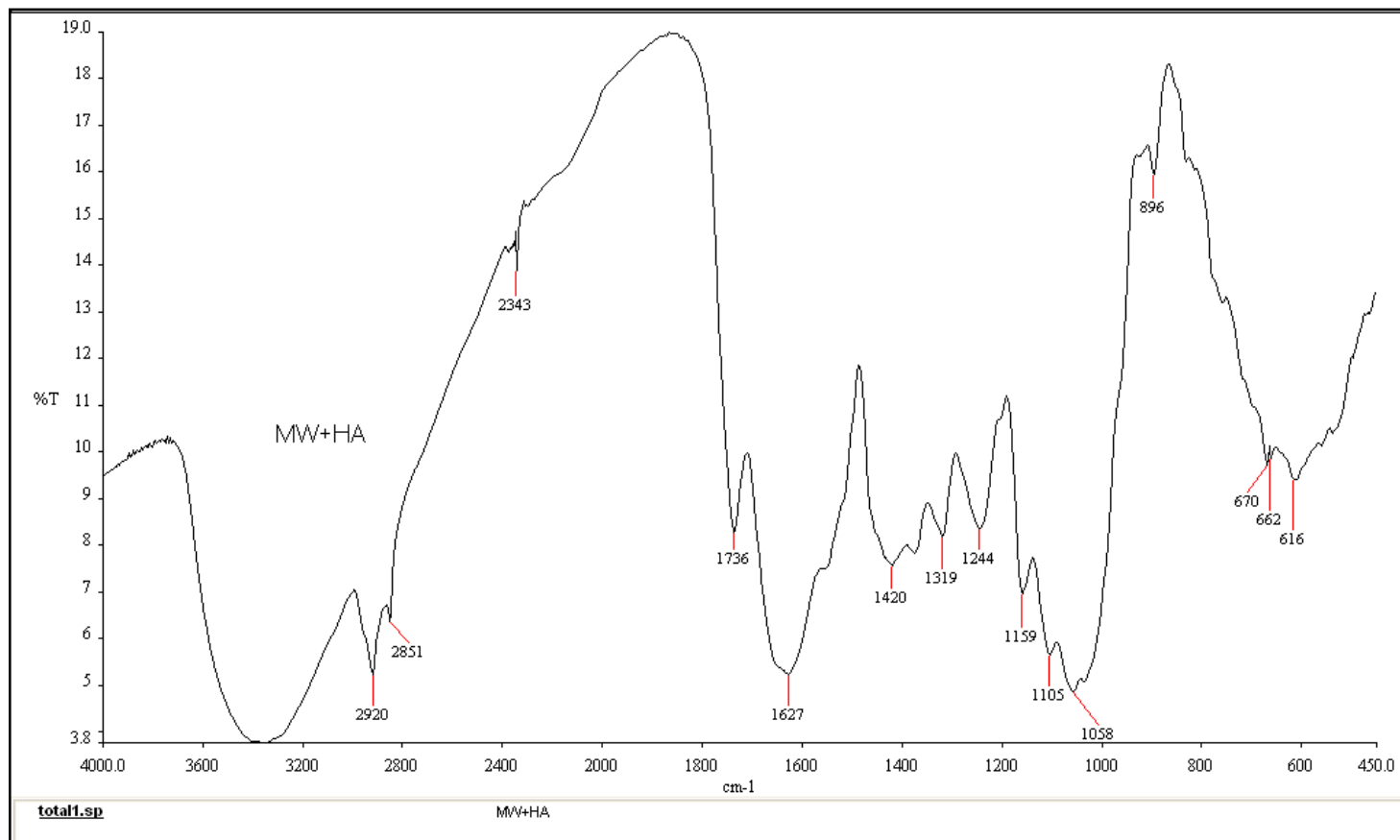
ภาพประกอบที่ 4.24 แสดงหมู่ฟังก์ชันของสารหอมระเหยในใบเตยที่อบแห้งด้วยลมร้อน อุณหภูมิอบแห้ง 64.5°C



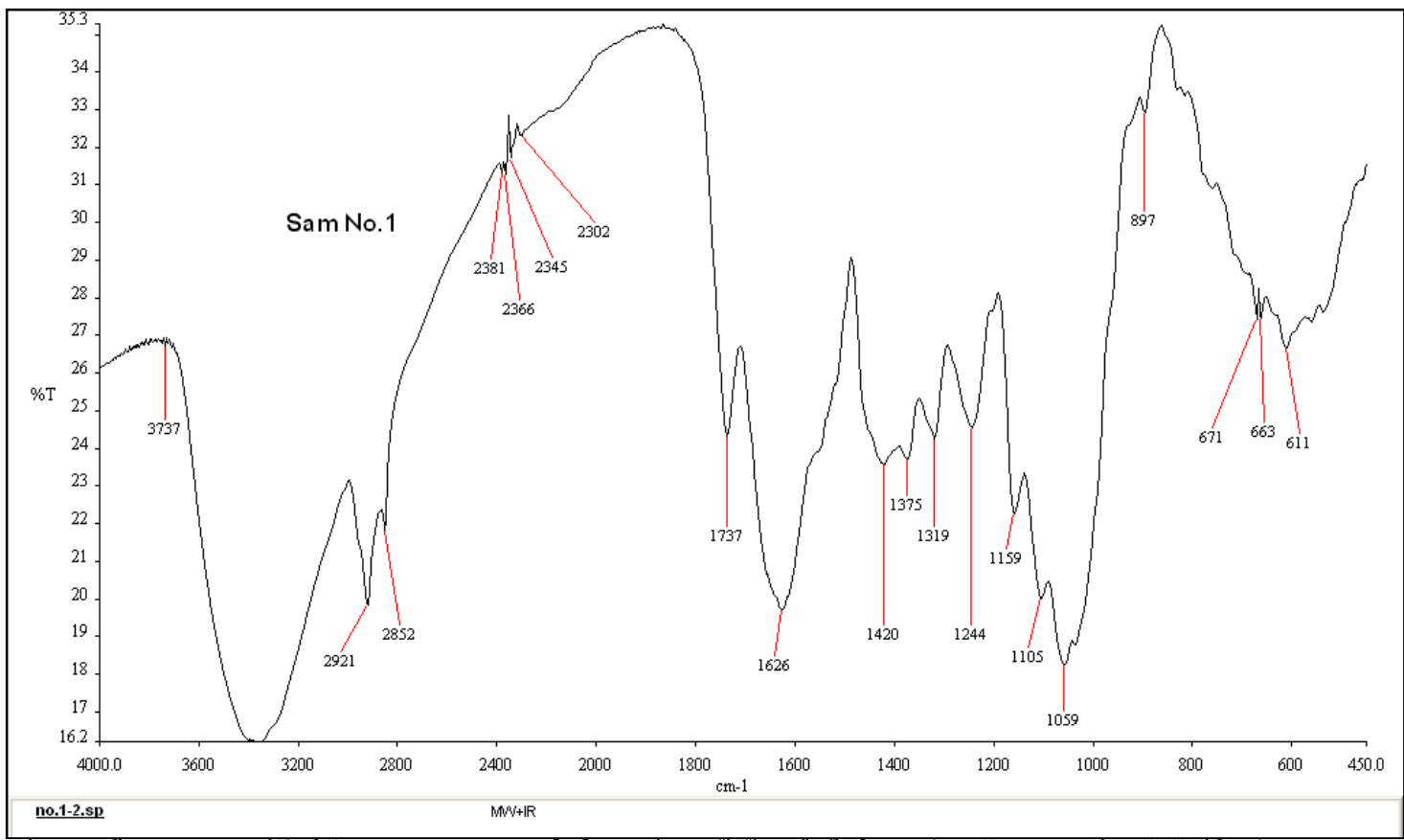
ภาพประกอบที่ 4.25 แสดงหมู่ฟังก์ชันของสารหอมระเหยในใบเตยที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด กำลัง 1,000 W อุณหภูมิอบแห้ง 62.1°C



ภาพประกอบที่ 4.26 แสดงหมู่ฟังก์ชันของสารหอมระเหยในใบเตยที่อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ กำลัง 472 W



ภาพประกอบที่ 4.27 แสดงหมู่ฟังก์ชันของสารหอมระเหยในใบเตยที่อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (กำลัง 472 W) ร่วมกับลมร้อนแบบสองชั้นตอนอุณหภูมิอบแห้ง 64.5°C



ภาพประกอบที่ 4.28 แสดงหมู่ฟังก์ชันของสารหอมระเหยในใบเตยที่อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (กำลัง 472 W) ร่วมกับรังสีอินฟราเรด (กำลัง 1,000 W) แบบสองขั้นตอน อุณหภูมิอบแห้ง 63.8°C

จากภาพประกอบที่ 4.21-4.26 พบว่า หมู่ฟังก์ชันที่พบในสารระเหยของใบเตยอบแห้ง ได้แก่ แอลกอฮอล์ (alcohol) ซึ่งมีค่าดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วง  $1,000-1,260\text{ cm}^{-1}$  คีโตน (ketone) มีค่าดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วง  $1,100-1,715\text{ cm}^{-1}$  เอสเตอร์ (ester) มีค่าดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วง  $1,160-1,750\text{ cm}^{-1}$  และ อีเทอร์ (ether) มีค่าดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วง  $1,000-1,300\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแหล่งพลังงานความร้อนที่ใช้อบแห้งใบเตยตามเงื่อนไขพบหมู่ฟังก์ชันดังกล่าว

#### 4.4.3 คุณภาพทางประสาทสัมผัส (Sensory evaluation)

ผลการทดสอบคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของใบเตยที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.7 โดยผู้ทดสอบจำนวน 15 คน แสดงคะแนนความชอบ (1-9) ต่อผลิตภัณฑ์ทางด้านต่าง ๆ โดยการชิมในลักษณะของชาใบเตย ซึ่งได้แก่ กลิ่น สี รสชาติ และความชอบโดยรวม

ตารางที่ 4.7 คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสเฉลี่ยของใบเตยอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ

Source	Drying Temp. (°C)	Characteristic of products			
		Odor	Color	Flavor	Overall Acceptability
Solar	32.5	5.9 <sup>c</sup>	5.7 <sup>b</sup>	5.2 <sup>c</sup>	5.5 <sup>c</sup>
Solar + HA	45.6	6.4 <sup>bc</sup>	5.8 <sup>b</sup>	5.9 <sup>d</sup>	6.1 <sup>d</sup>
	56.3	6.8 <sup>b</sup>	6.1 <sup>b</sup>	6.3 <sup>d</sup>	6.4 <sup>cd</sup>
	65.0	6.5 <sup>bc</sup>	6.7 <sup>ab</sup>	6.8 <sup>c</sup>	6.7 <sup>ab</sup>
HA	44.5	7.4 <sup>ab</sup>	6.3 <sup>ab</sup>	7.2 <sup>bc</sup>	6.5 <sup>bc</sup>
	54.7	7.1 <sup>ab</sup>	5.9 <sup>b</sup>	6.4 <sup>cd</sup>	6.8 <sup>ab</sup>
	64.6	7.0 <sup>b</sup>	6.1 <sup>b</sup>	5.9 <sup>d</sup>	6.7 <sup>ab</sup>
IR (500 W)	46.5	7.3 <sup>ab</sup>	5.1 <sup>c</sup>	6.1 <sup>d</sup>	6.2 <sup>d</sup>
	56.2	6.9 <sup>b</sup>	5.3 <sup>c</sup>	6.8 <sup>c</sup>	6.3 <sup>cd</sup>
	65.2	7.3 <sup>ab</sup>	6.2 <sup>ab</sup>	7.1 <sup>bc</sup>	6.9 <sup>a</sup>
IR (1,000 W)	45.6	7.1 <sup>ab</sup>	5.5 <sup>bc</sup>	6.9 <sup>c</sup>	6.5 <sup>bc</sup>
	53.9	7.5 <sup>ab</sup>	6.5 <sup>ab</sup>	7.1 <sup>bc</sup>	7.0 <sup>a</sup>
	62.1	7.2 <sup>ab</sup>	6.9 <sup>a</sup>	6.3 <sup>d</sup>	6.8 <sup>ab</sup>

หมายเหตุ : a-e คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยพิจารณาทุกสภาวะการทดลอง

ตารางที่ 4.7 (ต่อ) คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสเฉลี่ยของใบเตยอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ

Source	Drying Temp.	Characteristic of products			
	(°C)	Odor	Color	Flavor	Overall Acceptability
IR (1,500 W)	44.2	6.2 <sup>bc</sup>	6.9 <sup>a</sup>	6.3 <sup>d</sup>	6.5 <sup>bc</sup>
	56.4	6.8 <sup>b</sup>	5.6 <sup>bc</sup>	6.6 <sup>c</sup>	6.3 <sup>cd</sup>
	62.7	7.1 <sup>ab</sup>	5.8 <sup>b</sup>	7.0 <sup>c</sup>	6.6 <sup>bc</sup>
MW 472 W	-	7.3 <sup>ab</sup>	5.9 <sup>b</sup>	7.3 <sup>bc</sup>	6.8 <sup>ab</sup>
MW 584 W	-	6.8 <sup>b</sup>	5.9 <sup>b</sup>	7.6 <sup>a</sup>	6.8 <sup>ab</sup>
MW 704 W	-	7.9 <sup>a</sup>	6.3 <sup>ab</sup>	7.0 <sup>c</sup>	7.1 <sup>a</sup>
HA+IR (500 W)	44.7	7.2 <sup>ab</sup>	7.1 <sup>a</sup>	6.8 <sup>c</sup>	7.0 <sup>a</sup>
	53.9	7.0 <sup>b</sup>	7.3 <sup>a</sup>	6.4 <sup>cd</sup>	6.9 <sup>a</sup>
	64.0	7.1 <sup>ab</sup>	7.1 <sup>a</sup>	6.5 <sup>cd</sup>	6.8 <sup>ab</sup>
HA+IR (1,000 W)	44.9	6.9 <sup>b</sup>	7.0 <sup>a</sup>	7.1 <sup>bc</sup>	7.0 <sup>a</sup>
	52.7	6.4 <sup>bc</sup>	6.9 <sup>a</sup>	7.2 <sup>bc</sup>	6.8 <sup>ab</sup>
	63.8	6.8 <sup>b</sup>	6.3 <sup>ab</sup>	7.6 <sup>a</sup>	7.1 <sup>a</sup>
MW (472 W 3 min), HA (2 stage)	45.1	6.1 <sup>c</sup>	5.9 <sup>b</sup>	7.4 <sup>ab</sup>	6.7 <sup>ab</sup>
	55.7	6.8 <sup>b</sup>	6.1 <sup>b</sup>	7.6 <sup>a</sup>	7.1 <sup>a</sup>
	64.5	6.5 <sup>bc</sup>	6.8 <sup>a</sup>	7.1 <sup>bc</sup>	6.6 <sup>bc</sup>
MW (472 W 3 min), IR (1,000 W) (2 stage)	45.2	7.4 <sup>ab</sup>	6.4 <sup>ab</sup>	7.7 <sup>a</sup>	7.1 <sup>a</sup>
	53.0	7.3 <sup>ab</sup>	5.8 <sup>b</sup>	6.8 <sup>c</sup>	6.4 <sup>cd</sup>
	65.6	7.4 <sup>ab</sup>	6.2 <sup>ab</sup>	6.9 <sup>c</sup>	6.8 <sup>ab</sup>

หมายเหตุ : a-e คือ ในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยพิจารณาทุกสภาวะการทดลอง

จากตารางที่ 4.7 พบว่า คะแนนความชอบในด้านต่าง ๆ ของแต่ละสภาวะอบแห้งไม่แตกต่างกัน สำหรับหารอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ มีแนวโน้มคะแนนเฉลี่ยต่ำกว่าที่สภาวะการอบแห้งอื่น ๆ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งนาน ทำให้เกิดการสูญเสียของกลิ่นและลักษณะของสีเกิดการเปลี่ยนแปลงไปมาก



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาปัจจัยของวิธีและสภาวะการอบแห้งใบเตยที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง โดยนำเทคนิคการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน / รังสีอินฟราเรดแบบสองขั้นตอน และพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อน ทำการทดลองหาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง วิเคราะห์ความสัมพันธ์เปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง และวิเคราะห์คุณภาพใบเตยอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

#### 5.1 ความชื้นสมดุลของใบเตย

จากการศึกษาความชื้นสมดุลของใบเตย พบว่า รูปแบบสมการของ BET (Brunauer et al. 1938) อธิบายผลการทดลองของใบเตยได้ดีที่สุด ดังแสดง

แบบจำลองความชื้นสมดุลของ BET (Brunauer et al. 1938)

$$\ln \frac{RH}{(1-RH)M_{eq}} = \frac{1}{M_m C} + \frac{(C-1)RH}{M_m C}$$

ค่าคงตัว  $M_m = 1.4694 - 0.0050T$ ,  $C = -0.3715 - 0.0025T$ ;  $T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)  
อุณหภูมิอบแห้งในช่วง  $40-65^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 11.5-87.8 %

#### 5.2 จลนพลศาสตร์การอบแห้งใบเตย

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ กำลังของรังสีอินฟราเรดและกำลังของไมโครเวฟที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบเตย พบว่า

##### 1. ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง

- 1.1 ปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้ง เมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น อัตราการอบแห้งก็จะเพิ่มขึ้น

1.2 ปัจจัยของกำลังอินฟราเรด เมื่อกำลังของอินฟราเรดสูงขึ้น อัตราการอบแห้งก็จะเพิ่มขึ้น

1.3 ปัจจัยของกำลังไมโครเวฟ เมื่อกำลังของไมโครเวฟเพิ่มขึ้น อัตราการอบแห้งก็จะเพิ่มขึ้น

## 2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล Logarithmic สามารถใช้ทำนายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งได้ดีที่สุดในช่วงอุณหภูมิ 45-65°C

## 3. ผลการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

จากการทดลองอบแห้งใบเตย และนำข้อมูลไปหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น โดยพิจารณาให้ใบเตยมีรูปร่างแบนราบและกว้าง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นขึ้นกับอุณหภูมิของการอบแห้งในรูปแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับอุณหภูมิอบแห้ง

## 5.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

จากการวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง พบว่า ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอบแห้งและกำลังของอินฟราเรด โดยเมื่ออุณหภูมิอบแห้งและกำลังของอินฟราเรดเพิ่มขึ้น ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้นลง เมื่อเปรียบเทียบกับกรอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด พบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด และพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับลมร้อน สำหรับการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่า เมื่อกำลังของไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีแนวโน้มลดลง และต่ำกว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน /รังสีอินฟราเรดแบบสองขั้นตอน

## 5.4 คุณภาพใบเตยภายหลังการอบแห้ง

จากการวิเคราะห์คุณภาพของใบเตยภายหลังการอบแห้งทั้งในด้านกายภาพ เคมี และด้านประสาทสัมผัส พบว่า การอบแห้งใบเตยที่อุณหภูมิสูงจะช่วยลดค่าการเปลี่ยนแปลงของสีเขียวและการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม ด้านการหัดตัว พบว่า อบแห้งสูงมีการหัดตัวมากกว่า อุณหภูมิอบแห้งต่ำ ด้านการคินตัว พบว่า อุณหภูมิไม่ส่งผลต่อการคินตัวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ด้านคุณภาพทางเคมี พบว่า สารระเหยของใบเตยยังคงมีสารให้ความหอมจำพวกคีโตน (ketone) เอสเตอร์ (ester) และ อีเทอร์ (ether) สำหรับคุณภาพด้านการทดสอบการชิมในรูปแบบ

ของชาไบเตย พบว่า ลักษณะของกลิ่น สี รสชาติและความชอบโดยรวม ของแต่ละสภาวะการอบแห้งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p>0.05$ )

การเลือกแนวทางการอบแห้งไบเตย ขึ้นอยู่กับความต้องการในด้านอัตราการอบแห้งสูงสุดหรือค่าใช้จ่ายพลังงานต่ำสุด หรือต้องการคุณภาพของไบเตยหลังการอบแห้ง ถ้าต้องการอัตราการอบแห้งสูงสุดควรเลือกการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด และถ้าต้องการประหยัดพลังงานควรเลือกการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ทั้งนี้คุณภาพของไบเตยแต่ละสภาวะอบแห้งไม่แตกต่างกัน

### 5.5 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการบรรจุผลิตภัณฑ์ไบเตยอบแห้ง ที่จะไม่ส่งผลให้ปริมาณความชื้นสูง และคุณภาพทางจุลชีววิทยาได้
2. ในการทดลองเพื่อให้เปรียบเทียบผลการทดลองได้ดีขึ้นควรควบคุมความชื้นเริ่มต้น แต่ความชื้นเริ่มต้นของไบเตยในแต่ละแหล่งเพาะปลูกและช่วงฤดูกาลไม่เท่ากัน

## เอกสารอ้างอิง

- จารุวรรณ กุลวิศวะ, สมเกียรติ ปรัชญาวรรณ และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์. (2550). “ผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อสารระเหยง่ายและคุณภาพทางกายภาพในกล้วยแผ่น.” *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*, (30)4, 611-621.
- ช่อผกา เทพรั้งมี. (2553) “การผลิตข้าวขาวเคลือบด้วยสารสกัดธรรมชาติจากใบเตยแบบห่อหุ้มและทำแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมกระบวนการอาหาร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่.
- ชัยวิทย์ สิวาชันนาไณย. 2525. “ฟิสิกส์ของพลังงานแสงแดด” เอกสารประกอบการสอนนักศึกษาปริญญาตรี. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา.
- ธารธรรม แก้วเชื้อเมือง. (2537). “น้ำดื่มสมุนไพรจากพืช และผลไม้.” พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ.
- ธีรยุทธ หนูแดง. (2547). “การใช้รังสีอัลตราไวโอเลตในการยับยั้ง Salmonella Senftenberg: ผลของค่าอุณหภูมิแอกติวิตีร่วมกับองค์ประกอบของอาหาร.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ.
- ภักดิ์ ทงทิมพร. (2550) “การมองเห็นและการวัดสี.” เอกสารความรู้โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. กรุงเทพฯ.
- วิไล รังสาดทอง. (2547). “เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร”. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : บริษัท เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชัน จำกัด.
- แววตา ชีทางดี. (2547). “ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิด 2-Acetyl-1-pyrroline และสารอื่น ๆ ในใบเตย.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- ศรียา แจ้คำ. (2546). “การอบแห้งผลไม้และสมุนไพรด้วยความร้อนร่วมกับอินฟราเรดไกล.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ.
- ศิริทรัพย์ เถาปฐม. (2544). “อิทธิพลของอุณหภูมิและชั้นความหนาต่อการอบแห้งหอมหัวใหญ่หั่นในเครื่องอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่.
- สมชาติ โสภณธนฤทธิ์. (2540). “การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท.” พิมพ์ครั้งที่ 7. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ.

- สมพร ภูติยานันต์. (2523) “สมุนไพรใกล้ตัว ตอนที่ 2” พิมพ์ครั้งที่ 1 หน้า 104.
- สุภาวรรณ ภูริระวณิชชกุล และ ยุทธนา ภูริระวณิชชกุล. 2537. “เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชชั้นบาง: พารามิเตอร์ของการอบแห้งชั้นบางของเนื้อในเมล็ดมะม่วงหิมพานต์.” *วารสารสงขลานครินทร์*, 16 (4), 381-392.
- อรพิน นิชมญาติ. 2545. “ชาสมุนไพร” รายงานการวิจัย. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏเพชรบูรณ์. เพชรบูรณ์
- อรัญญา มโนสร้อย, ชลดา คำโน, เพ็ญพรรณ ชันรินทร์, กาญจนา เรือนโต และ จิรเดช มโนสร้อย. (2548). “การเตรียมสารสกัดและน้ำมันจากสมุนไพรไทยโดยใช้ *Supercritical carbon dioxide fluid* และการกลั่น” รายงานการวิจัย ศูนย์วิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.เชียงใหม่
- AOAC. (1995). Official Method of Analysis, 16th ed., The Association of Official Analytical Chemists. Inc. Arlington, Virginia, USA.
- Apintanapong, M. and Noomhorm, A., (2003). “The use of spray drying to microencapsulate 2-acetyl-1-pyrroline, a major flavor component of aromatic rice.” *Journal of Food Science and Technology*. 38, 95-102.
- Apintanapong, M. (2009). “Infrared drying of holy basil leaves and its effect on sensory characteristics.” *Journal of Agricultural Science*. 40(3) (Suppl.), 69-72.
- Arslan, N. and Togrul, H. (2006). “The fitting of various models to water sorption isotherms of tea stored in a chamber under controlled temperature and humidity.” *Journal of Stored Products Research*. 42, 112-135.
- Artnaseaw, A., Threakupisut, S. and Benjapiyaporn, C. (2010). “Development of a vacuum heat dryer for drying chilli.” *Journal of Biosystems Engineering*. 103, 130-138.
- Cunningham, S.E., McMinn, W.A.M., Magee, T.R.A. and Richardson, P.S. (2007). “Modeling water absorption of pasta during soaking.” *Journal of Food Engineering*. 82, 600-607.
- Gable, M., Pan, Z., Ameratunga, K.S.P., Harris, J. and Thompsom, J., (2006). “Catalytic infrared dehydration of onions.” *Journal of Food Science*. 71, 351-357.
- Hill, C.L., Law, C.L. and Cloke, M. (2009). “Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa.” *Journal of Food Engineering*. 90, 191-198.

- Marfil, P.H.M., Santos, E.M. and Telis, V.R.N. (2008). "Ascorbic acid degradation kinetics in tomatoes at different drying conditions." *Journal of Food Science and Technology*. 41, 1642-1647.
- Nathakaranakule, A., Jaiboon, P. and Soponronnarit, S. (2010). "Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit." *Journal of Food Engineering*. 100, 662-668.
- Paramita, B., Amol, K. and Rekha, S.S. (2005). "Supercritical carbon dioxide extraction of 2-acetyl-1-pyrroline from Pandanus amaryllifolius Roxb." *Journal of Food Chemistry*. 91, 255-259.
- Prachayawarakorn, S., Tia, W., Plyto, N. and Soponronnarit, S. (2008). "Drying kinetics and quality attributes of low-fat banana slices dried at high temperature." *Journal of Food Engineering*. 85, 509-517.
- Raksakulthai, N. 1997. "Dried Fishery Production." Department of Fish Products. Faculty of Fisheries. Kaseisart University, Bangkok.
- Silverstein, R.M., Bassler, G. and Morrill, T.C. (1991). "Spectrometric Identification of Organic Compounds." 5th ed., Singapore.
- Singh, G.D., Sharma, R., Bawa, A.S. and Saxena. D.C. (2007). "Drying and rehydration characteristics of water chestnut (*Trapa natans*) as a function of drying air temperature." *Journal of Food Engineering*. 87, 213-221.
- Siniji, V.R. and Mishra, H.N. (2008). "Moisture sorption isotherms and heat of sorption of instant (soluble) green tea powder and green tea granules." *Journal of Food Engineering*. 86, 494-500.
- Tirawanichakul, S., Na Phatthalung, W. and Tirawanichakul, S. 2008. "Drying strategy of shrimp using hot air convection and hybrid infrared radiation/ hot air convection." *Walailak Journal Science and Technology*. 5(1), 77-100.

## ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก**

**มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนใบเตยแห้ง (มผช. 735/2548)**



## มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนใบเตยแห้ง (มผช. 735/2548)

### 1. ขอบข่าย

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้ครอบคลุมใบเตยแห้งที่มีใบเตยเป็นส่วนประกอบหลักอยู่ในลักษณะเป็นชิ้นแห้งและเป็นผง อาจบรรจุในซองเยื่อกระดาษ บรรจุในภาชนะบรรจุ ใช้สำหรับชงเป็นเครื่องดื่ม

### 2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้มีดังต่อไปนี้

ใบเตยแห้ง หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำใบเตยหอมที่อยู่ในสภาพดี มาล้างให้สะอาด ผึ่งให้แห้ง หั่นให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ อบให้แห้ง อาจบดเป็นผง อาจผสมส่วนผสมอื่นจากธรรมชาติ เช่น ใบตะไคร้ ใบขลุ่

### 3. คุณลักษณะที่ต้องการ

3.1 ลักษณะทั่วไป ต้องเป็นชิ้นหรือผงแห้ง ไม่จับตัวเป็นก้อน

3.2 สี ต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของใบเตยแห้ง

3.3 กลิ่นรส ต้องมีกลิ่นรสที่ดีตามธรรมชาติของใบเตยแห้ง ปราศจากกลิ่นรสอื่นที่ไม่พึงประสงค์

3.4 การสกัดด้วยน้ำเดือด ของเหลวที่ได้ต้องมีลักษณะที่ดีตามธรรมชาติของใบเตยแห้ง เมื่อตรวจสอบโดยวิธีให้คะแนนตามข้อ 8.1 แล้ว ต้องได้คะแนนเฉลี่ยของแต่ละลักษณะจากผู้ตรวจสอบทุกคน ไม่น้อยกว่า 3 คะแนน และไม่มีลักษณะใดได้ 1 คะแนน จากผู้ตรวจสอบคนใดคนหนึ่ง

3.5 สิ่งแปลกปลอม ต้องไม่พบสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่ส่วนประกอบที่ใช้ เช่น เส้นผม ดิน ทราย กรวด ชิ้นส่วนหรือสิ่งปฏิกูลจากสัตว์

3.6 ความชื้น ต้องไม่เกินร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก

3.7 การเจือสีต้องไม่พบการเจือสีใดๆ

3.8 จุลินทรีย์

3.8.1 จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ต้องไม่เกิน  $1 \times 10^4$  โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

3.8.2 รา ต้องน้อยกว่า 10 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

#### 4. สุขลักษณะ

สุขลักษณะในการทำไบโอดีแแข็ง ให้เป็นไปตามคำแนะนำตามภาคผนวก ก(1)

#### 5. การบรรจุ

5.1 ให้บรรจุไบโอดีแแข็งในภาชนะบรรจุที่สะอาด ปิดได้สนิท และสามารถป้องกันการปนเปื้อนจากสิ่งสกปรกภายนอกได้

5.2 น้ำหนักสุทธิของกึ่งแแข็งในแต่ละภาชนะบรรจุ ต้องไม่น้อยกว่าที่ระบุไว้ที่ฉลาก

#### 6. เครื่องหมายและฉลาก

6.1 ที่ภาชนะบรรจุไบโอดีแแข็งทุกหน่วย อย่างน้อยต้องมีเลข อักษร หรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่าย ชัดเจน

- (1) ชื่อเรียกผลิตภัณฑ์เช่น ไบโอดีแแข็ง ไบโอดีแแข็งขงคิม
- (2) ส่วนประกอบที่สำคัญ
- (3) น้ำหนักสุทธิ
- (4) วัน เดือน ปีที่ทำ และวัน เดือน ปีที่หมดอายุ หรือข้อความว่า “ควรบริโภคก่อน (วัน เดือน ปี)”
- (5) ข้อเสนอแนะในการบริโภคและการเก็บรักษา
- (6) ชื่อผู้ทำ หรือสถานที่ทำ พร้อมสถานที่ตั้ง หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียนในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศ ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

#### 7. การชั่งตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน

7.1 รุ่น ในที่นี้ หมายถึง ไบโอดีแแข็งที่มีส่วนประกอบเดียวกัน ทำในระยะเวลาเดียวกัน

7.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับ ให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้

7.2.1 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบสิ่งแปลกลม การบรรจุ และเครื่องหมายและฉลากให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 3 หน่วยภาชนะบรรจุ เมื่อตรวจสอบแล้วทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.4 ข้อ 3.5. และข้อ 3.6. จึงจะถือว่าไบเคยแห่งรุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.2.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบลักษณะทั่วไป สี กลิ่นรส และการสกัดด้วยน้ำเดือด ให้ใช้ตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบตามข้อ 7.2.1 แล้ว จำนวน 3 หน่วยภาชนะบรรจุ เมื่อตรวจสอบแล้วตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.1 ถึงข้อ 3.4 จึงจะถือว่าไบเคยแห่งรุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.2.3 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบความชื้นและการเจือสี ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 3 หน่วยภาชนะบรรจุ เพื่อทำเป็นตัวอย่างรวม โดยมีน้ำหนักรวมไม่น้อยกว่า 100 กรัม กรณีตัวอย่างไม่พอให้ชักตัวอย่างเพิ่ม โดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกันให้ได้ตัวอย่างที่มีน้ำหนักรวมตามที่กำหนด เมื่อตรวจสอบแล้วตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.6 และข้อ 3.7 จึงจะถือว่าไบเคยแห่งรุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.2.4 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบจุลินทรีย์ ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 3 หน่วยภาชนะบรรจุ เพื่อทำเป็นตัวอย่างรวม โดยมีน้ำหนักรวมไม่น้อยกว่า 200 กรัม กรณีตัวอย่างไม่พอให้ชักตัวอย่างเพิ่มโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกันให้ได้ตัวอย่างที่มีน้ำหนักรวมตามที่กำหนด เมื่อตรวจสอบแล้วตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.8 จึงจะถือว่าไบเคยแห่งรุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.3 เกณฑ์ตัดสิน ตัวอย่างไบเคยแห่งต้องเป็นไปตามข้อ 7.2.1 ข้อ 7.2.2 ข้อ 7.2.3 และข้อ 7.2.4 ทุกข้อ จึงจะถือว่าไบเคยแห่งรุ่นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้

## 8. การทดสอบ

8.1 การทดสอบลักษณะทั่วไป สี กลิ่นรส และการสกัดด้วยน้ำเดือด

8.1.1 ให้แต่งตั้งคณะผู้ตรวจสอบ ประกอบด้วยผู้ที่มีความชำนาญในการตรวจสอบกึ่งหนึ่งอย่างน้อย 5 คน แต่ละคนจะแยกกันตรวจและให้คะแนนโดยอิสระ

8.1.2 เติตัวอย่างไบเคยแห่งลงในจานกระเบื้องสีขาว ตรวจสอบโดยการตรวจพินิจ

8.1.3 เทตัวอย่างใบเตยแห้งลงในภาชนะที่เหมาะสม เติมน้ำเดือดตามปริมาณที่ระบุไว้ที่ฉลาก ปิดฝาทิ้งไว้ 6 นาที ตรวจสอบกลิ่นรสและการสกัดด้วยน้ำเดือดโดยการตรวจพินิจและชิม

8.1.4 หลักเกณฑ์การให้คะแนน ให้เป็นไปตามตารางภาคผนวกที่ 1

**ตารางภาคผนวกที่ 1** หลักเกณฑ์การให้คะแนน

ลักษณะที่ตรวจสอบ	เกณฑ์ที่กำหนด	ระดับการตัดสิน (คะแนน)			
		ดีมาก	ดี	พอใช้	ต้องปรับปรุง
ลักษณะทั่วไป	ในภาชนะบรรจุเดียวกันต้องเป็นใบเตยที่มีขนาดใกล้เคียงกัน อาจมีเปลือกหรือไม้ก็ได้	4	3	2	1
สี	ต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของใบเตยแห้ง	4	3	2	1
กลิ่นรส	ต้องมีกลิ่นรสที่ดีตามธรรมชาติของใบเตยแห้ง ปราศจากกลิ่นรสอื่นที่ไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นอับ กลิ่นหืน รสเค็มจัด	4	3	2	1
การสกัดด้วยน้ำเดือด	ของเหลวที่ได้ต้องมีลักษณะที่ดีตามธรรมชาติของใบเตยแห้ง	4	3	2	1

8.2 การทดสอบสิ่งแปลกปลอม ภาชนะบรรจุ และเครื่องหมายและฉลากให้ตรวจพินิจ

8.3 การทดสอบความชื้น ให้ใช้วิธีทดสอบตาม AOAC หรือวิธีทดสอบอื่นที่เป็นที่ยอมรับ

8.4 การทดสอบการเจือสี เทตัวอย่างใบเตยแห้งประมาณ 0.5 กรัม ถึง 1 กรัมลงบนกระดาษกรอง พับกระดาษกรองเข้าหากันแล้วขยี้ เทตัวอย่างใบเตยแห้งออกจากกระดาษกรองให้หมด ให้นำลงบนกระดาษกรองพอเปียก ต้องไม่มีสีเกิดขึ้นเห็นได้ชัดเจน ยกเว้นสีตามธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้บนกระดาษกรองนั้น

8.5 การทดสอบจุลินทรีย์ ให้ใช้วิธีทดสอบตาม AOAC หรือ BAM หรือวิธีทดสอบ  
อื่นที่เป็นที่ยอมรับ

8.6 การทดสอบน้ำหนักสุทธิ ให้ใช้เครื่องชั่งที่เหมาะสม

## ภาคผนวก ก(1)

### สุขลักษณะ (ข้อ 4.1)

#### 1. สถานที่ตั้งและอาคารที่ทำ

1.1 สถานที่ตั้งตัวอาคารและที่ใกล้เคียง อยู่ในที่ที่จะไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนได้ง่าย โดย

1.1.1 สถานที่ตั้งตัวอาคารและบริเวณโดยรอบ สะอาด ไม่มีน้ำขังและและสกปรก

1.1.2 อยู่ห่างจากบริเวณหรือสถานที่ที่มีฝุ่น เหม่า ควัน มากผิดปกติ

1.1.3 ไม่อยู่ใกล้เคียงกับสถานที่ที่น่ารังเกียจ เช่น บริเวณเพาะเลี้ยงสัตว์ แหล่งเก็บ หรือกำจัดขยะ

1.2 อาคารที่ทำมีขนาดเหมาะสม มีการออกแบบและก่อสร้างในลักษณะที่ง่ายแก่การบำรุงรักษา การทำความสะอาด และสะดวกในการปฏิบัติงาน โดย

1.2.1 พื้น ฝาผนัง และเพดานของอาคารที่ทำ ก่อสร้างด้วยวัสดุที่คงทน เรียบทำความสะอาด และซ่อมแซมให้อยู่ในสภาพที่ดีตลอดเวลา

1.2.2 แยกบริเวณที่ทำออกเป็นสัดส่วน ไม่อยู่ใกล้ห้องสุขา ไม่มีสิ่งของที่ไมใช่แล้วหรือไม่เกี่ยวข้องกับการทำอยู่ในบริเวณที่ทำ

1.2.3 พื้นที่ทำปฏิบัติงานไม่แออัด มีแสงสว่างเพียงพอ และมีการระบายอากาศที่เหมาะสม

#### 2. เครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ในการทำ

2.1 ภาชนะหรืออุปกรณ์ในการทำที่สัมผัสกับผลิตภัณฑ์ ทำจากวัสดุมีผิวเรียบ ไม่เป็นสนิม ล้างทำความสะอาดได้ง่าย

2.2 เครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ที่ใช้ สะอาด เหมาะสมกับการใช้งาน ไม่ก่อให้เกิดการปนเปื้อน ติดตั้งได้ง่าย มีปริมาณเพียงพอ รวมทั้งสามารถทำความสะอาดได้ง่ายและทั่วถึง

### 3. การควบคุมกระบวนการทำ

3.1 วัตถุประสงค์และส่วนผสมในการทำ สะอาด มีคุณภาพดี มีการล้างหรือทำความสะอาด สะอาดก่อนนำไปใช้

3.2 การทำ การเก็บรักษา การขนย้าย และการขนส่ง ให้มีการป้องกันการปนเปื้อน และการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์

### 4. การสุขาภิบาล การบำรุงรักษา และการทำความสะอาด

4.1 น้ำที่ใช้ล้างทำความสะอาดเครื่องมือ เครื่องจักร อุปกรณ์ และมือของผู้ทำ เป็น น้ำสะอาดและมีปริมาณเพียงพอ

4.2 มีวิธีการป้องกันและกำจัดสัตว์นำเชื้อ แมลงและฝุ่นผง ไม่ให้เข้าในบริเวณที่ทำ ตามความเหมาะสม

4.3 มีการกำจัดขยะ สิ่งสกปรก และน้ำทิ้ง อย่างเหมาะสม เพื่อไม่ก่อให้เกิดการ ปนเปื้อนกลับลงสู่ผลิตภัณฑ์

4.4 สารเคมีที่ใช้ล้างทำความสะอาด และใช้กำจัดสัตว์นำเชื้อและแมลง ใช้ใน ปริมาณที่เหมาะสม และเก็บแยกจากบริเวณที่ทำเพื่อไม่ให้ปนเปื้อนลงสู่ผลิตภัณฑ์ได้

### 5. บุคลากรและสุขลักษณะของผู้ทำ

ผู้ทำทุกคน ต้องรักษาความสะอาดส่วนบุคคลให้ดี เช่น สวมเสื้อผ้าที่สะอาด มีผ้าคลุมผมเพื่อป้องกันไม่ให้เส้นผมหล่นลงในผลิตภัณฑ์ ไม่ไว้เล็บยาว ล้างมือให้สะอาดทุกครั้งก่อนปฏิบัติงาน หลังการใช้ห้องสุขาและเมื่อมือสกปรก

**ภาคผนวก ข**

**แบบทดสอบการยอมรับในการบริโภค**



## แบบทดสอบความชอบโดยวิธี Hedonic scale

### แบบทดสอบการชิม

ผลิตภัณฑ์ ชาใบเตยอบแห้ง

ชื่อผู้ทดสอบ..... อายุ.....ปี เพศ.....

วันที่ทดสอบ..... เวลา.....

คำแนะนำ ตัวอย่างที่ท่านจะทดสอบชิมคือ ชาใบเตยอบแห้ง กรุณาทดสอบตัวอย่างที่เสนอให้ จากซ้ายไปขวาแล้วให้คะแนนความชอบตัวอย่างในแต่ละปัจจัยที่ใกล้เคียงกับความรูสึกของท่านมากที่สุด โดยกำหนดให้

9 = ชอบมากที่สุด      6 = ชอบน้อยที่สุด      3 = ไม่ชอบปานกลาง  
8 = ชอบมาก      5 = เฉยๆ      2 = ไม่ชอบมาก  
7 = ชอบปานกลาง      4 = ไม่ชอบเล็กน้อย      1 = ไม่ชอบมากที่สุด

คุณลักษณะทาง ประสาทสัมผัส	คะแนนความชอบ					
	คะแนน	คะแนน	คะแนน	คะแนน	คะแนน	คะแนน
ความชอบรวม						
ลักษณะปรากฏ (สี/ ความใส)						
กลิ่น						
รสชาติ						

ข้อเสนอแนะ

.....  
.....

ขอขอบคุณ

**ภาคผนวก ค**

**การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 9**

**2-3 พฤษภาคม 2554**

## การอบแห้งชาใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรด

### Pandanus Leaf Tea Drying by Infrared Radiation

อนุสรนา นาดิ<sup>1\*</sup> สุภวรรณ ภูริระวณิชย์กุล<sup>2</sup> ยุธธนา ภูริระวณิชย์กุล<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

<sup>3</sup>ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

E-mail: anusara\_nadee@hotmail.com\*

Anusara Nadee<sup>1\*</sup> Supawan Tirawanichakul<sup>2</sup> Yutthana Tirawanichakul<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

<sup>3</sup>Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

E-mail: anusara\_nadee@hotmail.com\*

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการอบแห้งใบเตยเพื่อใช้ทำชาด้วยรังสีอินฟราเรด โดยพิจารณาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง คุณภาพของใบเตยหลังการอบแห้ง และความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง และศึกษาสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความชื้นสมดุล และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผล การอบแห้งทดลองในช่วงอุณหภูมิ 45-65 °C ที่ความเข้มของรังสีอินฟราเรด 1.62, 3.25 และ 4.87 kW/m<sup>2</sup> ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของใบเตยอยู่ในช่วง 400-600% มาตรฐานแห้ง และ 8-12% มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ จากผลการทดลอง พบว่า อัตราการอบแห้งจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น แต่ค่าความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะในการอบแห้งจะลดลง สำหรับการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าความชื้นสมดุลจากการทดลองได้ดีที่สุด และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่ใช้ทำนายการอบแห้งได้ดี คือ แบบจำลอง Page โดยผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองดังกล่าว ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลสัมพันธ์กับอุณหภูมิอบแห้งและสามารถเขียนในรูปสมการอาร์เรเนียส ในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ พบว่า ค่าสีในระบบ CIE (L\*, a\* และ b\*) แสดงให้เห็นว่า ค่าความสว่าง (L\*) มีค่าเพิ่มขึ้นและค่าความเป็นสีแดง(a\*) ลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม อย่างไรก็ตามก็ตีกรอบแห้งด้วยอินฟราเรดในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 45-65 °C ไม่มีผลต่อค่าความเหลือง (b\*) ร้อยละการคืนตัวของใบเตยแห้งสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งและความเข้มของรังสีอินฟราเรด สุดท้าย ขณะที่ผลจากการทดสอบทางประสาท

สัมผัสด้วยสเกลเฮโดนิค (Hedonic scale) (คะแนน 1-9) พบว่าทุกสภาวะการอบแห้งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

**คำสำคัญ:** จลนพลศาสตร์การอบแห้ง/ รังสีอินฟราเรด/ ใบเตย/ คุณภาพ

#### Abstract

The objective of this research was to study drying of Pandanus leaf for herbal tea by infrared radiation. Determination of drying kinetics, physical quality and specific energy consumption were presented. Moreover, the physical properties in terms of equilibrium moisture content and effective diffusion coefficient were evaluated. The experiments were carried out under the conditions of infrared intensity value of 1.62, 3.25 and 4.87 kW/m<sup>2</sup> and drying temperature range between 45 and 65 °C. initial moisture content of pandanus leaf was between 400 and 600% dry-basis and the final moisture content of dried leaf with all three infrared intensities was of 8-12% dry-basis. The experimental results showed that drying rate increased with increase of drying temperature whilst specific energy consumption proportionally decreased with increase of drying temperature. For evaluation of equilibrium moisture content (EMC) of pandanus leaf, the results showed that calculated value using BET model is the best fitting with experimental results. Determination of drying kinetic of pandanus leaf replied that simulated data using Page model had a good relation to experimental data. In addition, the diffusion coefficient value

can be evaluated and it relatively depended on drying temperature and can also be explained in form of Arrhenius equation. For product quality analysis, the colorness value (CIELAB) of brightness ( $L^*$ ) increased comparing to control sample and the redness value ( $a^*$ ) was slightly dark. However, the yellowness value ( $b^*$ ) was insignificantly different when drying with temperature of 45-65°C. Percentage of rehydration of dried Pandanus leaf highly related to drying temperature and infrared intensities. Finally, sensory evaluation analysis using Hedonic scale (9-point) showed that total acceptability of dried Pandanus leaf with all drying conditions was in the same value of market point of view.

**Keyword:** Drying kinetics/ Infrared radiation/ Pandanus/ Quality

## 1. บทนำ

ใบเตย (*Pandanus odoratus Ridi.*) เป็นพืชสมุนไพรจำพวกหญ้า มีสารหอมระเหย กลิ่นหอม และมีสารสีเขียวเป็นคลอโรฟิลล์ ใบเตยมีสรรพคุณทางยา คือ ช่วยลดอาการกระหายน้ำ บำรุงหัวใจ และช่วยให้อุณหภูมิร่างกายเย็นลง (ศูนย์ข้อมูลสมุนไพร สถาบันวิจัยสมุนไพร กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข, 2552) ในปัจจุบันสมุนไพรไทยกำลังเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย มีสรรพคุณเป็นยาแผนปัจจุบันและการแพทย์แผนไทย ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งการบำบัด รักษาโรค และพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ อาทิเช่น ใบเตย ดอกกระเจียว ดอกคำฝอย ตะไคร้ ถูกแปรรูปในรูปแบบผลิตภัณฑ์ใบชาสำเร็จรูป ซึ่งนอกจากจะเป็นการชื้ออายุการเก็บรักษาแล้วยังสามารถใช้เป็นเครื่องดื่มสุขภาพนอกฤดูการเก็บเกี่ยวอีกด้วย

ประการหนึ่ง อย่างไรก็ตามจะพบว่าการลดความชื้นในวัสดุสดดังที่กล่าวมาแล้วรวมทั้งใบเตยนั้นมีความสำคัญ เพราะมีผลโดยตรงต่อการคงคุณภาพของสรรพคุณยา กรรมวิธีส่วนใหญ่ที่ปฏิบัติกันทั่วไป จะใช้วิธีการตากแดดให้แห้ง ซึ่งมักประสบปัญหาหลัก ๆ 2 ประการ ได้แก่ ประการที่หนึ่ง ผลิตภัณฑ์จะมีการปนเปื้อนจากฝุ่นละออง สิ่งสกปรก เนื่องจากกรรมวิธีการตากกลางแจ้งจนสถานที่สำหรับใช้ในการตากแห้ง ซึ่งอาจเกิดการปนเปื้อนจากสัตว์และแมลง ประการต่อมา คือ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ตากแห้งที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากระยะเวลาในการตากแห้งอาจไม่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยของแสงอาทิตย์และการไหลของกระแสอากาศในแต่ละวัน แต่ละพื้นที่ [1]

เทคโนโลยีการอบแห้งได้มีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการเลือกใช้แหล่งพลังงานที่เหมาะสม มาใช้ในการอบแห้ง เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ประกอบการในการเลือกใช้ และลดต้นทุนค่าใช้จ่ายสำหรับการอบแห้ง โดยยังคงรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ได้นาน [1] ไม่ว่าจะเป็นการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ รังสีอินฟราเรดและรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า การอบแห้งชาใบหมอนด้วยรังสีอินฟราเรดคลื่นยาวความชื้นจะลดลงเร็วกว่าการอบแห้งด้วยเครื่องลมร้อน [2] การอบแห้งใบกระเพราแดงด้วยรังสีอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าแบบลมร้อน และยังสามารถลดการสูญเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง [3] สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพและอัตราการคืนตัวของวัสดุหลังการอบแห้ง เมื่ออบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน พบว่า เมื่อกำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความสว่างและค่าความเป็นสีเหลืองลดลง แต่กำลังอินฟราเรดไม่มีผลต่อค่าความเป็นสีแดง และอัตราการคืนตัว พบว่า กำลังอินฟราเรด อุณหภูมิลมร้อน และความเร็วลมเพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการคืนตัว [4] ด้วยเหตุนี้การใช้แหล่งพลังงานจากรังสีอินฟราเรดจึงมีความเหมาะสมสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหาร

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาหาแนวทางการอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรด โดยพิจารณาจากผลศาสตร์ของการอบแห้ง คุณภาพของใบเตย ได้แก่ สี ร้อยละการคืนตัวของใบเตย การทดสอบทางประสาทสัมผัสและความเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง

## 2. วัตถุประสงค์และวิธีการทดลอง

### 2.1 วัสดุ

ใบเตยที่ใช้ในการทดลอง ชื้อจากตลาดสดคลองเรียน อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา นำมาล้างให้สะอาด และตัดให้มีขนาด  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  และหาความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน AOAC [5]

### 2.2 อุปกรณ์

2.2.1. เครื่องอบแห้ง แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นมาโดยมีแหล่งพลังงานความร้อน 3 แหล่ง คือ พลังงานความร้อนจากเครื่องทำความร้อน พลังงานความร้อนจากหลอดอินฟราเรด และพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ โดยมีรายละเอียดของเครื่องอบแห้งดังนี้

1) ห้องอบแห้งมีปริมาตร  $60 \times 80 \times 158.5 \text{ cm}^3$  ภายในบุฉนวนใยแก้วหนา 5 cm

- 2) เครื่องทำความร้อนไฟฟ้าขนาด 1000 W 10 ตัว
- 3) แท่งรังสีอินฟราเรดขนาด 500 W จำนวน 3 แท่ง วางในแนวขนานกับถาดอบแห้งและห่างจากวัสดุอบแห้ง 0.12 m
- 4) แผงรับความร้อนทำด้วยแผ่นสังกะสีทาสีดำ เพื่อช่วยในการดูดซับรังสีแสงอาทิตย์ ขนาด  $32.5 \times 133 \times 240$  cm<sup>3</sup> ด้านบนปิดด้วยพลาสติกใส ผนังด้านนอกทำด้วยสังกะสี ภายในบุด้วยฉนวนที่ทำด้วยโพลีเอทิลีนหนา 1 cm เมื่อประกอบเข้ากับตัวเครื่องอบแห้ง วางทำมุมเอียง 14 องศา กับแนวระดับ
- 5) ถาดอบแห้งสแตนเลสมีขนาด  $44 \times 70 \times 5$  cm<sup>3</sup> จำนวน 3 ถาด โดยถาดที่ 1 จากด้านล่าง (3C) ถาดที่ 2 (3B) และถาดที่ 3 (3A) ดังรูปที่ 1
- 6) พัดลม มีใบพัดแบบโค้งหน้าขนาด 1 hp จำนวน 1 ตัว
- 7) ท่ออากาศไหลกลับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm จำนวน 2 ท่อ

2.2.2. เครื่องชั่งน้ำหนักชั่งหือ A&D รุ่น GF 3000 ค่าความละเอียด

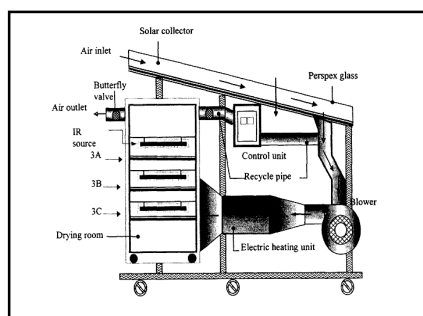
$\pm 0.1$  g

2.2.3. เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิติดกับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K

เพื่อวัดอุณหภูมิภายในตู้อบแห้ง อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิกระเปาะเปียก

2.2.4. ตู้ยี่ห้อ Memmert สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วง  $30-200^{\circ}\text{C}$

2.2.5. เครื่องวัดความเร็วลม ชื่อยี่ห้อ DIGICON รุ่น DA-45 ความละเอียด  $\pm 0.01$  m/s



รูปที่ 1 รายละเอียดของเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง

## 2.3 วิธีการทดลอง

### 2.3.1 การหาความชื้นสมดุล[6]

นำตัวอย่างใบเตยที่มีความชื้นแตกต่างกัน ทำการหาความชื้นสมดุลแบบคายความชื้น โดยชั่งตัวอย่างประมาณ 15-20 g ใส่ลงในตระแกรงรูปทรงกระบอกที่ทราบน้ำหนักแน่นอน

จากนั้นนำไปแขวนไว้ในขวดโหลแก้วที่บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัวของ  $\text{LiCl}$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ปิดขวดฝาให้แน่นสนิทนำไปใส่ในตู้อบ โดยใช้ อุณหภูมิในช่วง  $40-65^{\circ}\text{C}$  ทำการชั่งน้ำหนักจนกว่าน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง จากนั้นนำไปหาค่าความชื้นตามมาตรฐาน AOAC

### 2.3.2 การทดลองอบแห้งใบเตย

1) นำใบเตยที่หั่นแล้ว ใส่ถาดอบแห้ง ถาดละ 330 กรัม เกลี่ยให้ทั่วถาด ทดลองอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรดที่ ความเข้มของรังสีอินฟราเรด 1.62, 3.25 และ  $4.87$  kW/m<sup>2</sup> ตามลำดับ กำหนดอุณหภูมิอบแห้งในช่วง  $45-65^{\circ}\text{C}$

2) บันทึกผลการทดลอง ได้แก่ น้ำหนักกับเวลา อุณหภูมิ กระเปาะเปียก อุณหภูมิกระเปาะแห้ง และอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในตู้อบแห้ง ในตอนเริ่มต้นการทดลองเก็บข้อมูลทุก 10 นาที หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 60 นาที จากนั้นทำการเก็บข้อมูลทุก 20 นาที อบแห้งจนกระทั่งได้ความชื้นสุดท้าย ในช่วง 8-12% มาตรฐานแห้ง

3) บันทึกปริมาณพลังงานที่ใช้ด้วย Watt-hour meter

## 2.4 การวิเคราะห์ผลงานพลศาสตร์การอบแห้ง

### 2.4.1 การวิเคราะห์อัตราการอบแห้งและความชื้นเปลี่ยนแปลง

พลังงานจำเพาะ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง คือ ความชื้นเริ่มต้น ความชื้นสุดท้าย เวลาที่ใช้ในการอบแห้งและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมดในแต่ละสภาวะ เพื่อนำมาคำนวณหาอัตราการอบแห้งและค่าความเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะที่ใช้ตามสมการ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$\text{Drying rate} = \frac{(M_{in} - M_f)}{\text{Drying time}} \times W_d \quad (1)$$

$$\text{SEC} = \frac{3.6 E_p}{(M_{in} - M_f) W_d} \quad (2)$$

เมื่อ  $E_p$  คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้ (kW-h),  $M_{in}$  คือ ความชื้นเริ่มต้นของใบเตย (% dry-basis),  $M_f$  คือ ความชื้นสุดท้ายของใบเตย (% dry-basis),  $W_d$  คือ น้ำหนักแห้ง (kg) และ 3.6 คือ ตัวเลขแปลงหน่วยของพลังงานไฟฟ้า

### 2.4.2 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การแพร่ [6]

ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ได้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลว โดยอาศัยความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้นที่สามารถอธิบายได้ด้วยกฎข้อที่สองของ Fick ดังสมการ (3)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 D_{\text{eff}} M \quad (3)$$

สมมติให้ไบโเดยมีรูปร่างเลขาคณิตเป็นรูปทรงแผ่นแบนราบ กว้างและยาวมาก สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ได้ตั้งสมการ (4)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{p=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(2p+1)^2} \right] \exp \left[ \frac{-(2p+1)^2 \pi^2 Dt}{L^2} \right] \quad (4)$$

เมื่อ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (m<sup>2</sup>/h), t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h), L คือ ความกว้างของวัสดุ (m)

สมการของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการอาร์เรเนียส โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผล (D<sub>eff</sub>) ของไบโเดยเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ (T) และสามารถแสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ ดังสมการ (5)

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp \left( \frac{-E_a}{RT} \right) \quad (5)$$

เมื่อ D<sub>0</sub> คือ ค่าคงตัว, E<sub>a</sub> คือ ค่าพลังงานกระตุ้น (kJ/kmol K), R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 kJ/kmol K), T คือ อุณหภูมิอบแห้ง (K)

#### 2.4.3 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การหารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบต่างๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบาง [7,8]

Model name	Model
Page (1949)	MR = exp(-kt <sup>n</sup> ) (6)
Newton (1987)	MR = exp(-kt) (7)
Henderson and Pabis (1961)	MR = a exp(-kt) (8)
Logarithmic (1947)	MR = a exp(-kt) + c (9)

โดยการพิจารณาค่า RMSE (Root mean square error) และค่า  $\chi^2$  (Chi-square) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (10) และ (11) ตามลำดับ

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2} \quad (10)$$

$$\chi^2 = \frac{1}{N-z} \sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2 \quad (11)$$

## 2.4 การวิเคราะห์คุณภาพไบโเดยหลังการอบแห้ง [8]

### 2.4.1 การวิเคราะห์คุณภาพทางด้านสี

การวัดสีของไบโเดยก่อนและหลังการอบแห้ง ด้วยเครื่อง Hunter Lab รุ่น Color Flex ก่อนการวัดสีแต่ละตัวอย่างจะทำการเทียบกับจานสีขาวมาตรฐาน (X=77.69, Y=82.57, Z=87.92) ตามมาตรฐานระบบ CIE (L\*, a\* และ b\*) โดยค่า L\* แสดงค่าความสว่างและสีค่า a\* แสดงค่าสีแดงและสีเขียว และค่า b\* แสดงค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน ทำการทดสอบ ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย

### 2.4.2 การวิเคราะห์หัตถการคืนตัว

การวิเคราะห์หัตถการคืนตัวของไบโเดยหลังการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ ทำการทดสอบโดยการนำไบโเดยหลังการอบแห้งมาแช่ในน้ำร้อนอุณหภูมิ 90±3°C ระยะเวลา 15 นาที จากนั้นรินน้ำออกและทำการซับน้ำ แล้วชั่งน้ำหนักของตัวอย่างหลังการคืนตัว คำนวณร้อยละการคืนตัวตามสมการ (12)

$$\text{Rehydration Ratio} = \frac{m_f}{m_d} \quad (12)$$

เมื่อ m<sub>f</sub> คือ น้ำหนักของไบโเดยก่อนผ่านกระบวนการคืนตัว (g) และ m<sub>d</sub> คือ น้ำหนักของไบโเดยหลังผ่านกระบวนการคืนตัว (g)

### 2.4.3 การทดสอบทางประสาทสัมผัส (Sensory Evaluation)

การประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง โดยการวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ (Hedonic scale) 1-9 คะแนน (1 = ไม่ชอบมากที่สุด และ 9 = ชอบมากที่สุด) โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน 25-30 คน คุณลักษณะที่ทำการทดสอบคือ กลิ่น สี รสชาติและความยอมรับโดยรวมในรูปของชาไบโเดย

## 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

### 3.1. ความชื้นสมดุล

จากผลการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของไบโเดยแบบการคายความชื้นและพัฒนาให้อยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์สามารถหาค่าคงที่จากสมการความชื้นสมดุลแบบต่างๆ ดังตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 รูปแบบสมการของ BET ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด โดยมีค่า R<sup>2</sup> เท่ากับ 0.985 และค่า RMSE เท่ากับ 0.638 ดังนั้นจึงนำรูปแบบสมการของ BET มาใช้

ในการหาค่าความชื้นสมดุลและนำไปใช้ในการพัฒนา  
 จลนพลศาสตร์ในการอบแห้งใบเตยในหัวข้อต่อไป  
 ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของสมการรูปแบบต่างๆ

Model name	Constant of model R <sup>2</sup> and RMSE
Halsey (1948) $RH = \exp\left(\frac{-A}{RT} M_{eq}\right)^B$	A = 37.71 B = 1.44 R <sup>2</sup> =0.980 RMSE=0.731
Modified Henderson (1952) $1 - RH = \exp\left(-AT_{abs} M_{eq}\right)^B$	A=45.04 B=1×10 <sup>-6</sup> R <sup>2</sup> =0.975 RMSE=0.827
Oswin (1946) $M_{eq} = A\left(\frac{RH}{1 - RH}\right)^B$	A=0.069 B=0.540 R <sup>2</sup> =0.959 RMSE=1.059
BET (Bunauer et al 1938) $\ln \frac{RH}{(1 - RH)M_{eq}}$ $= \frac{1}{M_m C} + \frac{(C - 1)RH}{M_m C}$	M <sub>m</sub> =0.066-7.9×10 <sup>-6</sup> T C=40.559-0.00015T R <sup>2</sup> =0.985 RMSE=0.638

**3.2 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง**

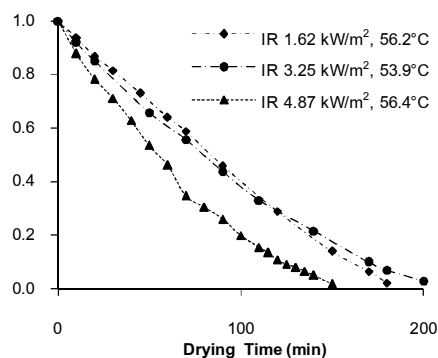
จากผลการทดลองการอบแห้งใบเตย โดยใช้สภาวะการ  
 อบแห้งต่าง ๆ และคำนวณหาค่าอัตราส่วนความชื้นที่เวลาต่าง ๆ  
 ดังสมการ (13) และผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2

$$MR = \text{Moisture ratio} = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (13)$$

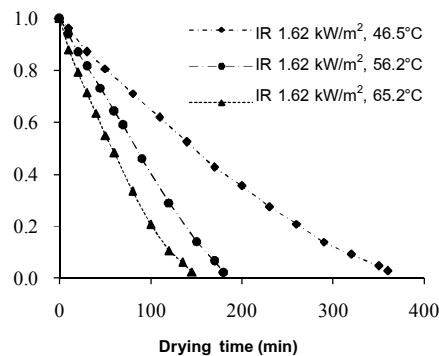
เมื่อ M<sub>in</sub> คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (% dry-basis), M<sub>t</sub>  
 คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ ของวัสดุ (% dry-basis), M<sub>eq</sub> คือ  
 ความชื้นสมดุล (% dry-basis)

จากรูปที่ 2-3 แสดงจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบเตย  
 โดยความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 400-600 % dry-basis และ  
 ความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 8-12 % dry-basis พบว่า เมื่อ  
 อุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ที่ความเข้มของรังสีอินฟราเรดค่าหนึ่งจะ  
 ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม  
 มากขึ้นส่งผลให้มีกระเดียนท์ของอุณหภูมิต่างระหว่างแหล่ง  
 พลังงานและวัสดุมีค่าเพิ่มมากขึ้น อัตราการถ่ายโอนความชื้นยิ่ง

สูงมากขึ้น และพบว่าเมื่อความเข้มของรังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้น  
 จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงด้วยเช่นกัน เนื่องจากการ  
 อบแห้งด้วยความเข้มของรังสีอินฟราเรดที่เพิ่มมากขึ้น เป็นการ  
 ให้กำลังของพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีอินฟราเรดที่ตก  
 กระทบบนพื้นผิววัสดุมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้วัสดุได้รับพลังงาน  
 ความร้อนเพิ่มมากขึ้นในช่วงเวลาที่เท่ากัน มีผลทำให้อัตราการ  
 อบแห้งเร็วขึ้นเมื่อความเข้มของรังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2 อัตราส่วนความชื้นของใบเตยกับเวลาที่ใช้ในการ  
 อบแห้ง ความเข้มของรังสีอินฟราเรด 1.62 kW/m<sup>2</sup> อุณหภูมิ  
 อบแห้ง 45-65°C ความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 400-600 % dry-  
 basis



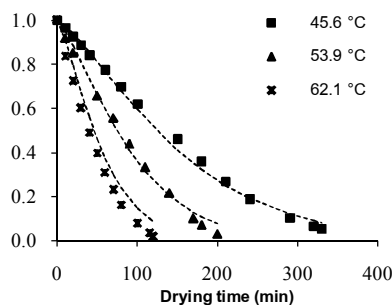
รูปที่ 3 ปัจจัยของความเข้มรังสีอินฟราเรด

**3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบาง**

จากการทดลองสามารถหารูปแบบจำลองทาง  
 คณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง  
 ได้ โดยพิจารณาค่า R<sup>2</sup> และ RMSE

ตารางที่ 3 สมการและค่าคงตัวของสมการเอมพิริคัล สำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบเตย ที่ความเข้มข้นของรังสีอินฟราเรดในช่วง 1.62-4.87 kW/m<sup>2</sup> อุณหภูมิอบแห้ง 45-65°C

Model and constant of model	RMSE
Page model k = 3.9834×10 <sup>8</sup> exp(-1.0163×10 <sup>3</sup> /RT) n = 1.3157	R <sup>2</sup> =0.9665 χ <sup>2</sup> =0.0037 RMSE =0.0605
Newton model k = 3.6471×10 <sup>6</sup> exp(-5.3514×10 <sup>4</sup> /RT)	R <sup>2</sup> =0.9475 χ <sup>2</sup> =0.0059 RMSE =0.0757
Henderson and Pabis model k = 3.5448×10 <sup>6</sup> exp(-5.3279×10 <sup>4</sup> /RT) a = 1.0547	R <sup>2</sup> =0.9522 χ <sup>2</sup> =0.0053 RMSE =0.0723
Logarithmic model k = 1.9541×10 <sup>6</sup> exp(-5.2882×10 <sup>4</sup> /RT) a = 1.2748 c = -0.2575	R <sup>2</sup> =0.9660 χ <sup>2</sup> =0.0038 RMSE =0.0610



รูปที่ 4 อัตราส่วนความชื้นจากผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชิ้นบางของ Page ที่ความเข้มข้นของรังสีอินฟราเรด 3.25 kW/m<sup>2</sup> อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 45-65°C

จากตารางที่ 3 พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบเตยที่ความเข้มข้นของรังสีอินฟราเรดในช่วง 1.62-4.87 kW/m<sup>2</sup> อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 45-65 °C คือ แบบจำลองของ Page ซึ่งพิจารณาจากค่า R<sup>2</sup> ที่สูงสุด ค่า χ<sup>2</sup> และค่า RMSE ที่ต่ำสุด คือ 0.9665 0.0037 และ 0.0605 ตามลำดับ และจากรูปที่ 4 พบว่าผลการทำนายจากสมการแบบจำลองของ Page มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง

### 3.4 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

จากการทดลองอบแห้งชิ้นบางของใบเตย พบว่าการอบแห้งอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง และตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าใบเตยมีรูปร่างเลขาคณิตเป็นรูปทรงแผ่นแบนราบกว้างและยาวมาก ในการคำนวณใช้ความยาวของใบเตยเท่ากับ 0.5 cm

จากการพิจารณาสมการอบแห้งชิ้นบางและรูปร่างเลขาคณิต สามารถเขียนสมการอนุพันธ์การแพร่ความชื้น ในรูปอัตราส่วนความชื้น พิจารณาเพียงสามเทอมแรกของสมการอบแห้ง ได้ดังสมการ (14)

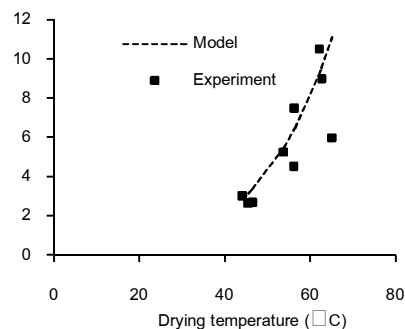
$$MR = \left( \frac{8}{\pi} \right) \left[ \exp \left\{ -\frac{\pi^2 Dt}{L^2} \right\} + \frac{1}{9} \exp \left\{ -\frac{9\pi^2 Dt}{L^2} \right\} + \frac{1}{25} \exp \left\{ -\frac{25\pi^2 Dt}{L^2} \right\} \right] \quad (14)$$

สมการของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของใบเตยสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผล (D<sub>eff</sub>) ของใบเตยเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ (T) และสามารถแสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ ดังสมการ (15)

$$D_{eff} = 8.5716 \times 10^9 \exp \left( \frac{-57564.348}{RT} \right) \quad (15)$$

R<sup>2</sup> = 0.9522

จากสมการ (15) จะได้ ค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 57564.348 kJ/kmol K และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของใบเตยจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลกับอุณหภูมิอบแห้งความเข้มข้นของรังสีอินฟราเรดในช่วง 1.25-3.25 kW/m<sup>2</sup> อุณหภูมิอบแห้ง 45-65°C ความชื้นเริ่มต้น 400-600% dry-basis



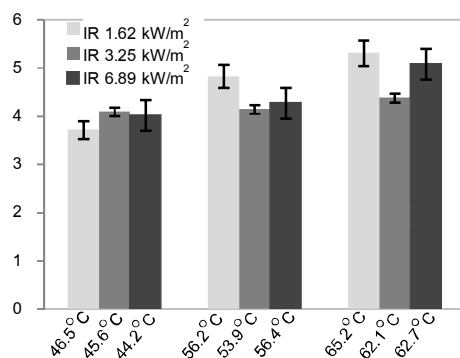
### 3.5 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้สมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

จากผลการทดลองแสดงอัตราการอบแห้งเฉลี่ยและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งใบเตยที่สภาวะต่าง ๆ

Drying temp. (°C)	Drying time (min)	Initial (Final) moisture content (% dry basis)	Average drying rate (kg/h)	SEC (MJ/kg H <sub>2</sub> O evap.)
Infrared intensity 1.62 kW/m <sup>2</sup>				
46.5	360	434.8 (13.5)	0.0422	10.17
56.2	180	392.1 (10.6)	0.0863	9.18
65.2	145	383.8 (10.0)	0.1103	10.17
Infrared intensity 3.25 kW/m <sup>2</sup>				
45.6	330	597.4 (33.0)	0.0560	9.91
53.9	200	535.5 (17.6)	0.1310	9.97
62.1	120	433.2 (8.4)	0.1208	9.61
Infrared intensity 4.87 kW/m <sup>2</sup>				
44.2	375	470.8 (11.8)	0.0482	10.08
56.4	150	472.5 (11.0)	0.0892	8.72
62.7	135	471.1 (8.1)	0.1103	6.71

### 3.6 อัตราการคืนตัว



รูปที่ 6 อัตราการคืนตัวของใบเตยอบแห้ง ที่ความเข้มข้นของรังสีอินฟราเรด 1.62, 3.25 และ 4.87 kW/m<sup>2</sup> อุณหภูมิ 45-65°C

จากรูปที่ 6 พบว่า เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะมีร้อยละการคืนตัวมากกว่าอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ และเปรียบเทียบความเข้มข้นรังสีอินฟราเรดต่าง ๆ กัน พบว่า ความเข้มข้นของอินฟราเรดเท่ากับ 4.87 kW/m<sup>2</sup> ส่งผลต่อร้อยละการคืนตัวของใบเตยสูงกว่าความเข้มข้นของรังสีอินฟราเรดต่ำกว่า เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของรังสีอินฟราเรดส่งผลให้โครงสร้างภายในวัสดุที่มีรูพรุนเกิดการขยายตัว ซึ่งเกิดจากการดันตัวของความดันภายในวัสดุที่พยายามดันตัวออกมา [9]

### 3.7 ผลการวิเคราะห์คุณภาพด้านสี

ผลการทดสอบคุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ สีของใบเตยก่อนและหลังการอบแห้ง แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าสีของใบเตยก่อนและหลังการอบแห้งของใบเตยที่สภาวะต่าง ๆ

Drying temp. (°C)	Color of products			
	Lightness (L*)	Redness (a*)	Yellowness (b*)	ΔE*
Infrared intensity 1.62 kW/m <sup>2</sup>				
Fresh	29.92±1.01 <sup>a</sup>	-10.83±0.45 <sup>a</sup>	20.72±1.69 <sup>b</sup>	38.03±1.30 <sup>ab</sup>
46.5	37.10±1.99 <sup>c</sup>	-6.92±0.06 <sup>ef</sup>	19.59±0.03 <sup>b</sup>	42.54±1.74 <sup>c</sup>
56.2	41.18±1.02 <sup>d</sup>	-8.28±0.50 <sup>b</sup>	18.68±1.36 <sup>b</sup>	45.99±1.56 <sup>d</sup>
65.2	47.63±1.52 <sup>f</sup>	-8.39±0.21 <sup>b</sup>	19.69±0.54 <sup>b</sup>	52.22±1.55 <sup>e</sup>
Infrared intensity 3.25 kW/m <sup>2</sup>				
45.6	32.10±0.01 <sup>ab</sup>	-6.95±0.05 <sup>def</sup>	14.09±0.09 <sup>a</sup>	35.73±0.05 <sup>a</sup>
53.9	35.25±0.02 <sup>c</sup>	-5.66±0.05 <sup>g</sup>	14.67±0.01 <sup>a</sup>	38.60±0.02 <sup>ab</sup>
62.1	43.00±0.01 <sup>de</sup>	-7.68±0.02 <sup>bcd</sup>	19.90±0.02 <sup>b</sup>	48.00±0.01 <sup>d</sup>
Infrared intensity 4.87 kW/m <sup>2</sup>				
44.2	34.74±0.01 <sup>bc</sup>	-6.36±0.01 <sup>fg</sup>	19.26±0.03 <sup>b</sup>	40.23±0.02 <sup>bc</sup>
56.4	36.55±0.01 <sup>c</sup>	-7.39±0.03 <sup>cdg</sup>	15.83±0.04 <sup>a</sup>	40.51±0.02 <sup>bc</sup>
62.7	44.37±0.33 <sup>e</sup>	-7.87±0.10 <sup>bc</sup>	18.56±0.14 <sup>b</sup>	48.74±0.36 <sup>d</sup>

Note: Different superscripts in the same column mean that the values are significantly different at 95 % confidence level (p<0.05)

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

จากตารางที่ 5 ผลการทดสอบวัดสีของใบเตยที่สภาวะต่าง ๆ พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าสีสว่าง (L\*) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่มีผลต่อค่าความเป็นสีเขียว (a\*) และสีเหลือง (b\*) เพียงเล็กน้อย และการเปลี่ยนแปลงสีรวมเมื่อ

เปรียบเทียบกับสีของใบเตยสดในรูปของ  $\Delta E^*$  พบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่า  $\Delta E^*$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ความเข้มของรังสีอินฟราเรด 1.62 kW/m<sup>2</sup> อุณหภูมิอบแห้ง 65.2°C จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่า  $\Delta E^*$  สูงสุด และเมื่อเปรียบเทียบที่ความเข้มของรังสีอินฟราเรดต่าง ๆ กัน พบว่า ความเข้มของรังสีอินฟราเรดไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของใบเตยหลังการอบแห้ง

### 3.8 การทดสอบทางประสาทสัมผัสของใบเตยหลังการอบแห้ง

ผลการทดสอบการทดสอบทางประสาทสัมผัส ได้แก่ กลิ่น สี รสชาติและความยอมรับโดยรวม แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของใบเตยหลังการอบแห้งที่มีสภาวะอบแห้งต่าง ๆ

Drying Temp. (°C)	Characteristic of products			
	Odor	Color	Flavor	Overall Acceptability
Infrared intensity 1.62 kW/ m <sup>2</sup>				
45.6	7.3 <sup>f</sup>	5.1 <sup>a</sup>	6.1 <sup>a</sup>	6.2 <sup>a</sup>
56.2	6.9 <sup>c</sup>	5.3 <sup>b</sup>	6.8 <sup>c</sup>	6.3 <sup>c</sup>
62.1	7.3 <sup>f</sup>	6.2 <sup>f</sup>	7.1 <sup>h</sup>	6.9 <sup>e</sup>
Infrared intensity 3.25 kW/ m <sup>2</sup>				
45.6	7.1 <sup>d</sup>	5.5 <sup>c</sup>	6.9 <sup>f</sup>	6.5 <sup>d</sup>
53.9	7.5 <sup>e</sup>	6.5 <sup>e</sup>	7.1 <sup>h</sup>	7.0 <sup>h</sup>
62.1	7.2 <sup>c</sup>	6.9 <sup>b</sup>	6.3 <sup>c</sup>	6.8 <sup>f</sup>
Infrared intensity 4.87 kW/ m <sup>2</sup>				
44.2	6.2 <sup>a</sup>	6.9 <sup>i</sup>	6.3 <sup>b</sup>	6.5 <sup>d</sup>
56.4	6.8 <sup>b</sup>	5.6 <sup>d</sup>	6.6 <sup>d</sup>	6.3 <sup>b</sup>
62.7	7.1 <sup>d</sup>	5.8 <sup>c</sup>	7 <sup>e</sup>	6.6 <sup>c</sup>

Note: Different superscripts in the same column mean that the values are significantly different at 95 % confidence level (p<0.05)

1=Extremely dislike    2=Very much dislike    3=Moderately dislike  
4=Slightly dislike    5=Like nor dislike    6=Slightly like  
7=Moderately like    8=Very much like    9=Extremely like

จากตารางที่ 6 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของใบเตยที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ แล้วนำมาทำการทดสอบความพึงพอใจ โดยทำการทดสอบในด้านกลิ่น สี รสชาติและความยอมรับโดยรวมพบว่า ใบเตยที่ผ่านการอบแห้ง

ที่ความเข้มของรังสีอินฟราเรดเท่ากับ 1.62 kW/m<sup>2</sup> เมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มมากขึ้น คุณภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านกลิ่น สี รสชาติและความยอมรับโดยรวมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่ที่ความเข้มของรังสีอินฟราเรด เท่ากับ 3.25 kW/m<sup>2</sup> และ 4.87 kW/m<sup>2</sup> ไม่พบปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้ง โดยมีความชอบของกลิ่น รสชาติ และความยอมรับโดยรวมในระดับความชอบเป็น 6 ถึง 7 แสดงถึงความชอบน้อยจนกระทั่งถึงชอบปานกลาง ส่วนความชอบสีของใบเตยที่ซังกับน้ำร้อนนอยู่ในระดับความชอบ 5.1 ถึง 6.9 แสดงถึงความชอบน้อยมากถึงปานกลาง

### 4. สรุปผลการทดลอง

- 1) เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง ส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น โดยอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการอบแห้งมากกว่าความเข้มของรังสีอินฟราเรด
- 2) ความชื้นสมดุลของใบเตย ในช่วงอุณหภูมิ 40-65 °C เมื่อนำมาวิเคราะห์หารูปแบบสมการที่เหมาะสม พบว่าแบบจำลองของ BET สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด
- 3) อัตราส่วนความชื้นจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาและอุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น และเมื่อนำมาวิเคราะห์หารูปแบบสมการที่เหมาะสม พบว่าแบบจำลองของ Page สามารถอธิบายผลการทดลองได้ครอบคลุมที่สุด
- 4) สัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าลดลง เมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้นและจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้น
- 5) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรด พบว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งลดลง เนื่องจากระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งใบเตยสั้นลง โดยความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ความเข้มของรังสีอินฟราเรด 4.87 kW/m<sup>2</sup> อุณหภูมิอบแห้ง 62.7°C มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด

6) ผลการทดสอบคุณภาพได้แก่ สีและร้อยละการคืนตัว พบว่า การใช้อุณหภูมิการอบแห้งสูง ส่งผลให้ความสว่าง (L\*) และค่าร้อยละการคืนตัวสูงขึ้น และจากการทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่าที่ความเข้มของรังสีอินฟราเรดเท่ากับ 1.62 kW/m<sup>2</sup> เมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มมากขึ้น คุณภาพของผลิตภัณฑ์ในทุกด้านมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่ที่ความเข้มของรังสีอินฟราเรด เท่ากับ 3.25 kW/m<sup>2</sup> และ 4.87 kW/m<sup>2</sup> ไม่พบปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้ง

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนการศึกษาในโครงการทุนดริ-โท 5 ปี ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์ และบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนวิจัยนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สมชาติ โสภณธนฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ. 338 หน้า.
- [2] Wanyo, P., Meeso, N., Dondee, S. and Siriamornpun, S. 2009. Feasibility of Mulberry Tea Drying Using Combination of Far-Infrared Radiation and Air Convection. *J. Agric. Sci.*, 40(1) (Suppl.): 497-500.
- [3] Apintanapong, M. 2009. Infrared Drying of Holy Basil Leaves and Its Effect on Sensory Characteristics. *J. Agric. Sci.*, 40(3) (Suppl.): 69-72.
- [4] Nuthong, P., Achariyaviriya, A., Namsanguan, K. and Achariyaviriya, S. 2011. Kinetics and Modeling of Whole Longan with Combined Infrared and Hot Air. *J. Food Eng.*, 102: 233-239.
- [5] AOAC. 1995. Official Method of Analysis, 16th ed., The Association of Official Analytical Chemists. Inc. Arlington, Virginia, USA.
- [6] Tirawanichakul, S., Prachayawarakorn, S. and Sniso, E. 2008. Paddy dehydration by adsorption: Thermo-Physical Properties and Diffusion Model of Agriculture Residues. *Biosys. Eng.*, 99: 249-255.
- [7] Hii, C.L., Law, C.L. and Cloke, M. 2009. Modeling Using A New Thin Layer Drying Model and Product Quality of Cocoa. *J. Food Eng.*, 90: 191-198.
- [8] Tirawanichakul, S., Linpo, P. and Tirawanichakul, Y. 2009. Influence of Infrared and Heat Convection On Drying Kinetics of Shrimp and Quality. *Thai Journal of Physics*, 4: 116-120.
- [9] Sharma, G.P., Verma, R.C. and Pathare, P.B. 2005. Thin-layer Infrared Radiation Drying of Onion Slices. *J. Food Eng.*, 67(3): 361-366.

## ภาคผนวก ง

การประชุมวิชาการระดับชาติเครือข่ายวิจัยสถาบันอุดมศึกษาทั่วประเทศ ประจำปี 2554  
การประชุมวิชาการและเสนอผลงานวิจัยมหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 21 ประจำปี 2554  
และการประชุมวิชาการระดับนานาชาติทางด้านพลังงานทดแทนในประเทศกำลังพัฒนาและ  
เศรษฐกิจใหม่ (วิถีสคน วิถีชุมชน วิถีแห่งปัญญา)  
วันที่ 25-28 พฤษภาคม 2554

## จลนพลศาสตร์การอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและลมร้อน

### Drying Kinetics of Pandanus Leaf by Infrared Radiation Combine Hot Air and Hot Air

อนุสรานาดิ<sup>1\*</sup>, ยุทธนา ฎิระวณิชชกุล<sup>2</sup> และ สุภวรรณ ฎิระวณิชชกุล<sup>3</sup>

Anusara Nadee<sup>1\*</sup> Yutthana Tirawanichakul<sup>2</sup> and Supawan Tirawanichakul<sup>3</sup>

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการอบแห้งใบเตยเพื่อใช้ทำชาด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน โดยเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะพิจารณาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง คุณภาพของใบเตยหลังการอบแห้ง และความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง การทดลองอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 45-65°C กำลังรังสีอินฟราเรด 500 และ 1000 W ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของใบเตยอยู่ในช่วง 400-600% มาตรฐานแห้ง และ 8-12% มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ จากผลการทดลอง พบว่า อัตราการอบแห้งจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น แต่ค่าความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะลดลง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่ใช้ทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 1000 W ร่วมกับลมร้อน และการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว คือ แบบจำลอง Logarithmic ส่วนแบบจำลองที่ใช้ทำนายการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 500 W ร่วมกับลมร้อน คือ แบบจำลองของ Page โดยผลการทดลองที่ค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองดังกล่าว ในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ พบว่า ร้อยละการคืนตัวและค่าสีในระบบ CIE (L\*, a\* และ b\*) แสดงให้เห็นว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 95%

**คำสำคัญ:** จลนพลศาสตร์การอบแห้ง/รังสีอินฟราเรด/ใบเตย/คุณภาพ

#### Abstract

The objective of this research was to study drying of Pandanus leaf for herbal tea by infrared radiation (IR) combine hot air (HA). Determination of drying kinetics, physical quality and specific energy consumption were presented. The experiments were carried out under the conditions of infrared radiation power value of 1000 and 500 W and drying temperature range between 45 and 65°C. initial moisture content of Pandanus leaf was between 400 and 600% dry-basis and the final moisture content of dried leaf with all three IR was of 8-12% dry-basis. The experimental results showed that drying rate increased with increase of drying temperature whilst specific energy consumption proportionally decreased with increase of drying temperature. Determination of drying kinetic of Pandanus leaf replied that simulated data using Logarithmic model for IR1000W+HA and HA. Using Page model for IR500W+HA had a good relation to experimental data. For product quality analysis, percentage of rehydration and the colorness value (CIELAB:L\*, a\* and b\*) from IR+HA and HA dried Pandanus leaf, significantly ( $P \leq 0.05$ ).

**Keyword:** Drying kinetics/Infrared radiation/Pandanus/Quality

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ <sup>2</sup>รศ.ดร., ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ <sup>3</sup>รศ.ดร., ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

\* Corresponding author: e-mail: anusara\_nadee@hotmail.com

## บทนำ

ใบเตย (*Pandanus odoratus Ridi.*) เป็นพืชสมุนไพรจำพวกหญ้า มีสารหอมระเหย กลิ่นหอม และมีสารลิเทียมเป็นคลอโรฟิลล์ ใบเตยมีสรรพคุณทางยา คือ ช่วยลดอาการกระหายน้ำ บำรุงหัวใจ และช่วยให้สดชื่น เป็นต้น (ศูนย์ข้อมูลสมุนไพร สถาบันวิจัยสมุนไพร กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข, 2552) ในปัจจุบันสมุนไพรไทยกำลังเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย มีสรรพคุณเป็นยาแผนปัจจุบันและการแพทย์แผนไทย ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งการบำบัด รักษาโรค และพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ อาทิเช่น ใบเตย ดอกกระเจี๊ยบ ดอกคำฝอย ตะไคร้ ถูกแปรรูปในรูปแบบผลิตภัณฑ์ใบชาชงสำเร็จรูป ซึ่งนอกจากจะเป็นการยืดอายุการเก็บรักษาแล้วยังสามารถใช้เป็นเครื่องดื่มสุขภาพนอกฤดูการเก็บเกี่ยวอีกประการหนึ่ง อย่างไรก็ตามการลดความชื้นในวัสดุสดตั้งที่กล่าวมาแล้วรวมทั้งใบเตยนั้นมีความสำคัญ เพราะมีผลโดยตรงต่อการคงคุณภาพของสรรพคุณยากรรมวิธีส่วนใหญ่ที่ปฏิบัติกันทั่วไป จะใช้วิธีการตากแดดให้แห้ง ซึ่งมักประสบปัญหาหลัก ๆ 2 ประการ ได้แก่ ประการที่หนึ่ง ผลิตภัณฑ์จะมีการปนเปื้อนจากฝุ่นละออง สิ่งสกปรก เนื่องจากกรรมวิธีการตากกลางแจ้งบนสถานที่สำหรับการใช้ในการตากแห้ง ซึ่งอาจเกิดการรบกวนจากสัตว์และแมลง ประการต่อมา คือ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ตากแห้งที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากระยะเวลาในการตากแห้งอาจไม่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นกับปัจจัยของแสงอาทิตย์และการไหลของกระแสอากาศในแต่ละวัน แต่ละพื้นที่ (สมชาติ, 2540)

เทคโนโลยีการอบแห้งได้มีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการเลือกใช้แหล่งพลังงานที่เหมาะสม มาใช้ในกระบวนการอบแห้ง เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ประกอบการในการเลือกใช้ และลดต้นทุนค่าใช้จ่ายสำหรับการกระบวนการผลิต โดยยังคงรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ได้นาน (สมชาติ, 2540) ไม่ว่าจะเป็นการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ รังสีอินฟราเรดและรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า การอบแห้งชาใบหม่อนด้วยรังสีอินฟราเรดคลื่นยาวความชื้นจะลดลงเร็วกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน (Wanyo *et al.*, 2009) การอบแห้งใบกระเพราแดงด้วยรังสีอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าแบบลมร้อน และยังสามารถลดการสูญเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง (Apintanapong, 2009) สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพสีและอัตราการคืนตัวของวัสดุหลังการอบแห้ง เมื่ออบแห้งลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน พบว่า เมื่อกำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความสว่างและค่าความเป็นสีเหลืองลดลง แต่กำลังอินฟราเรดไม่มีผลต่อค่าความเป็นสีแดง และอัตราการคืนตัว พบว่า กำลังอินฟราเรด อุณหภูมิลมร้อน และความเร็วลมเพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการคืนตัว (Nuthong *et al.*, 2011) ด้วยเหตุนี้การใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนจึงมีความเหมาะสมสำหรับกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหาร

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาหาแนวทางการอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรด และรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน โดยพิจารณาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง คุณภาพของใบเตย ได้แก่ สี และร้อยละการคืนตัวของใบเตย และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง

## วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### วัสดุ

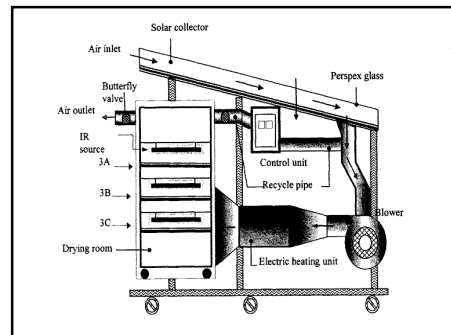
ใบเตยที่ใช้ในการทดลอง จากตลาดสดปลาช่อน อ. หาดใหญ่ จ.สงขลา นำมาล้างให้สะอาด และตัดให้มีขนาด  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  และหาความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน AOAC (1995)

## อุปกรณ์

1. เครื่องอบแห้ง แสดงดังภาพที่ 1 ซึ่งเป็นเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นมาโดยมีแหล่งพลังงานความร้อน 3 แหล่ง คือ พลังงานความร้อนจากเครื่องทำความร้อน พลังงานความร้อนจากหลอดอินฟราเรด และพลังงานความร้อนจากแสง-

อาทิตย์ โดยมีรายละเอียดของเครื่องอบแห้งดังนี้

- 1) ห้องอบแห้งมีปริมาตร  $60 \times 80 \times 158.5 \text{ cm}^3$  ภายในบุ ฉนวนใยแก้ว หนา 5 ซม
- 2) เครื่องทำความร้อน ไฟฟ้าขนาด 1000 W 10 ตัว
- 3) แท่งรังสีอินฟราเรดขนาด 500 W จำนวน 3 แท่งวางในแนวขนานกับถาดอบแห้งและห่างจากวัสดุอบแห้ง 0.12 m
- 4) แผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด  $32.5 \times 133 \times 240 \text{ cm}^3$  วางทำมุมเอียง 14 องศา กับแนวระดับ
- 5) ถาดอบแห้งสแตนเลสขนาด  $44 \times 70 \times 5 \text{ cm}^3$  จำนวน 3 ถาด ดังรูป (3C เป็นถาดล่าง 3B เป็นถาดที่ 2 และ 3A เป็นถาดที่ 3)
- 6) พัดลม มีใบพัดแบบ โคงีหน้าขนาด 1 hp จำนวน 1 ตัว
- 7) ท่ออากาศไหลกลับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm จำนวน 2 ท่อ



ภาพที่ 1 รายละเอียดของเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการอบแห้งทดลอง

2. เครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ A&D รุ่น GF 3000 ค่าความละเอียด  $\pm 0.1 \text{ g}$
3. เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิต่อกับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K เพื่อวัดอุณหภูมิภายในตู้อบแห้ง อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิกระเปาะเปียก

## วิธีการวิจัย

การทดลองอบแห้งใบเตย

- 1) นำใบเตยที่หั่นแล้ว ใส่ถาดอบแห้ง ถาดละ 330 กรัม เกลี่ยให้ทั่วถาด ทดลองอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ  $45-65^{\circ}\text{C}$  ความเร็วลมร้อน  $1.1 \text{ m/s}$  สำหรับรังสีอินฟราเรดทดลองที่กำลังรังสีอินฟราเรด 500 W และ 1000 W
- 2) บันทึกผลการทดลอง ได้แก่ น้ำหนักกับเวลา อุณหภูมิกระเปาะเปียก อุณหภูมิกระเปาะแห้ง และอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในตู้อบแห้ง ในตอนเริ่มต้นการทดลองเก็บข้อมูลทุก 10 นาที หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 60 นาที จากนั้นทำการเก็บข้อมูลทุก 20 นาที กำหนดความชื้นสุดท้ายใบเตยช่วง 8-12% มาตรฐานแห้ง
- 3) บันทึกปริมาณพลังงานที่ใช้ด้วย Watt-hour meter

### การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

#### 1. การวิเคราะห์อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง คือ ความชื้นเริ่มต้น ความชื้นสุดท้าย เวลาที่ใช้ในการอบแห้งและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมดในแต่ละสภาวะ เพื่อนำมาคำนวณหาอัตราการอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ตามสมการ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$\text{Drying rate} = \frac{(M_{in} - M_f)W_d}{\text{Drying time}} \quad (1)$$

$$\text{SEC} = \frac{3.6 E_p}{(M_{in} - M_f) W_d} \quad (2)$$

เมื่อ  $E_p$  คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้ (kW-h),  $M_{in}$  คือ ความชื้นเริ่มต้นของใบเตย (% dry-basis),  $M_f$  คือ ความชื้นสุดท้ายของใบเตย (% dry-basis),  $W_d$  คือ น้ำหนักแห้ง (kg) และ 3.6 คือ ตัวเลขแปลงหน่วยของพลังงานไฟฟ้า

#### 2. การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การหารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง ได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบต่าง ๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง (Hii *et al.*, 2009 and Tirawanichakul *et al.*, 2009)

Name of model	Model equation
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
Two term	$MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$
Logistic	$MR = a / (1 + \exp(kt))$

โดยพิจารณาค่า RMSE (Root mean square error) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2} \quad , \text{เมื่อ } N \text{ คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด} \quad (3)$$

### การวิเคราะห์คุณภาพใบเตยหลังการอบแห้ง (Tirawanichakul *et al.*, 2009)

#### 1. การวิเคราะห์คุณภาพทางด้านสี

การวัดสีของใบเตยก่อนและหลังการอบแห้ง ด้วยเครื่อง Hunter Lab รุ่น Color Flex ก่อนการวัดสีแต่ละตัวอย่างจะทำการเทียบกับงานสีขาวมาตรฐาน ( $X=77.69$ ,  $Y=82.57$ ,  $Z=87.92$ ) ตามมาตรฐานระบบ CIE ( $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$ ) โดยค่า  $L^*$  แสดงค่าความสว่างและสีดํา ค่า  $a^*$  แสดงค่าสีแดงและสีเขียว และค่า  $b^*$  แสดงค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน ทำการทดสอบ ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย

#### 2. การวิเคราะห์ร้อยละการคืนตัว



การวิเคราะห์ร้อยละการคืนตัวของใบเตยหลังการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ ทำการทดสอบโดยการนำใบเตยหลังการอบแห้งมาแช่ในน้ำร้อนอุณหภูมิ  $90 \pm 3^{\circ}\text{C}$  ระยะเวลา 15 นาที จากนั้นรินน้ำออกและทำการชั่งน้ำหนัก แล้วชั่งน้ำหนักของตัวอย่างหลังการคืนตัว คำนวณร้อยละการคืนตัวตามสมการ (4)

$$\% \text{Rehydration} = \frac{m_f}{m_d} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ  $m_d$  คือ น้ำหนักของใบเตยก่อนผ่านกระบวนการคืนตัว (g) และ  $m_f$  คือ น้ำหนักของใบเตยหลังผ่านกระบวนการคืนตัว (g)

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

#### จลนพลศาสตร์การอบแห้งและสมการทางคณิตศาสตร์ (สมการเอมพิริคัล)

จากผลการทดลองการอบแห้งใบเตย โดยใช้สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ และคำนวณหาค่าอัตราส่วนความชื้นที่เวลาต่าง ๆ ดังสมการ (5) และผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 2

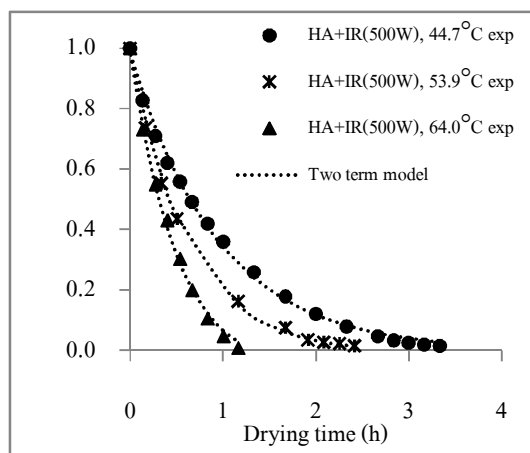
$$\text{MR} = \text{Moisture ratio} = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (5)$$

ค่า  $M_{eq}$  หาได้จากสมการของ BET (Brunauer-Emmett-Teller) ดังสมการ

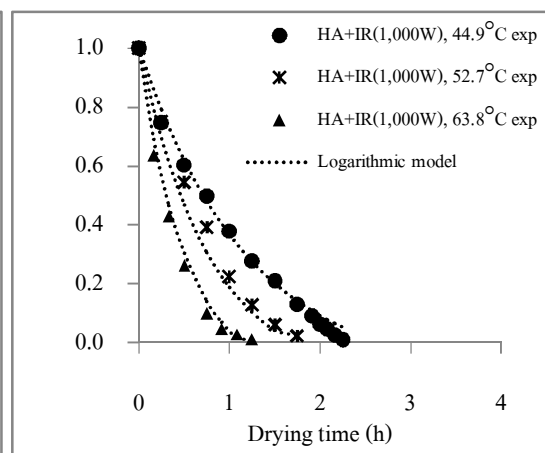
$$\ln \frac{\text{RH}}{(1 - \text{RH})M_{eq}} = \frac{1}{M_m C} + \frac{(c - 1)\text{RH}}{M_m C} \quad (6)$$

โดย  $M_m = 1.4694 - 0.0050T$   $C = -0.3715 - 0.0025T$

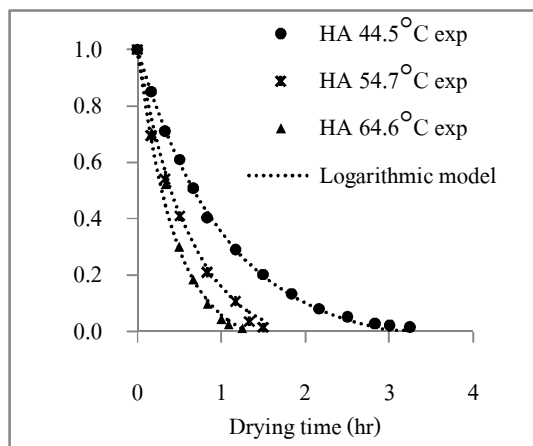
เมื่อ  $M_{in}$  คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (% dry-basis),  $M_t$  คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ ของวัสดุ (% dry-basis),  $M_{eq}$  คือ ความชื้นสมดุล (% dry-basis), RH (Relative Humidity) คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (0.1-0.9) และ T คือ อุณหภูมิอบแห้ง ( $^{\circ}\text{C}$ )



(a)



(b)



(c)

ภาพที่ 2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 500 W (a) และ 1,000 W (b) ร่วมกับลมร้อน และลมร้อนเพียงอย่างเดียว (c)

จากภาพที่ 2 แสดงจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบเตย โดยความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 400-600% dry-basis และความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 8-12% dry-basis พบว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มมากขึ้นเกรเดียนต์ ของอุณหภูมิระหว่างแหล่งพลังงานและวัสดุจะเพิ่มมากขึ้น อัตราการถ่ายโอนความชื้นยิ่งสูงมากขึ้น ผลทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น และผลการทำนายการอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรด 1000 W ร่วมกับลมร้อน และลมร้อนเพียงอย่างเดียว จากสมการแบบจำลอง Logarithmic มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง ส่วนแบบจำลองที่สามารถทำนายการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 500 W ร่วมกับลมร้อน คือ แบบจำลองของ Page โดยสามารถแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของสมการอบแห้งเอมพิริคัล

Name of model	Parameter	R <sup>2</sup>	RMSE	$\chi^2$
HA+HR(500 W)				
Newton	k=-19.787+0.066T	0.9943	0.0215	0.0005
Page	k=-19.309+0.064T n=0.982	0.9944	0.0215	0.0005
Henderson and Pabis	k=-19.557+0.065T a=0.987	0.9945	0.0211	0.0004
Logarithmic	k=-18.716+0.062T a=0.998 c=-0.018	0.9950	0.0198	0.0004
<u>Two term</u>	k1=-0.610+0.006T k2=-2.637+0.012T a=-6.454 b=7.433	0.9966	0.0161	0.0003
Logistic	k=-18.862+0.062T a=1.048	0.9234	0.0885	0.0085

หมายเหตุ : “\_\_\_\_\_” หมายถึง แบบจำลองที่เลือกใช้ ; T คือ อุณหภูมิอบแห้ง (K)

ตารางที่ 2 (ต่อ)ค่าคงที่ของสมการรอบแห้งเอมพิริคัล

Name of model	Parameter	R <sup>2</sup>	RMSE	$\chi^2$
HA+IR(1,000 W)				
Newton	$k=-22.571+0.074T$	0.9771	0.0484	0.0026
Page	$k=-0.035+0.005T$ $n=0.935$	0.8939	0.1042	0.0121
Henderson and Pabis	$k=0.724+(1.59 \times 10^{-7}T)$ $a=0.987$	0.9778	0.0477	0.0025
Logarithmic	$k=-17.856+0.059T$ $a=1.121$ $c=-0.121$	0.9875	0.0349	0.0014
Two term	$k_1=-25.195+0.083T$ $k_2=-25.525+0.108T$ $a=1.131$ $b=-0.135$	0.9807	0.0444	0.0022
Logistic	$k=-14.559+0.048T$ $a=1.049$	0.8955	0.1035	0.0119
HA				
Newton	$k=-21.951+0.073T$	0.9922	0.0289	0.0009
Page	$k=-24.516+0.081T$ $n=1.103$	0.9945	0.0242	0.0006
Henderson and Pabis	$k=-22.175+0.073T$ $a=1.014$	0.9924	0.0284	0.0008
Logarithmic	$k=-19.086+0.063T$ $a=1.055$ $c=-0.057$	0.9955	0.0216	0.0005
Two term	$k_1=-38.111+0.125T$ $k_2=-24.152+0.112T$ $a=-5.089$ $b=6.081$	0.9950	0.0232	0.0006
Logistic	$k=-13.577+0.045T$ $a=1.057$	0.9157	0.0948	0.0096

หมายเหตุ : “\_\_\_\_\_” หมายถึง แบบจำลองที่เลือกใช้ ; T คือ อุณหภูมิอบแห้ง (K)

### อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้สมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

จากผลการทดลองแสดงอัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะดังตารางที่ 3  
 ตารางที่ 3 อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งใบเตยที่สภาวะต่าง ๆ

Source	Drying temp. (°C)	Drying time (min)	Drying rate (kg/h)	SEC (MJ/kg evap.water)
IR1000W+HA	63.8	75	0.1918	13.32
	52.7	105	0.1674	11.90
	44.9	135	0.0766	9.27
IR500W+HA	64.0	70	0.2282	10.95
	53.9	145	0.1215	16.05
	44.7	200	0.0924	16.33
HA	64.6	75	0.4943	8.33
	54.0	90	0.4551	11.37
	44.5	195	0.2269	14.37

จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 45-65°C และกำลังรังสีอินฟราเรด 1000 และ 500 W พบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง ส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการอบแห้ง โดยพบว่า ที่อุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น และการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 64.6°C มีอัตราการอบแห้งสูงสุด และยังคงส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด

### อัตราการคืนตัวและคุณภาพด้านสี

จากตารางที่ 4 ผลการทดสอบวัดสีของใบเตยที่สภาวะต่าง ๆ พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น ส่งผลให้ความสว่าง (L\*) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่มีผลต่อค่าความเป็นสีเขียว (a\*) และสีเหลือง (b\*) เพียงเล็กน้อย และผลการทดสอบร้อยละการคืนตัว พบว่า ที่อุณหภูมิในช่วง 52.7-54.7 °C มีร้อยละการคืนตัวของใบเตยที่อบแห้งด้วยทั้งสามแหล่งพลังงานสูงที่สุด อันเนื่องจากการระเหยของน้ำจะทำให้เกิดรูพรุนภายในวัสดุและเกิดการยุบตัวของโครงสร้างวัสดุ ดังนั้นช่วงอุณหภูมิดังกล่าวจึงมีความเหมาะสมในการอบแห้ง และเมื่อเปรียบเทียบแหล่งพลังงานความร้อน พบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนจะส่งผลให้ร้อยละการคืนตัวของใบเตยสูงกว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

ตารางที่ 4 ค่าสีของใบเตยหลังการอบแห้งและร้อยละการคืนตัวของใบเตยที่สภาวะอบแห้งต่าง ๆ

Source	Drying temp. (°C)	Color			% Rehydration
		L*	a*	b*	
HA	64.6	38.69 <sup>b</sup>	-10.35 <sup>d</sup>	20.94 <sup>a</sup>	80.37 <sup>ab</sup>
	54.7	38.68 <sup>b</sup>	-9.44 <sup>c</sup>	20.02 <sup>a</sup>	81.03 <sup>ab</sup>
	44.6	35.12 <sup>c</sup>	-8.53 <sup>c</sup>	20.04 <sup>a</sup>	78.62 <sup>b</sup>
IR1000W+HA	63.8	46.30 <sup>a</sup>	-5.59 <sup>a</sup>	15.67 <sup>b</sup>	80.58 <sup>ab</sup>
	52.7	38.48 <sup>b</sup>	-8.58 <sup>c</sup>	21.36 <sup>a</sup>	81.86 <sup>a</sup>
	44.9	40.01 <sup>b</sup>	-7.30 <sup>b</sup>	16.99 <sup>b</sup>	80.87 <sup>ab</sup>
IR500W+HA	64.0	46.30 <sup>a</sup>	-5.59 <sup>a</sup>	15.67 <sup>b</sup>	82.18 <sup>a</sup>
	53.9	38.48 <sup>b</sup>	-8.58 <sup>c</sup>	21.36 <sup>a</sup>	82.24 <sup>a</sup>
	44.7	31.47 <sup>c</sup>	-8.57 <sup>c</sup>	20.80 <sup>a</sup>	82.17 <sup>a</sup>

Note: Different superscripts in the same column mean that the values are significantly different at 95 % confidence level ( $p < 0.05$ )

### สรุปผลการทดลอง

- เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง ส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น โดยอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการอบแห้งมากกว่ากำลังของรังสีอินฟราเรด
- อัตราส่วนความชื้นจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาและอุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น และเมื่อนำมาวิเคราะห์รูปแบบสมการที่เหมาะสม พบว่าแบบจำลอง Logarithmic สามารถทำนายการอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรด 1000 W ร่วมกับลมร้อน และลมร้อนเพียงอย่างเดียว ส่วนแบบจำลองของ Two term สามารถทำนายการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 500 W ร่วมกับลมร้อน ได้อย่างครอบคลุม
- ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 45-65°C และกำลังรังสีอินฟราเรด 1000 W และ 500 W พบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มขึ้น จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง ส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งลดลง
- ผลการทดสอบคุณภาพ ได้แก่ สีและร้อยละการคืนตัว พบว่า การใช้อุณหภูมิการอบแห้งสูง ส่งผลให้ความสว่าง (L\*) สูงขึ้นและการอบแห้งด้วยลมร้อนจะส่งผลให้ร้อยละการคืนตัวของใบเตยสูงกว่าการอบแห้งที่มีรังสีอินฟราเรดร่วม

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนการศึกษาในโครงการทุนตรี-โท 5 ปี ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์ และบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนวิจัยนี้

### เอกสารอ้างอิง

- ภราดร หนูทอง, อารีย์ อัจฉริยวิริยะ, กอดขวัญ นามสงวน และศิวัช อัจฉริยวิริยะ. 2552. จลนพลศาสตร์การอบแห้ง และคุณภาพของลำไยโดยใช้อินฟราเรดร่วมกับลมร้อน. เอกสารการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23. 4-7 พฤศจิกายน 2552. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สมชาติ ไสภภรณ์ฤทธิ. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ. 338 หน้า.
- AOAC. 1995. Official Method of Analysis, 16th ed., The Association of Official Analytical Chemists. Inc. Arlington, Virginia, USA.
- Apintanapong, M. 2009. Infrared Drying of Holy Basil Leaves and Its Effect on Sensory Characteristics. J. Agric. Sci., 40(3) (Suppl.): 69-72.
- Hii, C.L., Law, C.L. and Cloke, M. 2009. Modeling Using A New Thin Layer Drying Model and Product Quality of Cocoa. J. Food Eng., 90: 191-198.
- Nuthong, P., Achariyaviriya, A., Namsanguan, K. and Achariyaviriya, S. 2011. Kinetics and Modeling of Whole Longan with Combined Infrared and Hot Air. J. Food Eng., 102: 233-239.
- Tirawanichakul, S., Linpo, P. and Tirawanichakul, Y. 2009. Influence of Infrared and Heat Convection On Drying Kinetics of Shrimp and Quality. Thai Journal of Physics, 4: 116-120.
- Wanyo, P., Meeso, N., Dondee, S. and Siriamornpun, S. 2009. Feasibility of Mulberry Tea Drying Using Combination of Far-Infrared Radiation and Air Convection. J. Agric. Sci., 40(1) (Suppl.): 497-500.

**ภาคผนวก จ**

**2011 IEEE Colloquium on Humanities, Science & Engineering Research**

**(CHUSER 2011)**

**Penang, Malaysia, December, 5<sup>th</sup>-6<sup>th</sup>, 2011**

## Drying Kinetics Model and Physical Properties of Herb Pandanus Leaf

A. Nadee<sup>1\*</sup>, Y. Tirawanichakul<sup>2</sup> and S. Tirawanichakul<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,  
Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90110, Thailand

<sup>2</sup>Plasma and Energy Technology Research Laboratory,  
Department of Physics, Faculty of Science,  
Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90110, Thailand

\*E-mail: 5310120113@email.psu.ac.th

**Abstract** - The objectives of this research were to drying using HA and IR, respectively. The study drying kinetic of Pandanus leaf for herbal tea simulated data using empirical Logarithmic model by hot air (HA) convection, infrared (IR) radiation for all heating methods had a good relation to the and combined HA and IR heat sources (HA+IR). experimental data. According to the liquid The thin-layer drying kinetics equation of diffusion following Fick's law, the effective Pandanus leaf was mathematical simulated for all diffusion coefficient was depended on drying three drying strategies. Determination of physical temperature and drying method. Evaluation of quality and specific energy consumption (SEC) SEC showed that SEC of IR drying was lower than were carried on. The experiments were carried out drying with HA and combined HA+IR, under the conditions of infrared radiation power of respectively. The SEC with all three heat sources 1,000 W and drying temperature ranges between was in ranges of 8.33-17.70 MJ/kg.H<sub>2</sub>O evaporated. 45 and 65°C. The hot air flow rate was fixed at 1.0- The SEC is decreased with increase of drying 1.2 m/s. Initial moisture content of Pandanus leaf temperature. For product quality analysis, was range of 400 to 600% dry-basis and the final percentage of rehydration and the colorness value moisture content was between 8 and 12% dry- (CIE lab) of dried using HA, IR and combined basis. The experimental results showed that the HA+IR are significantly different ( $p \leq 0.05$ ). drying rate using combined HA+IR was faster than



**Keywords:** *Effective diffusion coefficient; Herbal tea; infrared drying; Quality*

## I. INTRODUCTION

Pandanus (*Pandanus odoratus Ridi.*) plants are the herbal grass which contains essential and fragrance green chlorophyll leaf. Medicinal properties can help relieve dry skin, heart and gives refreshing activity. Now, Thai herbs good is becoming widely popular. Efficacy of Thai traditional medicine and modern medicine of Pandanus leaf can be used for therapeutic, aromatic and supplemented product for health. It helps in colds, fever and for throat. The fresh Pandanus leaf can't be kept in long shelf life or even it is kept in low temperature. Due to extending the shelf life and storage during a healthy beverage off-season harvest of food and biomaterials, the post-harvest technique has been proposed, especially on dehydration technique. Even the most common dehydration treatment methods use solar energy to preserve agricultural products, this technique is extremely weather dependent and has the problems of contamination with dust, soil, sand particles and infection by insects and micro-organism. Reducing moisture in the fresh biomaterial is important because it directly affects medical quality. The quality parameters of samples are of highlight consideration during the employment of different drying mechanisms [1]

Drying is a traditional method for preservation food, grain, cereal and biomass, especially this technology is also used for the production of special foods and food ingredients [2]. Normally, drying not only affects the water content of the product, but also alters other physical, biological, chemical and physicochemical properties such as enzymatic activity, microbial spoilage, viscosity, hardness, aroma, flavour and palatability of foods [3-5]. Most of the conventional drying treatments used hot-air. Hot air drying is low energy efficiency and has long drying time during falling rate period. Because of the low thermal conductivity of food materials in this period, heat transfer of food during conventional heating is limited. According to heat transfer efficient system, electromagnetic radiation enhancing heat transfer, infrared radiation and superheated steam have been developed and reported since 1994 such as fluidized-bed drying, spouted-bed drying, pulse fluidized-bed drying, vacuum drying, solar drying, freeze drying and hybrid tunnel solar drying etc [4, 6, 7]. However, various methods of drying have their own advantages and disadvantages. One of interesting drying method is radiation technique. During the biomaterials are subjected to electromagnetic field, this wave penetrates directly into the sample resulting in fast volumetric heating (from the inside out). The quick energy absorption by water molecules causes vibration and rapid evaporation of water, creating an outward flux of rapidly escaping vapour. Some biomaterial

such as mulberry leaf and basil leaf was dried with far infrared radiation and the drying rate of IR heating was faster than drying with hot air [8, 9] In addition, the physical analysis of dried samples was reported such as the brightness and yellowness. The results showed that colour property and rate of rehydration of biomaterial can be activated by infrared combined hot air drying technique [10].

The objective of this research was to investigate feasible drying of herb Pandanus tea by using hot air (HA), infrared radiation (IR) and hot air combined infrared radiation (HA+IR). The drying kinetics of Pandanus leaf was carried out and simulated each drying method by empirical drying models. Finally, determination of physical quality in terms of rehydration, change of color and total specific energy consumption (SEC) were determined.

## II. MATERIAL AND METHODS

### A. Materials

Pandanus (*Pandanus odoros Ridi.*) leaf was provided by Songkla central fresh market. Raw fresh sample was washed and cut into dimension of  $1 \times 1.5$  cm. The moisture content of Pandanus leaf was determined by standard AOAC method [11]. The initial moisture content of Pandanus leaf was in the ranges of 400-600% dry-basis and the desired final moisture content after drying in each drying strategies was about 8-12% dry-basis.

### B. Experimental set-up

Hybrid heat source of tray dryer developed by [12] was illustrated in Figure 1. Solar energy, electric heating and infrared heating was heat source which can be used for drying seafood, raw biomaterials and cereal grain kernels. In this experiment, the three stainless steel trays of fresh Pandanus leaf weighted of 300 g were dried under 3 heat sources (HA, IR and HA+IR) and drying temperatures of  $45-65^{\circ}\text{C}$  at inlet air flow rate of 1.0-1.2 m/s.

Drying room dimension was  $60 \times 80 \times 158.5$  cm and interior walls were insulated by insulator of 5 cm thickness. Electric heater was made of fin electric heating rod 1,000x10 W and infrared rod of 500x3 W was used for these experiments while solar heating was gotten using solar collector with made from galvanize steel painted with black colour. The dimension of solar collector was of  $32.5 \times 133 \times 240$  cm and on the top of collector was made of Perspex glass with 0.5 cm thickness. Forward-blade blower was driven by AC motor of 1 hp. Consequently, the recycle pipe was connected at the top of drying room to recirculation of hot air.

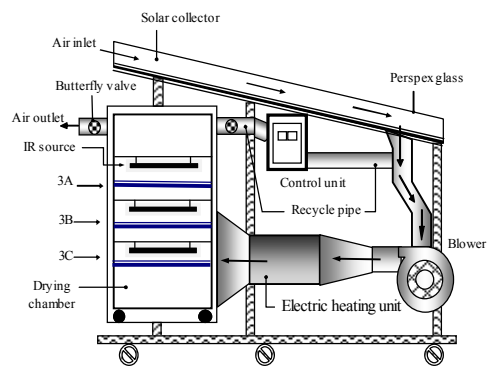


Figure. 1. Hybrid heat sources tray dryer  
(3A-3C are drying trays for samples)

Temperature was measured during drying process using K-typed thermocouple connected to data logger (SUPCON, China) and surrounding temperature (wet-bulb and dry-bulb) was also recorded. The inlet drying temperature was controlled by a PID controller with an accuracy of  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Using infrared radiation with intensity of 500 and 1,000 W. Air flow was measured by hot wire anemometer (DIGICON model DA-45, USA) with an accuracy of  $\pm 0.01$  m/s. During drying period, the sample was weighted continuously by electric balance (A&D model GF3000) with an accuracy of  $\pm 0.1$  g.

### C. Determination of empirical drying equation

To calculate the drying, an appropriate empirical equation was fitted to the experimental data (drying curve) and was then differentiated with respect to time. The drying rate and moisture ratio are defined as in (1) and (2)

$$\text{Drying rate} = \frac{(M_{in} - M_f)W_d}{\text{Drying time}} \quad (1)$$

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (2)$$

where  $MR$  is moisture ratio, dimensionless.  $M_t$ ,  $M_{in}$  and  $M_{eq}$  are moisture content at any time ( $t$ ), initial condition and equilibrium state, respectively, decimal dry-basis.

The equilibrium moisture content can be solved in BET [13] as in (3) which was developed as follow:

$$\ln \frac{RH}{(1-RH)M_{eq}} = \frac{1}{M_m C} + \frac{(C-1)RH}{M_m C} \quad (3)$$

where  $M_m = 1.4694 - 0.0050T$   $C = 0.3715 - 0.0025T$  where  $RH$  is relative humidity (0.1-0.9) in decimal,  $M_m$  and  $C$  are arbitrary coefficient.

The experimental data were mathematical simulated by 6 empirical drying models as shown in Table I. And finally, the coefficient of determination ( $R^2$ ) and root mean square error (RMSE) values were used as the primary criterion for selecting the best equation to describe the experimental data.

**Table I. Empirical drying equation**

Name of model	Model equation
Newton	$MR = \exp(-kt)$ (4)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$ (5)
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$ (6)
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$ (7)
Two term	$MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$ (8)
Logistic	$MR = a / (1 + \exp(kt))$ (9)

Note:  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $k$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  and  $n$  are arbitrary coefficients;  $t$  is drying time.

### D. Determination of effective diffusion coefficient

Semi-theoretical drying equation is mainly based on the moisture diffusion process. During the falling rate period of drying, the most available models of moisture transfer are well described by Fick's law. In addition, the analytical solution of moisture transfer

for Pandanus leaf in infinite slab shape can be expressed as in (10) [13].

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{p=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(2p+1)^2} \right] \exp \left[ \frac{-(2p+1)^2 \pi^2 Dt}{L^2} \right] \quad (10)$$

where  $D$  means an effective diffusion coefficient (so called an effective diffusivity). An effective diffusion coefficient was described by the Arrhenius type equation as follow:

$$D = D_0 \exp \left( \frac{-E_a}{RT_{abs}} \right) \quad (11)$$

where  $D_0$  is the Arrhenius factor,  $R$  is universal gas constant 8.314 kJ/kmol-K,  $T_{abs}$  is absolute temperature (K) and  $E_a$  is the activated energy (kJ-K/kmol).

#### E. Determination of specific energy consumption

Specific energy consumption (SEC) was defined as the energy required for removing a unit mass of water in drying the Pandanus leaf from its the initial moisture content was in the ranges of 400-600% dry-basis and final moisture content was about 8-12% dry-basis. The specific energy consumption was calculated as follows:

$$SEC = \frac{3.6P}{(M_{in} - M_f)W_d} \quad (12)$$

where  $P$  is an electrical power consumption (kWh),  $M_{in}$  is initial moisture content (dry-basis),  $M_f$  is final moisture content (dry-basis) and  $W_d$  is mass of dry solid (kg).

#### F. Quality analysis

##### a) Measurement of color

The color measurement of the fish samples was determined in CIE  $a$ -value by using Juki color meter (JP7100p Tokyo Japan). The color values (L-a-b) of dried mullet fish were measured by mean in five replications. In addition, the positive CIE  $L$ - $a$ - $b$  values indicate brightness, redness and yellowness whilst negative Hunter  $L$ - $a$ - $b$  values indicate darkness, greenness and blueness, respectively [12]. The positive value of CIE  $L$ - $a$ - $b$  unit means brightness, redness and yellowness. In the opposite side, the negative value of CIE  $L$ - $a$ - $b$  unit means darkness, greenness and blueness, respectively.

Additionally, the total color difference ( $\Delta E$ ) was determined as follow in (13)

$$\Delta E^* = \pm \sqrt{(L^* - L_o^*)^2 + (a^* - a_o^*)^2 + (b^* - b_o^*)^2} \quad (13)$$

where  $L_o^*$  and  $L^*$  is the initial and final brightness value of sample, respectively. The  $a_o^*$  and  $a^*$  value is the initial and final redness value of sample, respectively. The  $b_o^*$  and  $b^*$  value is the initial and final yellowness value of sample, respectively.

##### b) Measurement of rehydration

Percentage of rehydration of samples was weighted and then soaked in hot water at temperature of  $90 \pm 3^\circ\text{C}$  for 15 min. After soaking, the samples were weighted again. Percentage of rehydration was defined as:

$$\text{Rehydration ratio} = \frac{m_f}{m_d} \tag{14}$$

where  $m_f$  and  $m_d$  are the weight (g) of initial and final rehydration process, respectively.

G. Statistical analysis

Analysis of variance (ANOVA) was performed in a completely randomized design, using Duncan’s Multiple Range Test. All determinations were done at least in triplicate and all were averaged. The confidence limits were set up at 95% ( $p < 0.05$ ).

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

A. Empirical drying equation

TABLE II. ARBITRARY CONSTANT OF EMPIRICAL LOGARITHMIC DRYING MODEL

Source	Arbitrary constant in	R <sup>2</sup>	RMSE
HA	k=-0.0326+0.0011T a=1.0477 c=-0.0501	0.9945	0.0241
IR	k=-0.0176+0.0005T a=1.3173 c=-0.3019	0.9864	0.0434
HA+IR	k=-0.0464+0.0014T a=1.0654 c=-0.0623	0.9796	0.0455

Table II. showed the arbitrary constants of the best fitting equation for thin-layer drying kinetic of Pandanus leaf. The result showed the simulated equation using Logarithmic model had a good relation to the experiment data for all three drying conditions. From the arbitrary constant k as function of drying temperature, it implied the drying rate highly related to

drying temperature. This is corresponded to the previous work for grain kernels, seafood materials and fruit [4, 10, 12].

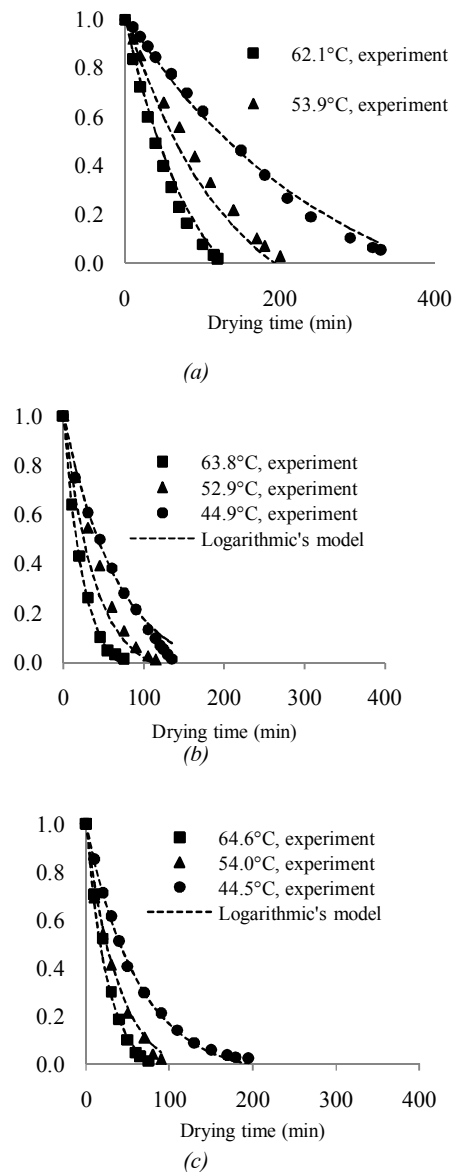


Figure.2. Computed and experimental data of moisture ratio of samples in various drying temperature of 44.5-65.2°C (a) hot air, (b) infrared and (c) combined hot air and infrared of 1,000 W

Figure 2 illustrated the evolution of moisture removal during drying time of Pandanus leaf with drying temperature of 45-65°C. The results showed that moisture transfer of combined HA+IR was faster than the other drying using IR and HA, respectively. However, the specific energy consumption needs to consider

### B. Effective Diffusion Coefficient ( $D_{eff}$ )

By using Fick's diffusion law, the solution of moisture ratio was determined in equation (10) and the effective diffusion coefficient  $D$  can be evaluated by non-linear regression method by equation (11). The result of  $D$  value for all heating sources was presented in Table III. and showed that an effective diffusion coefficient was in order of  $10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s. This coefficient was relatively dependent on temperature corresponding to the other biomaterials.

Table III. EFFECTIVE DIFFUSION COEFFICIENT OF PANDANUS LEAF

Source	Temperature (° C)	$D(\times 10^{-12}$ (m <sup>2</sup> /s))	$R^2$
HA	44.5	2.169	0.996
	54.0	4.566	0.957
	64.6	6.507	0.975
IR	45.6	0.913	0.961
	54.9	1.712	0.926
	62.1	3.539	0.933
HA+IR	44.9	2.968	0.897
	52.7	3.881	0.961
	63.8	6.507	0.991

Table IV. showed activation energy and Arrhenius factor of three drying sources. The results stated that activation energy value of drying with IR was higher than drying using HA and combined HA+IR, respectively.

TABLE IV. ENERGY OF ACTIVATION AND COEFFICIENT  $D_0$  FOR PANDANUS LEAF

Source	Energy of activation, $E_a$ (kJ/mol)	Arrhenius factor, $D_0$ (m <sup>2</sup> /s)	$R^2$
HA	48.606	$2.292 \times 10^{-4}$	0.954
IR	72.111	$5.758 \times 10^{-1}$	0.983
HA+IR	37.307	$3.918 \times 10^{-6}$	0.990

### C. Specific energy consumption (SEC)

TABLE V. DRYING RATE AND SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION (SEC)

Source	Drying (°C)	Drying (min)	Drying (kg/h)	SEC (MJ/kg H <sub>2</sub> O)
HA	64.6	75	0.2093	8.33
	54.0	90	0.1760	11.37
	44.5	195	0.0933	14.37
IR	62.1	120	0.2219	8.61
	53.9	200	0.1612	8.97
	45.6	330	0.0535	8.91
HA+IR	63.8	75	0.1918	17.70
	52.7	105	0.1674	15.21
	44.9	135	0.0766	13.32

Table V. showed that the drying temperature decreased with the drying rate and specific energy

consumption (SEC) was increased. The heat energy of IR has lower SEC value than HA and combined HA+IR drying, respectively.

#### D. Quality analysis

##### a) Measurement of Color

TABLE VI. ILLUSTRATION OF COLOUR

MEASUREMENT OF ALL CASE DRYING

UNDERVARIOUS DRYING TEMPERATURE 45-65°C

Source	Drying (°C)	Color value (CIE-lab)			
		$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E^*$
Initial	-	30.42 <sup>a</sup>	-10.84 <sup>a</sup>	21.22 <sup>c</sup>	-
HA	64.6	38.69 <sup>bc</sup>	-10.35 <sup>ab</sup>	20.94 <sup>c</sup>	8.83 <sup>ab</sup>
	54.7	38.68 <sup>bc</sup>	-9.44 <sup>bc</sup>	20.02 <sup>c</sup>	9.28 <sup>ab</sup>
	44.6	35.12 <sup>ab</sup>	-8.53 <sup>cd</sup>	20.04 <sup>c</sup>	6.46 <sup>a</sup>
IR	62.1	43.00 <sup>cd</sup>	-7.68 <sup>de</sup>	19.90 <sup>c</sup>	13.48 <sup>bc</sup>
	53.9	35.25 <sup>ab</sup>	-5.66 <sup>f</sup>	14.67 <sup>ab</sup>	9.58 <sup>ab</sup>
	45.6	32.10 <sup>a</sup>	-6.95 <sup>f</sup>	14.09 <sup>a</sup>	7.99 <sup>ab</sup>
HA+IR	63.8	46.30 <sup>d</sup>	-5.59 <sup>f</sup>	15.67 <sup>ab</sup>	18.18 <sup>c</sup>
	52.7	40.02 <sup>ab</sup>	-7.30 <sup>f</sup>	16.99 <sup>b</sup>	11.40 <sup>ab</sup>
	44.9	38.48 <sup>ab</sup>	-8.58 <sup>cd</sup>	21.36 <sup>c</sup>	8.94 <sup>ab</sup>

Note: Different superscripts in the same column mean that the values are significantly different at 95 % confidence level ( $p < 0.05$ )

Table VI. illustrated the color measurement of dried Pandanus leaf. For all drying conditions, it stated that faster than the two other heat source (hot air and drying with high temperature tended to increase  $L^*$ -value combined hot air and infrared heating).

In addition, dried Pandanus leaf with combined HA+IR sources significantly increased yellowness value (CIE-lab  $b^*$  value). The HA drying for Pandanus leaf gave the lowest value of total color difference compared to control Pandanus leaf initial sample color.

##### b) Measurement of Rehydration

Figure 3. showed the rehydration ratio (RR) of dried Pandanus leaf with three heat sources. The results showed that combined HA+IR drying has higher RR than HA and IR, respectively. The color value of dried Pandanus leaf was affected by heat source and drying temperature.

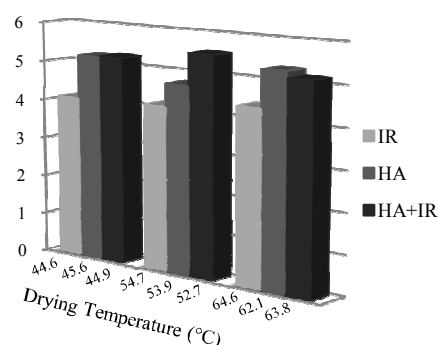


Figure 3. Rehydration ratio of dried Pandanus leaf.

#### IV. CONCLUSIONS

The conclusion can be stated as follows:

- 1) Drying temperature affected directly to the drying rate of Pandanus leaf producing herb tea.
- 2) Drying kinetic of Pandanus leaf was dependent on heat source. Thus the infrared drying was suitable

- 3) Specific energy consumption of IR and combined hot air and infrared show high efficient technique for producing herb Pandanus tea.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to sincerely thank Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering; Department of Physics, Faculty of Science, Graduate school Prince of Songkla University for their financial support in this research.

## REFERENCES

- [1] S. K. Chou and K. J. Chua, "New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs," *Trends in Food Science and Technology*, vol. 12(10), 2001, pp.359-369.
- [2] Z. B. Maroulis, and G. D. Saravacos, *Food process design*, 1st ed., New York, USA, 2003, pp.243-244.
- [3] G. V. Barbosa-Canovas and H. Vega-Mercado, *Dehydration of foods*, 1st ed., New York, United States of America. 1996, p. 29.
- [4] S. Soponronnarit, *Drying grain and some type of food*, 7th ed., King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 1997.
- [5] S. Tirawanichakul, P. Linpo and Y. Tirawanichakul, "Influence of infrared and heat convection on drying kinetics of shrimp and quality. *Thai Journal of Physics*, vol. 4, 2009, pp.116-120.
- [6] T. M. Afzal and T. Abe, "Simulation of moisture changes in barley during far infrared radiation drying." *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 26(2), 2000, pp.137-145.
- [7] S. Devahastin, R. Tapaneyasin and A. Tansakul, "Hydrodynamic behaviour of a jet spouted bed of shrimp." *J. of Food Eng.*, vol.74, 2006, pp.345-351.
- [8] P. Wanyo, N. Meeso, S. Dondee, and S. Siriamornpun, "Feasibility of mulberry tea drying using combination of far-infrared radiation and air convection." *J. Agric. Sci.*, vol.40(1) (Suppl.), 2009, pp.497-500.
- [9] M. Apintanapong, "Infrared drying of holy basil leaves and its effect on sensory characteristics." *J. Agric. Sci.*, vol. 40(3) (Suppl.), 2009, pp.69-72.
- [10] P. Nuthong, A. Achariyaviriya, K. Namsanguan and S. Achariyaviriya, "Kinetics and modeling of whole longan with combined infrared and hot air." *J. Food Eng.*, vol.102, 2011, pp.233-239.
- [11] AOAC, *Official Method of Analysis*, 16th ed., The Association of Official Analytical Chemists, Inc. Arlington, Virginia, USA, 1995.
- [12] S. Tirawanichakul, W. Na Phatthalung, and Y. Tirawanichakul, "Drying strategy of shrimp using hot air convection and hybrid infrared radiation and hot air convection, *Walailuk Journal of Science and Technology*, vol.4(1), 2008, pp.80-90.
- [13] S. Brunauer, P. H. Emmett and E. Teller, "Adsorption of gases in multi-molecular layers." *J. of Amer. Chem. Soc.*, vol.60, 1938, pp.309-319.



**ภาคผนวก ฉ**

**TIChE International Conference 2011  
November 10 – 11, 2011 at Hatyai, Songkhla THAILAND**

Microwave and Combined Hot Air/ Infrared Radiation  
of Pandanus Leaf : Drying Kinetics, Color and Specific Energy Consumption

A. Nadee<sup>1\*</sup>, Y. Tirawanichakul<sup>2</sup> and S. Tirawanichakul<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,  
Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90110, Thailand

<sup>2</sup>Plasma and Energy Technology Research Laboratory,  
Department of Physics, Faculty of Science,  
Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90110, Thailand

\*E-mail: anusara\_nadee@hotmail.com

**Abstract**

The objective of this research is to study the effects of one-stage drying with constant drying under microwave power and a two-stage drying using combined microwave hot air and infrared radiation on the drying kinetics and color of pandanus leaf, and to evaluate specific energy consumption. Microwave powers of 472, 584 and 704 W, infrared radiation power of 1,000 W and drying temperatures of 45, 55 and 65°C at an air flow rate of 1.1-1.2 m/s were used in this work. Initial moisture content of fresh pandanus leaf was in the range of 400 to 600% dry-basis and the final moisture content of the dried leaf was between 8 and 12% dry-basis. In the determination of drying kinetics of the pandanus leaf, experimental data on the effect of microwave power were evaluated. As microwave power increased, the moisture ratio significantly decreased. As drying air temperature increased at a given microwave power, the drying curve exhibited a steeper slope for all MW-HA drying conditions, implying that the drying rate increased with increasing drying air temperature. At any drying temperature, when the drying rate increased the specific energy consumption (SEC) decreased.

**Keywords:** *Microwave power, hot air drying, infrared drying, pandanus leaf, color*

## 1. Introduction

Pandanus (*Pandanus odoratus* Ridl.) plant is a herbal grass. Its green chlorophyll leaf contains essential oils and fragrance. This herb is fast becoming popular widely, as of many other Thai herbs. Its medicinal properties can help relieve dry skin and energize heart activities. Thai traditional medicines, and also modern medicines, produced with essence from Pandanus leaf can be used as therapeutic, aromatic and supplement product for health. The herb helps relieve colds, fever and sore throat. Fresh Pandanus leaves do not have long shelf life even if it is kept in controlled low temperature. In an effort to extend the shelf life and storage duration to continuously provide this healthy biomaterial beverage food off-season, a post-harvest technique has been proposed in this study, especially on the dehydration technique. The most common dehydration treatment method employs solar energy to preserve agricultural products. However, this technique is extremely weather dependent and is plagued with problems of contamination by dust and soil particles, as well as infestation by insects and micro-organisms. Reducing moisture in a fresh biomaterial is important because it directly affects medical quality. The quality parameters of samples are of highlight consideration during the employment of different drying mechanisms (Chou and Chua, 2001)

Drying is a traditional method for preservation of food, grain, cereal and biomass. However, appropriate drying treatment is needed for the production of special foods and food

ingredients (Maroulis and Saravacos, 2003). Drying not only affects the water content of the product, but also alters other physical, biological, chemical and physicochemical properties such as enzymatic activity, microbial spoilage, viscosity, hardness, aroma, flavour and palatability of foods (Barbosa-Canovas and Vega-Mercado, 1996; Soponronnarit, 1997; Tirawanichakul et al., 2009). Most conventional drying treatments use hot-air. Hot air drying has low energy efficiency and needs long drying time, particularly during falling rate period. Because of the low thermal conductivity of food materials in this period, heat transfer of food during conventional heating is limited. In a heat transfer efficient system, electromagnetic radiation enhances heat transfer. Infrared radiation and superheated steam have been developed and reported since 1994 such as fluidized-bed drying, spouted-bed drying, pulse fluidized-bed drying, vacuum drying, solar drying, freeze drying and hybrid tunnel solar drying, etc (Soponronnarit, 1997; Afzal and Abe, 2000; Devahastin *et al.*, 2003). However, each method of drying has its own advantages and disadvantages. Use of microwave rays in drying has also become common, because it prevents the decline in quality and ensures rapid and efficient distribution of heat in the material (Diaz *et al.*, 2003). During a biomaterial is subjected to an electromagnetic field, the waves penetrate directly into the subject, resulting in a fast volumetric heating (from the inside out). The quick energy absorption by water molecules causes vibration and rapid evaporation of water, creating an outward flux of rapidly

escaping vapour. This causes the object to dry out, and drying can be made more efficient when combined with subsequent air drying. When pure air-drying was compared with combined microwave and air-drying, the combined systems were determined to shorten the drying period of American ginseng roots significantly, without causing a decline in the quality of the dry product (Ren and Chen, 1998). However, application acceptance for drying of many other food products is yet to be investigated.

The objective of this research is to investigate and compare drying of Pandanus herbal tea leaves using microwave (MW), combination of microwave and hot air (MW-HA) and combination of microwave and infrared radiation (MW-IR). The drying kinetics of Pandanus leaf was studied; and the color of the dried product together with the associated total specific energy consumption (SEC) were investigated.

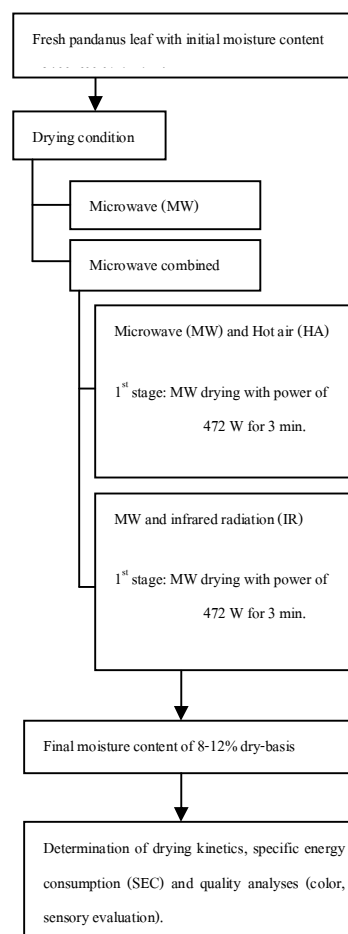
## 2. Material and methods

### 2.1 Material

Pandanus (*Pandanus odoratus* Ridl.) leaf was acquired from Songkhla central fresh market. Raw fresh sample in weight was washed and sliced into dimension of 10 mm × 15 mm. The total needed amount was set to be 100(±0.05) g. Moisture content of the leaf was determined by standard AOAC method (AOAC, 1995). The initial moisture content was found to be in the range of 400-600% dry-basis and the desired final moisture content after drying in each drying strategy was about 8-12% dry-basis.

### 2.2 Drying method

Microwave drying experiments were performed in a domestic microwave oven (DAEWOO, KOR-63D7), having output microwave power of 472, 584 and 704 W. Two main types of drying were employed: microwave (MW), and microwave combined. The latter, however, was subdivided into combined microwave–infrared (MW-IR) and combined microwave-hot air (MW-HA). The flowchart for the drying process employing these three methods is shown in Fig. 1.



**Fig.1** Flowchart of the drying process

The IR and HA drying chamber dimension is 520 mm × 520 mm × 500 mm. Its walls are formed from aluminized steel insulated with two 50 mm thick adiabatic layers, one layer on each side. The electric heater comprises three finned 1,000 W electric heating rods, and three 500 W infrared rods. A forward-blade blower driven by a 1 hp AC motor is used for hot air convection. The hot air from drying is released to the surrounding using an air outlet pipe. The drying temperature, and the inlet and the outlet temperatures were measured using K-type thermocouples connected to a data logger (Supcon Co. Ltd.) with an accuracy of  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . The surrounding wet-bulb and dry-bulb temperatures were also continuously recorded. The inlet air flow at the tube entrance was measured by a hot air wire anemometer (Digicon modal DA-45) with an accuracy of  $\pm 0.01$  m/s.

For stand-alone MW drying all 3 power levels - 472, 584 and 704 W - had been employed to determine their individual effect on moisture removal. For MW-HA and MW-IR dryings, the first stage of the drying by the microwave employed only that power of 472 W for 3 min. The second stage drying employing hot air utilized temperatures of either  $45^\circ\text{C}$ , or  $55^\circ\text{C}$ , or  $65^\circ\text{C}$  at hot air velocity of  $1 \pm 0.2$  m/s. For the second stage employing IR with infrared power of 1,000 W, temperatures of either  $45^\circ\text{C}$ , or  $55^\circ\text{C}$ , or  $65^\circ\text{C}$  were also explored.

### 2.3 Data analysis

The experimental moisture content data were de-dimensionalized using the following equation:

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (1)$$

Where  $MR$  is the moisture ratio, dimensionless.  $M_t$ ,  $M_{in}$  and  $M_{eq}$  are moisture content at any time ( $t$ ), at initial and at equilibrium state, respectively, in decimal dry-basis.

The equilibrium moisture content can be solved employing the BET model developed by Brunauer et al, 1938, as shown in Eq. (2).

$$\ln \frac{RH}{(1-RH)M_{eq}} = \frac{1}{M_m C} + \frac{(C-1)RH}{M_m C} \quad (2)$$

Where  $M_m = 1.4694 - 0.0050T$   $C = -0.3715 - 0.0025T$   $RH$  is the relative humidity, in decimal.  $M_m$  and  $C$  are arbitrary coefficients, dimensionless.  $T$  is the temperature, in Kelvin.

### 2.4 Determination of effective diffusion coefficient

Semi-theoretical drying equation is mainly based on the moisture diffusion process. During the falling rate period of drying, the most available models of moisture transfer are well described by Fick's Law. The analytical solution of moisture transfer for infinite slab shape object expressed in Eq. (3) by Brunauer et al., 1938 might be considered to be applicable for the pandanus leaf, thus:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{p=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(2p+1)^2} \right] \exp \left[ \frac{-(2p+1)^2 \pi^2 Dt}{L^2} \right] \quad (3)$$

Where  $D$  is its effective diffusion coefficient (so called the effective diffusivity).

## 2.5 Measurement of color

Color measurement of the leaf samples was determined in CIE  $L^*-a^*-b^*$  values using Juki color meter (JP7100p, Tokyo, Japan). Color values of dried pandanus leaves were measured in five replications and averaged. Higher  $L^*$  value (approaching 100) means more bright, and lower  $L^*$  value (approaching 0) means more dark. Positive  $a^*$ ,  $b^*$  values indicate, respectively, redness and yellowness whilst negative  $a^*$ ,  $b^*$  values indicate greenness and blueness, respectively. The total color difference ( $\Delta E$ ) was determined in Eq. (4) as follow:

$$\Delta E^* = \pm \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (4)$$

where  $L_0^*$  and  $L^*$  are the initial and final brightness (or darkness) values of the sample, respectively.  $a_0^*$  and  $a^*$  values are the initial and final redness (or greenness) values of the sample, respectively. And  $b_0^*$  and  $b^*$  are the initial and final yellowness (or blueness) values of the sample, respectively.

## 2.6 Determination of specific energy consumption

Specific energy consumption (SEC) is defined as the energy required for removing a unit mass of water in drying. The initial moisture content of the pandanus leaf was in the range of 400-600% dry-basis and final moisture content was about 8-12%

dry-basis. The specific energy consumption can be calculated as follows:

$$SEC = \frac{3.6P}{(M_{in} - M_f)W_d} \quad (5)$$

where  $P$  is the electrical power consumption (kW-h);  $M_{in}$  is initial moisture content (dry-basis),  $M_f$  is final moisture content (dry-basis), both in decimal; and  $W_d$  is the weight of the solid at final moisture content (kg).

## 2.7 Sensory Evaluation

Twenty to twenty five untrained judges are usually required for a sensory evaluation test. The products at final moisture content were subjected to evaluation by a taste panel of twenty untrained judges. The panelists were asked to indicate their preference for the sample, based on quality attributes of color, appearance, dissolution rate, flavor, and overall acceptability. A balanced 9-point hedonic rating was employed for all the attributes evaluated. The judges were asked to give their remarks about each of the sample.

## 2.8 Statistical analysis

Analysis of variance (ANOVA) was performed in a completely randomized design, using Duncan's Multiple Range Test. All determinations were conducted in triplicate and all were averaged. The confidence limit was set at 95% ( $p < 0.05$ ).

## 3. Results and discussion

### 3.1 Drying kinetics

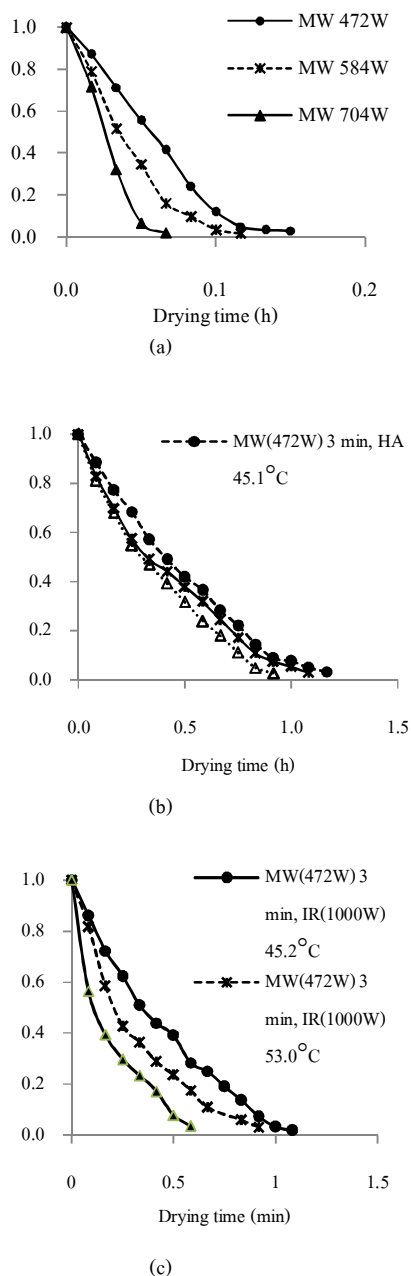


Fig. 2. Relationships between moisture ratio and drying time of pandanus leaf under different drying methods and temperatures: (a) with microwave (MW) power only, (b) with combined microwave and hot air (MW+HA), and (c) with combined microwave and infrared (MW+IR).

Fig. 2(a) illustrates that the drying time of pandanus leaf decreases with increasing MW

power. In Fig. 2(b), for the combined low MW power of 472 W plus 45°C hot air for 70 min, or 55°C for 65 min, or 65°C for 55 min, to obtain samples with final moisture content of 8-12% dry basis, the resulted drying curves exhibited similar trends with not much significant differences. The positive interaction between MW and hot air on pandanus leaf is possibly due to a direct heat generation inside the pandanus leaf by MW, coupled with the convective heat transfer at the leaf surface by the hot air. In Fig. 2(c), for the combined low MW power of 472 W plus IR 1,000 W at 45°C, or 55°C or 65°C, it was found that the drying time required decreased significantly with increasing IR temperature. Moreover, it was also less than that of combined MW-HA at corresponding same temperature.

### 3.2 Effective diffusion coefficient ( $D_{\text{eff}}$ )

Table 1. Effective diffusion coefficient of pandanus leaf

Drying condition	$D_{\text{eff}}$ ( $\times 10^{-12} \text{ (m}^2/\text{s)}$ )	$R^2$
MW 427 W	49.429	0.953
MW 584 W	66.209	0.938
MW 704 W	110.616	0.954
MW (427 W)+HA 45°C	2.957	0.964
MW (427 W)+HA 55°C	3.388	0.859
MW (427 W)+HA 65°C	3.381	0.957
MW (427 W)+ IR (1000 W) 45°C	3.311	0.947
MW (427 W)+ IR (1000 W) 55°C	4.749	0.981
MW (427 W)+ IR (1000 W) 65°C	7.908	0.955

Employing Fick's diffusion law, the solution for moisture ratio can be determined as described earlier in Eq. (3). The resulting  $D_{\text{eff}}$  values for all drying conditions are presented in Table 1 and these indicate that the effective diffusion coefficient was in the order of  $10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s. The results revealed that the effective diffusivity was affected by the drying temperature and the microwave power. The MW drying yielded higher  $D_{\text{eff}}$  than the combined MW-IR and the combined MW-HA, respectively.

### 3.3 Specific energy consumption (SEC)

Table 2 tabulates the drying time, the drying rate and the specific energy consumption (SEC) under different drying conditions, which revealed that the drying rate increased with microwave power, and with drying temperature for the combined MW-HA or the combined MW-IR, while the SEC, however, decreased. The SEC of MW 427 W standalone was lower than MW-HA and MW-IR, in that order.

Table 2. Specific energy consumption (SEC)

Drying condition	Drying time (min)	Drying rate (kg/h)	SEC (MJ/kg water evap.)
MW 427 W	9	0.1482	8.10
MW 584 W	7	0.2177	7.09
MW 704 W	4	0.3795	5.69
MW (427 W)+ HA 45°C	70	0.0339	21.82
MW (427 W)+ HA 55°C	65	0.0339	18.79
MW (427 W)+ HA 65°C	55	0.0255	20.17

MW (427 W)+ IR (1000 W) 45°C	65	0.0254	14.93
MW (427 W)+ IR (1000 W) 55°C	55	0.0243	13.76
MW (427 W)+ IR (1000 W) 65°C	35	0.0234	11.17

### 3.4 Measurement of Color

The results of color parameters:  $L^*$  (brightness-darkness),  $a^*$  (redness-greenness),  $b^*$  (yellowness-blueness) and the combined difference  $\Delta E^*$ , obtained from the 3 employed drying processes: MW, MW-HA and MW-IR are presented in Table 3. It can be seen that when the product colors were compared to that of fresh padanus leaf, all best color values, i.e. those with lowest  $\Delta E^*$  values, were obtained when standalone MW dryings were employed. MW drying standalone yielded much shorter drying time compared to other drying methods and this caused the least changing in the color values. Among the MW standalone results, the best combined color difference from that of fresh padanus was found at MW-704 W.

Table 3. Color value under different drying condition and temperature

Drying condition	Color value (CIE-lab)			
	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E^*$
Initial (Fresh padanus leaf)	30.42	-10.84	21.22	-
MW 427 W	37.69	-10.35	20.04	7.38
MW 584 W	36.68	-10.03	20.20	6.39
MW 704 W	35.12	-9.23	20.04	5.11
MW (427 W)+ HA 45 °C	34.10	-6.95	15.09	8.14
MW (427 W)+ HA 55 °C	36.25	-7.66	15.67	8.65



MW (427 W) + HA 65°C	33.00	-8.68	16.90	5.48	Note: Different superscripts in the same column, regardless of drying method, mean that the values are significantly different at 95 % confidence level (p<0.05)
MW (427 W)+ IR (1000 W) 45°C	38.48	-5.58	18.36	10.04	
MW (427 W)+ IR (1000 W) 55°C	35.02	-7.30	16.99	7.18	
MW (427 W)+ IR (1000 W) 65°C	37.30	-8.59	15.67	9.12	

1 = Extremely dislike 2 = Very much dislike 3 =

Moderately dislike

4 = Slightly dislike 5 = Like nor dislike 6 = Slightly

like

7 = Moderately like 8 = Very much like 9 =

Extremely like

### 3.5 Sensory Evaluation

Table 4 tabulates sensory evaluations under different drying conditions and temperatures. Evaluation on all drying cases revealed that, though there had been some differences with statistical significance under a particular parameter - especially that on texture, the overall acceptability were not significantly different. Moreover, the pandanus leaf dried with microwave standalone is very crisp and can be ground into powders.

**Table 4.** Sensory evaluation under different drying condition and temperature

Drying Condition	Overall Acceptability				Overall Acceptability
	Texture	Odour	Color	Flavor	
<b>MW</b>					
427 W	7.6 <sup>a</sup>	7.1 <sup>a</sup>	6.9 <sup>a</sup>	7.1 <sup>a</sup>	7.2 <sup>a</sup>
584 W	7.5 <sup>a</sup>	7.0 <sup>a</sup>	6.9 <sup>a</sup>	7.4 <sup>a</sup>	7.2 <sup>a</sup>
704 W	7.5 <sup>a</sup>	7.1 <sup>a</sup>	6.8 <sup>a</sup>	7.1 <sup>a</sup>	7.0 <sup>a</sup>
<b>MW (427 W) + HA</b>					
45°C	8.1 <sup>ab</sup>	7.3 <sup>a</sup>	6.9 <sup>a</sup>	7.2 <sup>a</sup>	7.1 <sup>a</sup>
55°C	8.1 <sup>ab</sup>	7.5 <sup>ab</sup>	6.7 <sup>a</sup>	7.1 <sup>a</sup>	7.1 <sup>a</sup>
65°C	8.1 <sup>ab</sup>	7.2 <sup>a</sup>	6.9 <sup>a</sup>	7.0 <sup>a</sup>	7.1 <sup>a</sup>
<b>MW (427 W) + IR (1000 W)</b>					
45°C	7.7 <sup>a</sup>	7.2 <sup>a</sup>	6.9 <sup>a</sup>	7.3 <sup>a</sup>	7.2 <sup>a</sup>
55°C	7.7 <sup>a</sup>	7.5 <sup>ab</sup>	6.8 <sup>a</sup>	7.6 <sup>ab</sup>	7.3 <sup>a</sup>
65°C	7.5 <sup>a</sup>	7.1 <sup>a</sup>	6.9 <sup>a</sup>	7.0 <sup>a</sup>	7.0 <sup>a</sup>

### 4. Conclusion

Pandanus leaves were dried using three different drying methods: microwave (MW), combined microwave-hot air (MW-HA), and combined microwave-infrared (MW-IR). Results revealed that drying temperature affected directly the drying rate of the leaf, with higher drying rate under higher drying temperature. The drying kinetics of the leaf was dependent on the heat source. For the MW standalone, to obtain samples with final moisture content of 8-12% dry basis, the higher the MW power the faster the rate of drying. For the combined MW of 472 W with HA, the resulted drying curves were not much significantly different under any hot air temperature. For the combined MW 472 W with IR 1,000 W, however, it was found that the drying time required decreased significantly with increasing IR temperature. Moreover, it was also less than that of the combined MW-HA at corresponding same temperature. Under specific energy consumption (SEC) and overall color difference evaluations ( $\Delta E^*$ ) on all drying cases, MW standalone at 704 W yielded the least SEC value and the least color

difference from fresh pandanus leaf. With virtually no significance on the overall acceptability, it can be concluded that MW 704 W drying standalone was the most suitable drying method for the leaf. This is not to mention that this technique also needed much less drying time than the other two combined methods and that the leaf dried with microwave standalone is very crisp and can be ground into powders.

##### 5. ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to sincerely thank the Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University (PSU); the Department of Physics, PSU Faculty of Science, and the PSU Graduate School for their combined financial supports for this research, as well as tacit permissions for the authors to make use of their laboratory facilities.

##### 6. References

- Afzal, T. M. and Abe, T. *Simulation of moisture changes in barley during far infrared radiation drying*. Computers and Electronics in Agriculture, vol. 26(2), 2000, pp.137–145.
- AOAC, Official Method of Analysis, 16th ed., *The Association of Official Analytical Chemists*, Inc. Arlington, Virginia, USA, 1995.
- Barbosa-Canovas. G. V. and Vega-Mercado, H. 1996. *Dehydration of foods*, 1st ed., New York, United States of America, p. 29.
- Brunauer, S., Emmett, P. H. and Teller, E. *Adsorption of gases in multi-molecular layers*. J. of Amer. Chem. Soc., vol.60, 1938, pp. 309-319.
- Chou, S. K. and Chua, K. J. 2001. New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs, Trends in Food Science and Technology, vol. 12(10), pp. 359-369.
- Devahastin, S., Tapaneyasin, R. and Tansakul, A. *Hydrodynamic behaviour of a jet spouted bed of shrimp*. J. of Food Eng., vol.74, 2006, pp. 345-351.
- Díaz, R.G., Martínez-Monzó, J., Fito, P. and Chiralt, A. *Modelling of dehydration-rehydration of orange slices in combined microwave/air drying*. Innovative Food Science & Emerging Technologies, vol.4, 2003, pp. 203–209.
- Feng, H. *Analysis of microwave assisted fluidized-bed drying of particulate product with a simplified heat and mass transfer model*. International Communications in Heat and Mass Transfer, vol.29, 2002, pp. 1021–1028.
- Maroulis, Z. B. and Saravacos, G. D. 2003. *Food process design*, 1st ed., New York, USA, pp. 243–244.
- Ren, G. and Chen, F. *Drying of American ginseng (Panax quinquefolium) roots by microwave-hot air combination*. J. of Food Eng., vol. 35, 1998, pp. 433–443.
- Soponronnarit, S. 1997. *Drying grain and some type of food*, 7th ed., King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok.
- Tirawanichakul, S., Linpo, P. and Tirawanichakul, Y. 2009. Influence of infrared and heat convection on drying kinetics of shrimp and quality. Thai Journal of Physics, vol. 4, pp. 116-120.

