

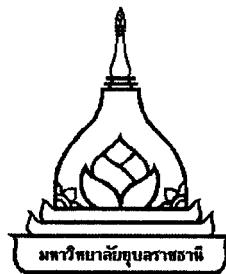
การศึกษาเปรียบเทียบการออมแห่งโดยใช้ลมร้อน และอินฟราเรดไกล

ธนภัทร สุวรรณภูมิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาชีวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

พ.ศ. 2550

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

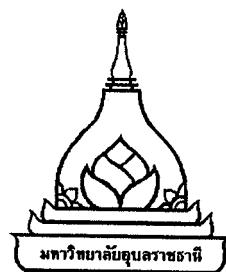


**COMPARATIVE STUDY OF DRYING USING HOT AIR
AND FAR INFRARED**

TANAPAT SUWANNAKOOT

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER ENGINEERING
MAJOR IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
UBON RAJATHANEU UNIVERSITY
YEAR 2007**

COPYRIGHT OF UBON RAJATHANEU UNIVERSITY



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
บริษัทฯ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง การศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน และอินฟราเรด ไก่

ผู้วิจัย นายธนภัทร สุวรรณภูมิ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิ่มไศกค์ ทีบุญนา)
..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดลย์ จารยาเดชอคุลย์)
..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรงชัย วิริยะอ่องไววงศ์)
..... คณบดี
(รองศาสตราจารย์ ดร.สถาพร โภค)


มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี รับรองแล้ว

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุทิศ อินทร์ประสิทธิ์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
ปฏิบัติราชการแทนอธิการบดี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2550

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัย ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมาไพรศักดิ์ ทีบุญมา ในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษา ตลอดการวิจัย คณะกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดมลย์ จารยานเดศอุดมลย์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรงชัย วิริยะอําไพวงศ์ ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่เอื้อเพื่อชุดอุปกรณ์การทดลอง พร้อมกับคำแนะนำอันมีประโยชน์ในการศึกษาค้นคว้าและทดลอง ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง ตามวัตถุประสงค์ ขอขอบคุณ คุณแม่ ศิรินันท์ สุวรรณภูมิ, คุณพ่อ ร้อยเอกนิคม สุวรรณภูมิ และญาติสนิมิตรสายทุกท่าน ที่อยู่หัวใจให้กำลังใจ อิกหั้งยังเป็นแรงผลักดัน ในการทำงาน ลุล่วง การวิจัยได้รับทุนอุดหนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการ อุดมศึกษา (สกอ.) ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

(นายชนกันทร์ สุวรรณภูมิ)

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : การศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน และอินฟราเรด ไก่
โคล : ชนวัฒน์ สุวรรณภูมิ
ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
ประธานกรรมการที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อําไพศักดิ์ ทีนูญนา

ศัพท์สำคัญ : อบแห้ง อบแห้งด้วยลมร้อน อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งด้วยลมร้อน และลมร้อนร่วมรังสีอินฟราเรด โดยใช้เนื้อวัวและพริกเป็นตัวอย่างในการทดลอง สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนมีเงื่อนไขการทดลอง คือ อุณหภูมิอบแห้งอยู่ในช่วง 50-60 องศาเซลเซียส ความเร็วลมอากาศเท่ากับ 0.5 1.0 และ 1.5 เมตรต่อวินาที และความหนาของเนื้อที่ทดลองเท่ากับ 0.5 1.0 และ 1.5 เซนติเมตร ในส่วนของการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดมีเงื่อนไขการศึกษา คือ อุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส ความเร็วลมอยู่ในช่วง 0-1.0 เมตรต่อวินาที พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแท่นอบแห้งอินฟราเรดอยู่ในช่วง 260-640 วัตต์ ระยะห่างระหว่างแท่นอบแห้งอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์เท่ากับ 10 15 และ 20 เซนติเมตร และความหนาของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 0.5 1.0 และ 1.5 เซนติเมตร สำหรับพารามิเตอร์ที่เป็นเกณฑ์ในการศึกษา คือ อัตราการอบแห้ง ความสینเปลี่ยนพลังงานจำเพาะ และสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

ผลการศึกษาพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดสามารถลดระยะเวลาการอบแห้ง โดยความสินเปลี่ยนพลังงานจำเพาะลดลงประมาณ 25-30 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ในส่วนของสมบัติการหล่อหลอม และการเปลี่ยนแปลงของสี พบว่า การอบแห้งทั้งสองวิธีการให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถสรุปผลของแนวโน้มได้ดังนี้ การหล่อหลอมและการเปลี่ยนแปลงของสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง พลังงานที่ป้อนให้กับแท่นอบแห้ง หรือลดความเร็วลม

สำหรับการหาสมการเรомไฟริคัลที่เหมาะสมในการคำนวณความชื้น และเวลาการอบแห้ง ของเนื้อ พนว่าสมการที่สามารถทำนายผลได้ดีที่สุด คือ สมการ Two-term exponential ซึ่งมีค่าความผิดพลาด (RMSE) เท่ากับ 0.01 และค่า R^2 เท่ากับ 0.999 ในส่วนของสมการเรอมไฟริคัลที่สามารถ

ท่านายความชื้นและเวลาการอบแห้งของพริกได้ดีที่สุด คือ สมการ Diffusion approach ซึ่งให้ค่าความผิดพลาด (RMSE) เท่ากับ 0.02 และค่า R^2 เท่ากับ 0.995

ABSTRACT

TITLE : COMPARATIVE STUDY OF DRYING USING HOT AIR AND FAR INFRARED RADIATION
BY : TANAPAT SUWANNAKOOT
DEGREE : MASTER OF ENGINEERING
MAJOR : MECHANICAL ENGINEERING
CHAIR : ASST. PROF. UMPHISAK TEEBOONMA, Ph.D.

KEYWORDS : DRYING / HOT AIR DRYING / INFRARED DRYING

The objective of this research is to study the conventional hot air drying and hot air-infrared drying. To achieve this purpose, beef and chilli were selected as testing materials. The conventional hot air drying was conducted on the following conditions: drying air temperature of 50-60°C; air velocities of 0.5, 1.0 and 1.5 m/s and beef thickness of 0.5, 1.0 and 1.5cm. In case of hot air-infrared drying, drying conditions were inlet air temperature of 40°C, air velocities of 0-1.0 m/s, infrared power of 260-640 watts, distance between infrared heater and product is 10, 15 and 20cm., and beef thickness of 0.5, 1.0 and 1.5cm. The parameters used for evaluating were drying rate, specific energy consumption and physical properties of products.

The experimental results can be concluded that hot air-infrared drying technique provides shorter drying time, higher drying rate and low specific energy consumption when compared to the conventional hot air drying. It was also found that the specific energy consumption of hot air-infrared drying technique was approximately 25-30% lower than that of hot air drying technique. Additionally, the difference of product qualities dried by hot air and hot air-infrared drying techniques were insignificant, in particular shrinkage percentage and color change. It should be noted that shrinkage percentage and color change are increased with increasing of drying air temperature and infrared power or decreasing of air velocity.

The suitable empirical equation for predicting the moisture content and drying time of beef drying was achieved by the curve fitting technique. It showed that the Two-term exponential was the best equation for beef drying. It provides the lowest root mean square error (RMSE) of

0.01 and the highest correlation coefficient (R^2) of 0.999. In case of chilli drying, diffusion approach was the best equation providing the lowest RMSE of 0.02 and the highest R^2 of 0.995.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญภาพ	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฒ
บทที่	

1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย	3
1.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4

2 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การอบแห้งโดยใช้ลมร้อน	5
2.2 การอบแห้งโดยการแพร่รังสีอินฟราเรด	6
2.2.1 กลไกการแพร่รังสีอินฟราเรด	6
2.2.2 การแยกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นผิว	7
2.3 การคำนวณอัตราส่วนความชื้น	9
2.4 รูปแบบสมการการอบแห้งแบบชั้นบาง	10
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
2.5.1 งานวิจัยการอบแห้งด้วยลมร้อน	12
2.5.2 งานวิจัยการอบแห้งด้วยอินฟราเรด	13
2.5.3 งานวิจัยการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3 อุปกรณ์และการทดลอง

3.1	ขั้นตอนการสร้างและออกแบบเครื่องอบแห้ง	16
3.2	เครื่องมือวัดในการทดลอง	23
3.3	การทดลองและเก็บข้อมูล	23
3.3.1	การอบแห้งด้วยลมร้อน	23
3.3.2	การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด	24
3.4	การวิเคราะห์ข้อมูล	25
3.4.1	การวิเคราะห์สมการคณิตศาสตร์	25
3.4.2	การวิเคราะห์สมรรถนะ	25
3.4.3	การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์	26

4 ผลและวิจารณ์

4.1	การอบแห้งเนื้อด้วยลมร้อน	28
4.1.1	ผลของความเร็วลม	28
4.1.2	ผลของอุณหภูมิอบแห้ง	30
4.1.3	ผลของความหนา	33
4.1.4	ผลของการหดตัวและการเปลี่ยนแปลงของสี	35
4.2	การอบแห้งเนื้อด้วยร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด	37
4.2.1	ผลของความเร็วลม	37
4.2.2	ผลของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแท่นรังสีอินฟราเรด	46
4.2.3	ผลของความหนา	48
4.2.4	ผลของระยะห่าง	51
4.2.5	ผลของการหดตัวและการเปลี่ยนแปลงของสี	54
4.3	การเปรียบเทียบการใช้พลังงานในการอบแห้งเนื้อด้วยลมร้อน และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด	55
4.3.1	การอบแห้งเนื้อด้วยลมร้อน	55
4.3.2	การอบแห้งเนื้อด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด	57
4.3.3	การเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้ง ด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด	60

สารบัญ (ต่อ)	หน้า
4.4 สมการจลนศาสตร์การอบแห้ง	62
4.4.1 การอบแห้งด้วยลมร้อน	65
4.4.2 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด	63
4.5 การอบแห้งพริกด้วยลมร้อน	65
4.5.1 ผลของความเร็วลม	65
4.5.2 ผลของอุณหภูมิอบแห้ง	67
4.6 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด	70
4.6.1 ผลของความเร็วลม	70
4.6.2 ผลของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแท่นรังสีอินฟราเรด	78
4.6.3 ผลของระยะห่าง	80
4.6.4 การเปลี่ยนแปลงสี	83
4.7 การเปรียบเทียบการใช้พลังงาน ในการอบแห้งพริกด้วยลมร้อน และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด	84
4.7.1 การอบแห้งพริกด้วยลมร้อน	84
4.7.2 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด	85
4.7.3 การเปรียบเทียบการใช้พลังงาน	86
4.8 สมการจลนศาสตร์การอบแห้ง	87
4.8.1 การอบแห้งพริกด้วยลมร้อน	87
4.8.2 การอบแห้งพริกด้วยลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด	89
5 สรุปผลการศึกษา	
5.1 การอบแห้งด้วยลมร้อน	91
5.2 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด	92
5.3 ข้อเสนอแนะ	93
เอกสารอ้างอิง	94
ภาคผนวก	97
ประวัติผู้วิจัย	161

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของเนื้อที่อบแห้งด้วยลมร้อน	36
4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเนื้อที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด	54
4.3 ผลการทดลองการอบแห้งเนื้อด้วยลมร้อน	57
4.4 ผลการทดลองการอบแห้งเนื้อด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด	60
4.5 แสดงค่าคงที่สำหรับการอบแห้งชั้นบางของเนื้อด้วยลมร้อน	63
4.6 แสดงค่าคงที่ของสมการการอบแห้งชั้นบางของเนื้อด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด	64
4.7 แสดงการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์	
ทดสอบการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด	83
4.8 แสดงการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์	
ทดสอบการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน	84
4.9 ผลการทดลองการอบแห้งพริกด้วยลมร้อน	85
4.10 ผลการทดลองการอบแห้งพริกด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด	86
4.11 แสดงค่าคงที่สำหรับการอบแห้งชั้นบางของพริกด้วยลมร้อน	88
4.12 แสดงค่าคงที่ของสมการการอบแห้งชั้นบางของพริกด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด	89

สารบัญภาพ

ภาคที่	หน้า
2.1 การสูญหายของรังสี	7
2.2 วงจรแสดงการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว I และพื้นผิวอื่น ๆ	9
3.1 แบบจำลองเครื่องอบแห้ง	17
3.2 วงจรความต้านทานการไหลดของความร้อน	18
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 50°C และความหนาของเนื้อ 1.0 cm	28
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 55°C และความหนาของเนื้อ 1.0 cm	29
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 60°C และความหนาของเนื้อ 1.0 cm	30
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความเร็วลม 0.5 m/s และความหนาของเนื้อ 1.0 cm	31
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความเร็วลม 1.0 m/s และความหนาของเนื้อ 1.0 cm	32
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความเร็วลม 1.5 m/s และความหนาของเนื้อ 1.0 cm	32
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 50°C และความเร็วลม 1.0 m/s	34
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 55°C และความเร็วลม 1.0 m/s	34
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 60°C และความเร็วลม 1.0 m/s	35
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 260 W ระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 10 cm	37
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 370 W ระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 10 cm	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 260 W และความเร็วลม 0.1 m/s	49
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 370 W และความเร็วลม 0.3 m/s	50
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 470 W และความเร็วลม 0.5 m/s	50
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 640 W และความเร็วลม 0.7 m/s	51
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 260 W ความเร็วลม 0.3 m/s และความหนาเนื้อ 1.0 cm	52
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 370 W ความเร็วลม 0.3 m/s และความหนาเนื้อ 1.0 cm	52
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 640 W ความเร็วลม 0.3 m/s และความหนาเนื้อ 1.0 cm	53
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความเร็วลม 1.0 m/s	55
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น อุณหภูมิผลิตภัณฑ์กับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C	56
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน ร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ความเร็วลม 0.5 m/s	58
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน ร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ $P = 640 \text{ W}$	59
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 55 °C	66
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 60 °C	66
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 65 °C	67
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความเร็วลม 0.5 m/s	68
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความเร็วลม 1.0 m/s	68
4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความเร็วลม 1.5 m/s	69

สารบัญภาพ (ต่อ)

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่

4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ระยะห่าง 15 cm ความเร็วลม 0.3 m/s	79
4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ระยะห่าง 20 cm ความเร็วลม 0.3 m/s	80
4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 640 W ความเร็วลม 0.3 m/s	81
4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 640 W ความเร็วลม 0.5 m/s	82
4.59 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 640 W ความเร็วลม 1.0 m/s	82

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
MC	ความชื้น	เปอร์เซ็นต์
MR	อัตราส่วนความชื้น	-
M_t	ความชื้นที่เวลาใด ๆ	เปอร์เซ็นต์
M_m	ความชื้นเริ่มต้น	เปอร์เซ็นต์
P	กำลังไฟฟ้า	วัตต์
ΔE	ค่าการเปลี่ยนแปลงสี	-
ΔL	ค่าความสว่าง	-
Δa	ค่าสีแดงและเขียว	-
Δb	ค่าสีเหลืองและน้ำเงิน	-
A	พื้นที่ผิว	ตารางเมตร
SEC	ความลึ่นเปลืองพลังงานจำเพาะ	เมกะจูลต่อกรัม น้ำระเหย
$^{\circ}\text{C}$	อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส
$^{\circ}\text{K}$	อุณหภูมิ	องศาเคลวิน
cm	หน่วยความยาว	เซนติเมตร
m	หน่วยความยาว	เมตร
m^2	หน่วยพื้นที่	ตารางเมตร
W/m^2	หน่วยพลังงาน	วัตต์ ต่อ ตารางเมตร
m/s	หน่วยความเร็ว	เมตร ต่อ วินาที
W	หน่วยพลังงาน	วัตต์
kJ	หน่วยพลังงาน	กิโลจูล
MJ	หน่วยพลังงาน	เมกกะจูล
kg	หน่วยน้ำหนัก	กรัม
hr	หน่วยเวลา	ชั่วโมง
IR	รังสีอินฟราเรด	-

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ผลผลิตการเกษตรภายในประเทศจะมีมากตามอุดuctual เท่านั้น ในขณะที่ความต้องการในการบริโภคจะมีตลอดทั้งปี ฉะนั้นจึงเกิดปัญหาที่ตามมา คือ ในอุดuctual ที่ผลผลิตออกสู่ตลาดมาก ราคาของผลผลิตการเกษตรต่ำ ทำให้เกษตรกรประสบปัญหากับการขาดทุนมาโดยตลอด ในทางตรงกันข้ามมูลค่าของผลผลิตนักอุดuctual จะมีราคาค่อนข้างแพง ดังนั้นเพื่อเป็นการเก็บรักษาผลผลิตทาง การเกษตร ไว้สำหรับบริโภคตลอดทั้งปีและเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์จึงมีการนำเอาผลผลิต การเกษตรมาทำการอบแห้งหรือลดความชื้นเพื่อให้สามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น และมีการนำไปปรุงเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มการลดความชื้นสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การอบแห้งด้วยไอน้ำ ร้อนbatch ยิ่ง การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ การอบแห้งด้วยสูญญากาศ การอบแห้งด้วยปืนความร้อน การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด การอบแห้งในแต่ละวิธีก็จะมีข้อดี ข้อเสียที่แตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น การอบแห้งด้วยการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนbatch ยิ่ง การอบแห้งด้วยสูญญากาศ และการอบแห้งด้วยปืนความร้อน ซึ่งคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ obt จากสารเคมีนี้จะดี แต่ สำหรับข้อเสียก็คือ การมีระบบที่ซับซ้อนและต้นทุนที่สูง ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วไม่เหมาะสมกับ สถานที่ที่ obt มีคุณภาพสูง แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องความปลอดภัยจากคลื่นสนามแม่เหล็ก ทำให้ ยังจำกัดการใช้อยู่แค่เตาอบขนาดเล็กสำหรับใช้ในห้องครัว

การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีต้นทุนในการสร้างเครื่องที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ ที่ได้กล่าว เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนสามารถใช้ แหล่งความร้อนได้จากหลายแหล่งที่หาได้ง่าย เช่น จากชุดควบคุมความร้อน น้ำมันเชื้อเพลิง แอลพีจี (LPG) พลังงานแสงอาทิตย์ หรือความร้อนที่จากการเผาต่างๆ ในโรงงาน แหล่งพลังงานที่ถูก ที่สุด ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ แต่ก็มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถทำได้หากสภาพอากาศ ไม่เอื้ออำนวย ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่สะอาดพอ และต้องใช้พื้นที่มาก ตั้งแต่ให้อัตราการผลิตต่ำ นอกเหนือจากการ อบแห้งด้วยลมร้อนแล้วยังมีอีกวิธีหนึ่งที่มีต้นทุนต่ำ คือ การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ซึ่งจุดเด่นที่ นำสู่มาในวิธีนี้คือ ประการแรกพลังงานจากรังสีอินฟราเรดจะถูกแปลงเป็นรังสีอุตุชั่งจะทำให้ไม่เกิด ของน้ำภายในวัสดุสั่น และเกิดความร้อนขึ้น ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิภายในวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว

ขุดเด่นตรงนี้เองที่ทำให้ผู้ภายนอกวัสดุไม่เหี่ยวย่นซึ่งจะช่วยให้มีอัตราการอบแห้งที่สูงลดระยะเวลา การอบแห้งและพลังงานที่ใช้ด้วย ประการที่สองหลอดครั้งสีอินฟราเรดให้ heat flux ที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงมีขนาดอุปกรณ์ที่เล็ก ทำให้สามารถออกแบบเครื่องอบแห้งที่มีขนาดกะทัดรัด ซึ่งจะช่วยลด เงินลงทุนเบื้องต้นในการผลิตเครื่องอบแห้ง ประการที่สามการให้ความร้อนโดยการแผ่รังสีจะทำให้ อุณหภูมิกระจายค่อนข้างสม่ำเสมอ จึงไม่มีปัญหาในเรื่องความชื้น ไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งยังต้องการ อากาศหมุนเวียนเพียงเล็กน้อย ทำให้ไม่ต้องใช้พัดลมตัวใหญ่ ซึ่งเป็นการลดทั้งต้นทุนอุปกรณ์ และ ค่าพลังงาน และประการสุดท้าย คือ รังสีอินฟราเรดสามารถ นำไปใช้ควบคู่กับระบบอื่นได้ง่าย เนื่องจากใช้พื้นที่ในการติดตั้งที่น้อย ไม่มีความซับซ้อนของระบบ รวมทั้งตอบสนองต่อการควบคุม ได้รวดเร็ว

จากข้อสรุปเบื้องต้นงานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะศึกษาถึงข้อดี และข้อเสียของการอบแห้ง ด้วยลมร้อน การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด และระบบสุดท้ายคือ การอบแห้งโดยใช้ลมร้อนและ รังสีอินฟราเรดควบคู่กัน โดยคาดหวังว่าจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้ง และการแปรรูป ผลิตผลการเกษตรได้เป็นอย่างดี โดยที่เครื่องอบแห้งมีราคาไม่แพง สำหรับผลิตภัณฑ์เบื้องต้นที่จะ นำมาทดสอบได้แก่ 1) พริก เนื่องจากพริกจัดเป็นเครื่องเทศที่อาหารแทนทุกรายการต้องใช้ อีกทั้ง พริกสามารถแปรรูปเป็นได้ทั้งพริกแห้ง หรือพริกป่น 2) เนื้อวัว สำหรับผลิตภัณฑ์ที่เลือก เพราะว่า ร้านอาหารส่วนใหญ่จะมีรายการอาหารเนื้อแห้ง หรือเนื้อแดดเดียว การผลิตที่ผ่านมาใช้วิธีตากแดด ซึ่งจะมีปัญหารื่องความสะอาด เช่น ผุน และแมลงต่างๆ จากการวิเคราะห์เบื้องต้นมีความเป็นไปได้ ที่จะผลิตเนื้อแดดเดียวโดยการอบแห้งแบบต่อเนื่องด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาเปรียบเทียบผลงานศาสตร์การอบแห้ง โดยใช้ลมร้อน และลมร้อนร่วมกับ อินฟราเรด ไกล

1.2.2 ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพการอบแห้งด้วยลมร้อน และลมร้อนร่วมกับ อินฟราเรด ไกล

1.2.3 พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์การอบแห้ง โดยใช้ลมร้อน และลมร้อนร่วมกับ อินฟราเรด ไกล

1.3 ข้อมูลของงานวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งโดยใช้ลมร้อน และอินฟราเรด ไกลขนาดห้องปฏิบัติการ(Laboratory scale) โดยมีขนาดของห้องอบแห้ง 30 x 50 x 30 cm (กว้าง x ยาว x สูง)
- 1.3.2 ผลิตภัณฑ์ศึกษา ได้แก่ พริกและเนื้อวัว
- 1.3.3 อุณหภูมิอากาศที่ใช้อบแห้งเป็น 50, 55, 60 และ 65 °C
- 1.3.4 กำลังงานที่ใช้ให้กับแท่นอบ อินฟราเรด เท่ากับ 260, 370, 470 และ 640 W
- 1.3.5 กระบวนการอบแห้งศึกษา ได้แก่
- 1.3.5.1 การอบแห้งโดยใช้ลมร้อน
 - 1.3.5.2 การอบแห้งโดยใช้ลมร้อนและอินฟราเรด ไกลควบคู่กัน
- 1.3.6 สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ สี และ การหดตัว
- 1.3.7 พารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาเปรียบเทียบ ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง อัตราการสีเปลี่ยนพลังงานจำเพาะ
- 1.3.8 ความสามารถแห้งที่เหมาะสมสำหรับ ทำนายความชื้นเนื้อวัวและพริกเมื่ออบแห้ง ด้วยลมร้อน และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ไกล

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากหนังสือหรือวารสาร
- 1.4.2 ศึกษาทฤษฎีการออกแบบเครื่องอบแห้งโดยใช้ลมร้อนและอินฟราเรด ไกล โดยออกแบบตามเงื่อนไขของการศึกษา
- 1.4.3 สร้างเครื่องอบแห้งโดยใช้ลมร้อนและอินฟราเรด ไกล
- 1.4.4 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่
- 1.4.4.1 ทดสอบการหดตัว โดยใช้สารเคมี N – Heptane หากการหดตัวของผลิตภัณฑ์
 - 1.4.4.2 ทดสอบการเปลี่ยนแปลงของสี โดยใช้เครื่องวัดสี Minalta model Chroma meter CR 300
- 1.4.5 วิเคราะห์และสรุปผลการศึกษาเปรียบเทียบ
- 1.4.6 สร้างสมการจնศาสตร์การอบแห้ง
- 1.4.7 เผยแพร่รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

1.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- 1.5.1 เครื่องอบแห้งโดยใช้ลมร้อนและอินฟราเรดไกล
- 1.5.2 คอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณสมการคลนศาสตร์การอบแห้ง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ทราบถึงพฤติกรรมการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน และอินฟราเรดไกล
- 1.6.2 ทราบถึงข้อดี และข้อเสียของการอบแห้งในแต่ละวิธี
- 1.6.3 ทราบแนวทางสำหรับพัฒนาผลิตภัณฑ์ เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม
- 1.6.4 ทราบถึงความเป็นไปได้ในการขยายสเกล เพื่อนำมาใช้งานในระดับอุตสาหกรรม
- 1.6.5 ได้อย่างคุณภาพสำหรับนำไปพัฒนาเทคโนโลยีด้านการอบแห้ง

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเอกสาร ซึ่งประกอบด้วยงานวิจัย และทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

2.1 การอบแห้งโดยใช้ลมร้อน

สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน ความร้อนจากอากาศร้อนจะถ่ายเทไปยังผิวค้างนอกของวัสดุทำให้ความชื้นหรือไอน้ำระเหยออกจากผิวติด แล่น้ำภายในวัตถุจะเคลื่อนที่มาขยับผิวแต่การเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัตถุจะชี้กร่าวการระเหยออกของน้ำที่ผิวทำให้ในการอบแห้งด้วยลมร้อนในช่วงแรกมีอัตราการอบแห้งที่รวดเร็ว จากนั้นอัตราการอบแห้งก็จะลดลงเรื่อยๆ จนถึงจุดๆ หนึ่ง ก็จะไม่การเปลี่ยนแปลง โดยการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นแบบการพาความร้อนโดยน้ำอากาศร้อนเป็นตัวกลางพาความร้อน ซึ่งการพาความร้อนแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ

2.1.1 การพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของเหลว ของไอลจะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสถกับผิวของของแข็งโดยกลไกภายนอก

2.1.2 การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Free Convection หรือ Natural Convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของเหลว โดยไม่มีกลไกใดๆ ที่ทำให้ของไอลเคลื่อนที่ แต่ของไอลที่อยู่ใกล้กับผิวของของแข็งก็อาจเคลื่อนที่ได้โดยแรงดึงดูดตัวของของไอลเอง แรงดึงดูดตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไอล เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไอล

สมการสำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อน คือ

$$\text{Newton of cooling} \quad q = hA(T_h - T_c) \quad (2.1)$$

ความสัมพันธ์นี้รู้จักในชื่อ “กฎการเย็นตัวของนิวตัน” (Newton of cooling)

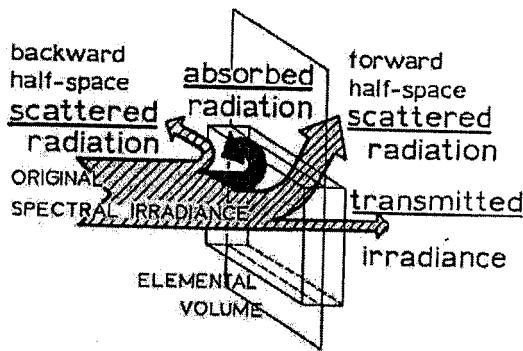
โดย h คือ สามประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยที่ผิวสัมผัสระหว่างของไอลกับวัตถุ หน่วย $\text{W/m}^2\text{C}$, T_h คือ อุณหภูมิที่ร้อนกว่า หน่วย $^\circ\text{C}$, T_c คือ อุณหภูมิที่เย็นกว่า หน่วย $^\circ\text{C}$

2.2 การอนแห่งโดยการแพร่รังสีอินฟราเรด

แห่งอินฟราเรค่มีคุณสมบัติในการกระจายรังสีพลังงาน โดยจะทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยน พลังงานความร้อนเป็นรังสีอินฟราเรคในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน มีความทนทานต่ออุณหภูมิที่สูงหมายในการใช้คิดต่อกันเป็นเวลานาน ถ่ายเทความร้อนได้ดี แผ่ความร้อนได้สม่ำเสมอ แข็งแรงทนทาน บำรุงรักษาง่าย ซึ่งวัสดุจะถูกทำให้ร้อนโดยการแพร่รังสีความร้อน สามารถกระจายความร้อนเท่ากันตลอดพื้นผิว ซึ่งคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะสามารถเจาะทะลุเข้าถึงเนื้อภายในวัสดุ โดยขนาดความลึกที่เจาะเข้าไปได้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ และความยาวคลื่นที่แผ่ออกไป (Hebber, H.U. and Rastogi, N.K., 2001) โดยรังสีอินฟราเรคจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง $0.78\text{-}1,000 \mu\text{m}$ (Sakai, N. and Hanzawa, T., 1994) โดยแบ่งย่อยได้เป็น 3 ระดับคือ รังสีอินฟราเรค ใกล้ (Near infrared, NIR) $0.75\text{-}3 \mu\text{m}$ รังสีอินฟราเรคกลาง (Middle infrared, mid-IR) $3\text{-}25 \mu\text{m}$ รังสีอินฟราเรคไกล (Far infrared, FIR) $25\text{-}100 \mu\text{m}$ โดยที่คลื่นสนามไฟฟ้าที่เจาะทะลุเข้าไปจะไปกระตุ้นโมเลกุln้ำภายในวัสดุ โดยทำให้สั่น และเกิดความร้อนขึ้นทำให้อุณหภูมิภายในวัสดุสูงกว่า อุณหภูมิที่ผิวนอก ซึ่งจะคิดค่านครองนี้สามารถลดปัญหาการเกิดรอยเหี่ยวย่นและรอยใหม่ที่ผิวนอกของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้การให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดยังทำให้อุณหภูมิภายในเนื้อวัสดุกระจายค่อนข้างสม่ำเสมอ ซึ่งช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในช่วง falling rate ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยวิธีนี้ จึงมีคุณภาพดี

2.2.1 กลไกการแพร่รังสีอินฟราเรค

เมื่อรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบและแพร่กระจาย (propagate) ผ่านวัสดุทำให้เกิดการสูญเสียของรังสี (extinction of radiation) เนื่องจากรังสีบางส่วนจะถูกวัสดุดูดกลืน (absorption) และเปลี่ยนแปลงไปเป็นพลังงานความร้อนภายในตัววัสดุ บางส่วนเกิดการกระเจิง (scattering) ทำให้รังสีมีทิศทางแตกต่างจากทิศทางของรังสีจากแหล่งกำเนิด และส่วนที่เหลือจะเกิดการส่งผ่านวัสดุ (transmission) ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การสูญหายของรังสี (Sandu, C., 1986)

2.2.2 การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นผิว

ผลงานจากการแผ่รังสีความร้อนที่ออกจากพื้นผิวใดพื้นผิวนึง(i) เมื่อมีการกระทำบนพื้นผิวที่สอง (j) อาจได้รับการคูคูกลืนหรือสะท้อนกลับ แต่ถ้าพื้นผิวดังกล่าวเป็นวัตถุดำ รังสีซึ่งกระทะบนจะถูกคูคอกลืนไว้ทั้งหมด ความร้อนจากการแผ่รังสีจากวัตถุหนึ่งอาจถ่ายเทมาซึ่งอีกวัตถุหนึ่งได้บางส่วนหรือทั้งหมด สัดส่วนของรังสีความร้อนที่กระทะบนพื้นผิว j ต่อรังสีความร้อนที่แผ่ออกจากพื้นผิว i เรียกว่า view factor หรือ shape factor (F_{ij}) การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุคำที่อุณหภูมิแตกต่างกันสามารถแสดงความสัมพันธ์อยู่ในสมการของสตีเฟน-โบลต์แมนและ shape factor ดังสมการที่ (2.2)

$$Q_b = A_i F_{ij} \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (2.2)$$

เมื่อ Q_b คือ อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุคำ, A_i คือ พื้นที่ผิวของวัตถุ i, F_{ij} คือ view factor หรือ shape factor ระหว่างพื้นผิว i และ j, σ คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann = 5.67×10^{-8} , T_i คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของพื้นผิว i, T_j คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของพื้นผิว j

การพิจารณาปัญหาการแลกเปลี่ยนความร้อนในบริเวณซึ่งล้อมรอบด้วยพื้นผิวหลายอัน (enclosure) และเป็นพื้นผิวที่เทาจริงหรือพื้นผิวเทา (gray surfaces) ซึ่งมีการสะท้อนรังสีความร้อนออกจากรากทุกพื้นผิว โดยมีรังสีบางส่วนถูกคูคอกลืน ไว้ท่านัน ในการวิเคราะห์จะสมมติว่าแต่ละพื้นผิวใน enclosure มีอุณหภูมิเท่ากันทุกจุด (isothermal) และตัวกลางระหว่างพื้นผิวภายใน enclosure สมมติว่าเป็น nonparticipating medium คือไม่มีผลต่อรังสีความร้อน อัตราการแลกเปลี่ยน

ความร้อนสูทชิภายใน enclosure ที่ประกอบด้วยพื้นผิว i และพื้นผิว j สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการของสตีเฟน-โบลซ์เมน ค่าการแผ่รังสีและ shape factor ดังสมการที่ (2.3)

$$Q_{ij} = \frac{\sigma(T_i^4 \cdot T_j^4)}{\frac{1 - \epsilon_i}{\epsilon_i A_i} + \frac{1}{A_i F_{ij}} + \frac{1 - \epsilon_j}{\epsilon_j A_j}} \quad (2.3)$$

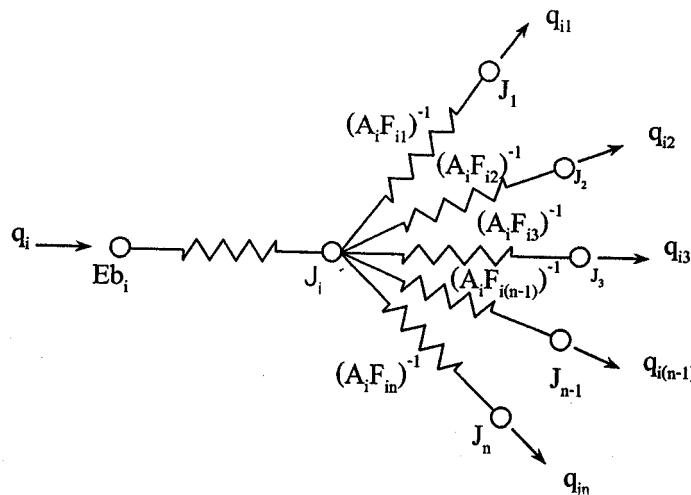
เมื่อ Q_{ij} คือ อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุคู่, A_i คือ พื้นที่ผิวของวัตถุ i, F_{ij} คือ view factor หรือ shape factor ระหว่างพื้นผิว i และ j, σ คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann = 5.67×10^{-8} , T_i คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของพื้นผิว i, T_j คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของพื้นผิว j

ในการณ์ที่ enclosure ประกอบด้วยพื้นผิวมากกว่าสองพื้นผิว การแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 2.2 และอัตราการถ่ายเทความร้อนสูทชิออกจากพื้นผิว i มีค่าเท่ากับผลรวมของการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว i และพื้นผิวอื่น ๆ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของพลังงานจากการแผ่รังสีความร้อนของพื้นผิว (Emissive power) พลังงานจากรังสีทั้งหมดที่ออกจากพื้นผิว (surface radiosity) ค่าการแผ่รังสีและ shape factor ดังสมการ(2.4)

$$\frac{E_{bi} - J_i}{\frac{1 - \epsilon_i}{\epsilon_i A_i}} = \sum_{j=1}^N \frac{J_i \cdot J_j}{(A_i F_{ij})^{-1}} \quad (2.4)$$

โดยที่ E_{bi} คำนวณได้จาก

$$E_{bi} = \sigma T_i^4 \quad (2.5)$$



ภาพที่ 2.2 วงจรแสดงการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว i และพื้นผิวอื่นๆ ใน enclosure

เมื่อ Eb_i คือ Emissive power ของพื้นผิว i , J_i คือ ค่า surface radiosity ของผิว i , J_j คือ ค่า surface radiosity ของผิว j , N คือ จำนวนพื้นผิวภายใน enclosure

2.3 การคำนวณอัตราส่วนความชื้น

โดยที่อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) คำนวณจาก

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (2.6)$$

เมื่อ M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น, M_t คือ ความที่เวลาใด ๆ, M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล

การคำนวณอัตราส่วนความชื้นในงานวิจัยนี้ เป็นการคำนวณโดยประมาณค่า คือ ไม่คิดความชื้นสมดุล โดยตั้งสมมุติฐานว่ามีค่าน้อย เมื่อเทียบกับความชื้นเริ่มต้นและความชื้นที่เวลาใด ๆ เมื่อได้ผลการทดลองแล้ว นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับสมการการอบแห้งชั้นบางที่ใช้สำหรับคำนากย์ความชื้นของผลิตภัณฑ์ โดยได้สำรวจจากงานวิจัยต่าง ๆ พบร่วมกันที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อคำนากย์การอบแห้งชั้นบางมีรายละเอียดคงที่จะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

2.4 รูปแบบสมการการอบแห้งแบบชั้นบาง

สมการการอบแห้งแบบชั้นบาง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองการอบแห้งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสามารถสรุปได้ดังนี้

สมการของ Newton

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \exp[-kt] \quad (2.7)$$

สมการของ Page

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \exp[-kt^N] \quad (2.8)$$

สมการของ Modified page

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \exp[-(kt)^N] \quad (2.9)$$

สมการของ Henderson and Pabis

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = A \exp[-kt] \quad (2.10)$$

สมการของ Logarithmic

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = A \exp[-kt] + C \quad (2.11)$$

สมการของ Two term

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = A \exp[-k_0 t] + b \exp[-k_1 t] \quad (2.12)$$

สมการของ Wang and Singh

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = 1 + at + bt^2 \quad (2.13)$$

สมการของ Approximation of diffustion

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = A \exp[-kt] + (1-a) \exp[-kbt] \quad (2.14)$$

สมการของ Two – term exponential

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = A \exp[-kt] + (1-a) \exp[-kat] \quad (2.15)$$

การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสมการการอบแห้งชั้นบาง ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทดสอบแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression) นอกจากนี้ยังใช้ค่า (root mean square error, RMSE) เป็นตัวบ่งชี้ ที่แสดงความสามารถในการทำนายของสมการ ซึ่งนิยามของ RMSE มีดังสมการ (2.16)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{Prediction},i} - MR_{\text{Experiment},i})^2}{N}} \quad (2.16)$$

เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 งานวิจัยการอบแห้งด้วยลมร้อน

Krokida, M.K. and et al. (2003) ศึกษาหาตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้ง เช่น อุณหภูมิอากาศ ความชื้นอากาศ และความเร็วอากาศ โดยใช้วัตถุคิบในการทดสอบลมร้อน ได้แก่ มันฝรั่ง แครอท พริก เห็ด หัวหอม ผักลีค ถั่ว ข้าวโพด จีนฉ่าย พิกทอง มะเขือเทศ โดยได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาค่าคงที่ของการอบแห้ง ที่ความชื้นในการทดลองคงที่ในช่วง $0.1 - 0.9$ ที่อุณหภูมิ 30 และ 70°C และปรับค่าที่ได้ด้วยวิธีของ GAB พบว่าคุณสมบัติของอากาศมีอิทธิพลต่อค่าคงที่ในแบบจำลอง ซึ่งแบบจำลองการอบแห้งนี้สามารถนำไปใช้ในการทำนายการอบของผักที่ทดลองนี้ได้

Ebru Kavak Akpinar and et al. (2002) ได้ทำการศึกษาพัฒนาระบบของพริก จีนุที่ทำการทดลองในตู้อบแห้ง และจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ ในการทดลองอบแห้งใช้ ความเร็วลม 1.5 m/s โดยให้อุณหภูมิตู้อบเป็น $55, 60$ และ 70°C พบว่าเวลาที่ใช้ในการอบอยู่ระหว่าง $160 - 300$ นาที เมื่อลดความชื้นลงเหลือ 10 เปอร์เซ็นต์ และนำเอาผลการทดลองที่ได้มา ศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์ โดยได้วิเคราะห์จาก 11 สมการพบว่าวิธีการ Approximation of diffusion ได้ผลออกมากใกล้เคียงกับการทดลองที่สุด จึงได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบ เพื่อหาค่าคงที่ ต่าง ๆ จากสมการดังกล่าว เพื่อนำมาใช้ศึกษาอิทธิพลของลมร้อน และได้ค่าคงที่ $r = 0.9987$, $X^2 = 3.32 \times 10^{-4}$ และ $\text{RMSE} = 0.0174$

Ibrahim Doymaz. (2007) ทดลองอบแห้งมะเขือเทศโดยใช้ลมร้อนในการศึกษา คุณสมบัติการอบแห้ง ในการทดลองอบแห้งใช้ความเร็วลม 1.5 m/s อุณหภูมิในการอบเป็น $55, 60, 65$ และ 70°C ทำการเตรียมมะเขือเทศสุ่มลงในสารละลายที่มี 2 เปอร์เซ็นต์ ethyl oleate และ 4 เปอร์เซ็นต์ Potassium Carbonate(K_2CO_3) นำผลที่ได้มาศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้สมการ Henderson and Pabis, and Page พบว่าสมการ Page สามารถอธิบายการอบแห้งมะเขือเทศได้ดีที่สุด

Ibrahim Doymaz. (2007) ศึกษาพัฒนาระบบการอบแห้งพิกทองโดยใช้ลมร้อน เครื่องอบแห้งที่ใช้ศึกษามีขนาดสำหรับห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ $50, 55$ และ 60°C ที่ความเร็วลมคงที่เท่ากับ 1 เมตรต่อวินาที ความชื้นสัมพัทธ์อากาศอยู่ระหว่าง $15-25$ เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาพบว่าพิกทอง มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ร้อนอยู่ระหว่าง $3.88 \times 10^{-10} - 9.38 \times 10^{-10}$ ตารางเมตรต่อวินาที โดยมีค่า activation energy เท่ากับ 78.93 กิโลจูลต่้อมล

2.5.2 งานวิจัยการอบแห้งด้วยอินฟราเรด

Abe, T. and et al. (1997) ทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 30°C โดยกำหนดค่าความเร็วอากาศ (V) คือ $0.3, 0.5, 0.7 \text{ m/s}$ ใช้ความเข้มของรังสี $0.167, 0.333, 0.500, 0.625 \text{ W/cm}^2$ ความชื้นเริ่มต้น เท่ากับ $0.25, 0.35, 0.47$ เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ใช้วิธีลมร้อน ร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล จากการอบแห้งอย่างต่อเนื่องพบว่า ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกมีผล ต่อเวลาในการอบแห้งน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับการเพิ่มความเร็วอากาศ และความเข้มรังสี อินฟราเรดซึ่งช่วยลดเวลาในการอบแห้งค่อนข้างมาก จากงานวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่มี ความชื้นสูง หรือเมล็ดพืชจะเหมาะสมกับการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด นอกจากนี้ได้พัฒนา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 4 แบบจำลอง เพื่อขอรบกวนการอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยรังสี อินฟราเรดแบบชั้นบาง โดยพิจารณาแบบจำลองที่สามารถทำนายได้ถูกต้องที่สุดจากค่าที่ต่ำที่สุด ของ residuals of moisture และ root mean square errors, (RMSE) ระหว่างอัตราส่วนความชื้นของ การทดลองและอัตราส่วนความชื้นของการทำนาย แบบจำลองทั้ง 4 โดย Exponential model, Page's model, Diffusion model และ Approximation of the diffusion model หรือ Wang and Singh's model

จากการวิเคราะห์ผลที่ได้ พบว่า พารามิเตอร์ของ exponential model, Page's model และ Approximation of diffusion model ขึ้นอยู่กับความเข้มของการแผ่รังสี และความเร็วของ อากาศทางเข้า แต่จะไม่ขึ้นกับระดับของความชื้นเริ่มต้น และแบบจำลองทั้ง 3 แบบดังกล่าวจะ สามารถทำนายได้ถูกต้องเหมือนกัน เพราะเมื่อจากมีค่า residuals of moisture และ RMSE ต่ำ เหมือนกันส่วน diffusion models ที่พิจารณาปัจจัยของเมล็ดข้าวเปลือกเป็นทรงกลมนั้น ขึ้นอยู่กับ ความชื้นเริ่มต้นในระดับต่างๆ แต่แบบจำลองดังกล่าวจะไม่สามารถขอรบกวนการอบแห้ง ด้วยรังสีอินฟราเรด ได้ ดังนั้นจากการเปรียบเทียบแบบจำลองทั้ง 4 แบบ พบว่า แบบจำลองที่สามารถ ขอรบกวนผลของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรดแบบชั้นบาง ได้ดีที่สุด คือ Page's model

Afzal, T.M. and et al. (1998) ทำการทดลองอบแห้งมันฝรั่ง โดยเก็บไว้ที่ 5°C ใช้ความเร็วอากาศ 0.5 m/s ความชื้นสัมพัทธ์ 36 เปอร์เซ็นต์ ใช้ความเข้มของรังสี $0.125, 0.250, 0.375, 0.500 \text{ W/cm}^2$ และให้ความหนาของแผ่นมันฝรั่งเป็น $2.5, 6.5$ และ 10.5 mm โดยศึกษา ผลกระทบของการอบแห้งเมื่อมีการเพิ่มความเข้มของรังสี และเมื่อมีการเพิ่มความหนาของมันฝรั่ง จากการทดลองพบว่าอัตรา การอบแห้งขึ้นอยู่กับความเข้มของ FIR ที่ใช้ สัมประสิทธิ์ของการ แผ่รังสีของ FIR อยู่ระหว่าง 5.93×10^{-11} และ 1.73×10^9 ใช้พลังงาน $2,057 \text{ kJ/kg}$ สำหรับตัวแปรที่มี ผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ หรืออัตราการอบแห้ง คือ ความเข้มการแผ่รังสี (radiative intensity) และ อัตราการไคลอากาศ โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์มีผลน้อยมาก

Sheridan, P. and et al. (1999) ทดลองอบแห้งเนื้อเพื่อศึกษาผลกระทบของการประกอบอาหารจำพวก hamburger โดยใช้รังสีอินฟราเรด ไก่ความยาวคลื่น 4.0 μm , รังสีอินฟราเรดกลาง ความยาวคลื่น 2.7 μm ทดลองเปรียบเทียบกัน ผลที่ได้คือ รังสีอินฟราเรดกลาง อบแห้งได้มีประสิทธิภาพมากกว่าแบบรังสีอินฟราเรดไก่ 55 เปอร์เซ็นต์ แต่มีอัตราลดลงโดยเพิ่มไขมันขึ้นจาก 10 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการอบแห้งด้วยวิธีทั้งสองเริ่มให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

Hebber, H.U. and et al. (2001) ศึกษาการอบแห้งมะม่วงหิมพานต์ โดยกำหนดอุณหภูมิในการทดลอง คือ $100 - 120 ^\circ\text{C}$ ใช้สมการของ Arrhenius ในการช่วยหาค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งจากการทดลอง พบว่าการอบเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยใช้รังสีอินฟราเรด ใช้พลังงาน 28.7 กิโลจูลต่อโมล และเมื่ออุณหภูมิของหลอดครั้งรังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

Mongpraneet, S. and et al. (2002) ทดลองอบแห้งหัวหอมด้วยรังสีอินฟราเรด ไก่ภายในตู้อบ ให้สูญเสียความชื้น พบว่าการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดทำให้อุณหภูมิภายในเนื้อวัสดุกระจายค่อนข้างสม่ำเสมอ และช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในช่วง falling rate ตั้งนั้นผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยวิธีนี้จึงมีคุณภาพดี

Gloannec, P. and et al. (2002) ทดลองอบแห้งรังสีอินฟราเรดกับโลหะ พบว่า การอบแห้งด้วยวิธีนี้พลังงานจากรังสีอินฟราเรดจะถูกแผ่ไปยังวัสดุซึ่งจะทำให้โนเลกูลของน้ำภายในวัสดุสูญ และเกิดความร้อนขึ้นซึ่งจะทำให้อุณหภูมิภายในวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว จุดเด่นตรงนี้เองที่ทำให้ผิวภายนอกวัสดุไม่เที่ยวบ่น ซึ่งจะช่วยให้มีอัตราการอบแห้งที่สูง ลดระยะเวลาการอบแห้งและพลังงานที่ใช้ด้วย

2.5.3 งานวิจัยการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด

Afzal, T.M. and et al. (1999) ทดลองอบแห้งข้าวบาร์เล่ย์ โดยกำหนดความเร็วอากาศ เท่ากับ 0.3, 0.5, 0.7 m/s ใช้ความเข้มของรังสี 0.167, 0.333, 0.500 W/cm² ความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 0.23 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ที่อุณหภูมิ $40 ^\circ\text{C}$, $55 ^\circ\text{C}$ และ $70 ^\circ\text{C}$ โดยทำการทดลองอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไก่ร่วมกับคลื่นไฟฟ้าให้ความร้อน และในการทดลองใช้คลื่นไฟฟ้าให้ความร้อนอย่างเดียวเปรียบเทียบกัน พบว่าที่ความเข้มข้น 0.333 W/cm² มีความเหมาะสมที่สุด ความเร็วลมมีผลต่อการสีนเปลี่ยนพลังงาน นอกจากนี้จากการทดลองพบว่าอินฟราเรดยังมีข้อดีในด้านการใช้พลังงาน ซึ่งพบว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดจะใช้เวลาในการอบแห้ง (Drying time) ที่สั้น และมีอัตราการสีนเปลี่ยนพลังงานจำเพาะต่อ

Hebber, H.U. and et al. (2003) พัฒนาระบบการทำงานร่วมกันของอินฟราเรด และการอบแห้งด้วยลมร้อนในการประกอบอาหาร โดยได้ใช้ในการอบแห้งผัก ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบการอบแห้งโดยใช้อินฟราเรด อบแห้งด้วยลมร้อน และใช้อินฟราเรดกับลมร้อน



ร่วมกัน โดยทดสอบบนแห้ง แครอท และมะพร้าว ที่อุณหภูมิ 80°C จากการทดลองพบว่าการนำเอาระบบการทำงานร่วมกันมาใช้ทำให้ลดเวลาในการอบแห้งลง 48 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งใช้พลังงานน้อยลง 63 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับแบบที่ใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้เมื่อนำมาปรุงเทียบ กับแบบที่ใช้อินฟราเรดเพียงอย่างเดียวยังพบว่าแบบทำงานร่วมกันให้ผลออกมากกว่า เมื่อนำมาหาประสิทธิภาพของพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งแครอท และมันฝรั้ง ได้ประมาณ 38 เปอร์เซ็นต์

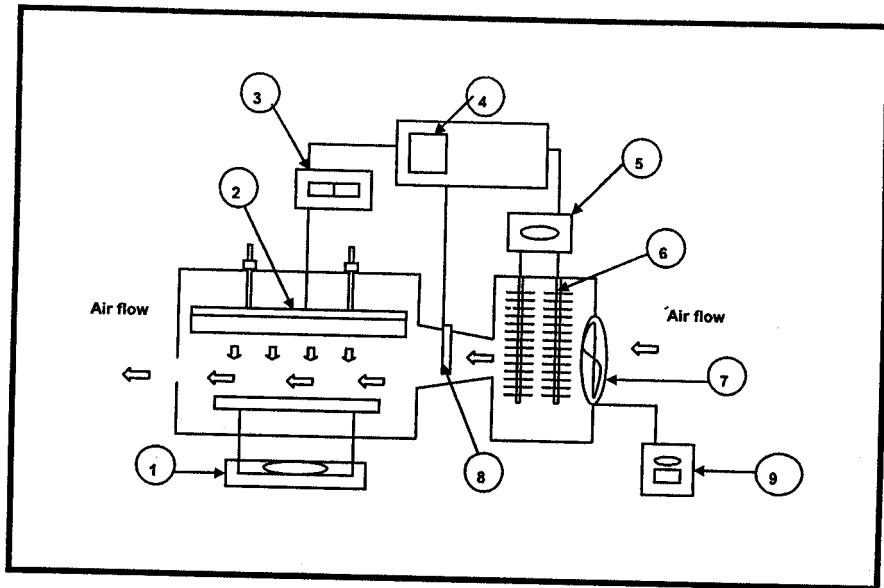
บทที่ 3

อุปกรณ์และการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองการอบแห้งด้วยลมร้อน รังสีอินฟราเรดไกล และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ ความเร็วลม กำลังไฟฟ้า ความหนาของผลิตภัณฑ์ และระยะระหว่างแท่งอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ โดยทดลองที่ลักษณะตัวแปรนั้นๆ ซึ่งขึ้นตอนและวิธีการมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ขั้นตอนการสร้างและออกแบบเครื่องอบแห้ง

ในภาพที่ 3.1 แบบจำลองเครื่องอบเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล โดยออกแบบให้ใช้แท่งรังสีอินฟราเรด 1 แท่งขนาด 650 W ระยะห่างระหว่างแท่งรังสีอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ปรับได้ระหว่าง 0.10 - 0.20 m ในแนวตั้งฉาก และขดลวดความร้อนขนาด 800 W โดยใช้อุณหภูมิควบคุมการเปิดปิด อุณหภูมิอากาศที่คำแนะนำต่างๆ วัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปลี่ยน K รุ่น DD - 75 ช่วงวัดอุณหภูมิ 0 – 399 °C ความละเอียด ± 0.5 เปอร์เซ็นต์ ของค่าที่อ่าน ความเร็วของอากาศอบแห้ง วัดโดยใช้ hot wire anemometer ปริมาณการใช้ไฟฟ้าอ่านค่าจาก กิโลวัตต์-เอาร์-มิเตอร์ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์อ่านค่าจากเครื่องชั่งแบบดิจิตอล รับน้ำหนักได้สูงสุด 3,000 กรัม และอ่านค่าได้ละเอียด 0.1 กรัม



ภาพที่ 3.1 แบบจำลองเครื่องอบแห้ง แบบลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ก ile โดยประกอบด้วย
 1) เครื่องซั่งน้ำหนัก 2) หลอดครั้งสีอินฟราเรด 3) ชุดปรับกำลังงานไฟฟ้า 4) ชุดควบคุม
 อุณหภูมิ 5) กิโลวัตต์-เอว์-มิตเตอร์ 6) ชุดควบความร้อน 7) พัดลม 8) ชุดวัดอุณหภูมิ
 9) ชุดปรับความเร็วลม

การคำนวณขนาดของแท่นรังสีอินฟราเรด มีข้อสมมติฐานคือ ห้องอบแห้ง เปรียบเสมือน enclosure และมีพื้นผิวในการถ่ายเทความร้อน โดยการแพร่รังสี 3 พื้นผิวคือ แท่นรังสีอินฟราเรด 1 พื้นผิว วัสดุที่อบแห้ง 1 พื้นผิว และพื้นผิวห้องอบแห้ง ซึ่งมีข้อมูลในการออกแบบดังนี้

พื้นผิวที่ 1 แท่นรังสีอินฟราเรด ขนาด $\varnothing 0.017 \text{ m}$ มีความยาวในช่วงแพร่รังสี (projection) 0.5 m อุณหภูมิแห่งรังสีอินฟราเรด 460°C และค่า $\varepsilon = 0.9$ (จากบริษัทผู้ผลิต)

พื้นผิวที่ 2 อุณหภูมิของวัสดุอบแห้งกำหนดเป็นช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง 30°C ค่าการแพร่รังสีความร้อน $\varepsilon = 0.9$ และพื้นที่รับรังสีอินฟราเรด $0.2 \times 0.5 \text{ m}$

พื้นผิวที่ 3 ห้องอบแห้งซึ่งสมมุติให้เป็น enclosure รับความร้อนจากอากาศ ร้อนและจากรังสีอินฟราเรด ซึ่งจะมีอุณหภูมิประมาณ 50°C เท่ากับอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ไหลเข้าห้องอบแห้ง

จากคุณสมบัติและข้อสมมติฐานดังกล่าว สามารถคำนวณขนาดแท่นอินฟราเรดได้ดังนี้

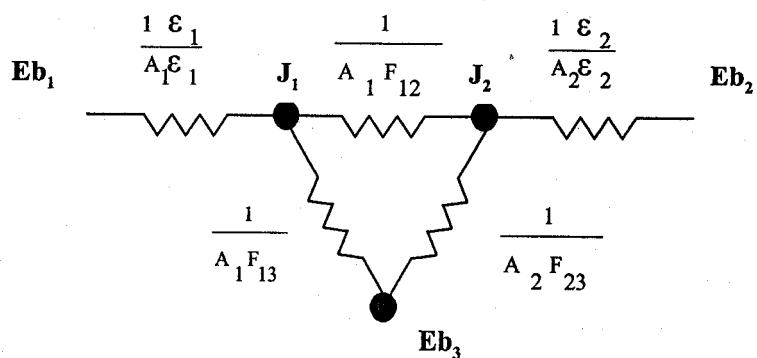
คำนวณหา View factor, (F_{ij}) พื้นที่ในการรับรังสีจากแหล่งรังสีอินฟราเรดของพื้นผิวมีขนาด ($a \times b$) = 0.3×0.5 m (คิดสำหรับแหล่งรังสีอินฟราเรด 1 แห่ง) ระยะห่างระหว่างแหล่งรังสีอินฟราเรดกับวัสดุอุบแห้ง $c = 0.10$ m ดังนี้

$$\frac{a}{c} = \frac{0.3}{0.1} \quad (3.1)$$

$$\frac{b}{c} = \frac{0.5}{0.1} = 5 \quad (3.2)$$

จากสมการ (3.1) และ (3.2) ได้ค่า View factor จากพื้นผิว 1 ไปพื้นผิว 2 คือ F_{12} ซึ่งมีค่าเท่ากับ View factor จากพื้นที่ผิว 1 ไปพื้นที่ผิว 2 ดังนี้

$$F_{12} = 0.6 \quad (3.3)$$



ภาพที่ 3.2 วงจรความต้านทานการไอล์ของความร้อน

ในการออกแบบเครื่องอบแห้งได้กำหนด enclosure ซึ่งประกอบด้วยพื้นผิวสามพื้นผิวในการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนโดยเย็บแน่นให้ด้วยวัสดุไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 3.2 และอัตราการถ่ายเทความร้อนสูทธิออกจากพื้นผิว มีค่าเท่ากับผลรวมของการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว และพื้นผิวอื่น ๆ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของพลังงานจากการแผ่รังสีความร้อนของพื้นผิว E_b (Emissive power) พลังงานจากรังสีทั้งหมดที่ออกจากพื้นผิว (surface radiosity)

ความสัมพันธ์ของค่า View factor จากพื้นผิว 1 ไปพื้นผิว 3 (F_{13}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ View factor จากพื้นที่ผิว 1 ไปพื้นที่ผิว 3 ดังนี้

$$\begin{aligned} F_{13} &= 1 - F_{12} \\ &= 1 - 0.6 \\ &= 0.4 \end{aligned} \quad (3.4)$$

ความสัมพันธ์ของค่า View factor จากพื้นผิว 2 ไปพื้นผิว 1 (F_{21}) มีค่า ดังนี้

$$F_{21} = \frac{A_1 F_{12}}{A_2} \quad (3.5)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} A_1 &= 3.14 \times 0.017 \times 0.5 = 0.027 \text{ m}^2 \\ A_2 &= 0.3 \times 0.5 = 0.15 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

แทนค่าลงในสมการ (3.5) ได้

$$F_{21} = 0.108$$

ความสัมพันธ์ของค่า View factor จากพื้นผิว 2 ไปพื้นผิว 3 ซึ่งมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} F_{23} &= 1 - F_{21} \\ &= 1 - 0.108 \\ &= 0.892 \end{aligned} \quad (3.6)$$

คำนวณพลังงานจากการแผ่รังสีของพื้นผิว

พื้นผิวที่ 1 แท่งรังสีอินฟราเรด ($T_1 = 733^{\circ}\text{K}$)

$$\begin{aligned} Eb_1 &= \sigma T_1^4 \\ &= 5.67 \times 10^{-8} \times 733 \\ &= 16,368.13 \text{ W/m}^2 \end{aligned} \quad (3.7)$$

พื้นผิวที่ 2 วัสดุที่อบแห้ง ($T_2 = 303^{\circ}\text{K}$)

$$\begin{aligned} Eb_2 &= \sigma T_2^4 \\ &= 5.67 \times 10^{-8} \times 303 \\ &= 477.92 \text{ W/m}^2 \end{aligned} \quad (3.8)$$

พื้นผิวที่ 3 ห้องอบแห้ง ($T_3 = 323^{\circ}\text{K}$)

$$\begin{aligned} Eb_3 &= \sigma T_3^4 \\ &= 5.67 \times 10^{-8} \times 323 \\ &= 617.15 \text{ W/m}^2 \end{aligned} \quad (3.9)$$

สร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิว เพื่อหาค่าพลังงานรังสีทั้งหมดที่ออกจากพื้นผิว (surface radiosity)

ที่ node J_1 ได้สมการ

$$\frac{Eb_1 - J_1}{(1 - \varepsilon_1)/\varepsilon_1 A_1} + \frac{J_2 - J_1}{1/A_1 F_{12}} + \frac{Eb_3 - J_1}{1/A_1 F_{13}} = 0 \quad (3.10)$$

ที่ node J_2 ได้สมการ

$$\frac{Eb_2 - J_2}{(1 - \varepsilon_2)/\varepsilon_2 A_2} + \frac{J_1 - J_2}{1/A_2 F_{12}} + \frac{Eb_3 - J_2}{1/A_2 F_{23}} = 0 \quad (3.11)$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการ (3.10)

$$\frac{16,368.13 - J_1}{4.12} + \frac{J_2 - J_1}{61.73} + \frac{617.15 - J_1}{92.59} = 0$$

$$-0.27J_1 + 0.016J_2 = -3,979.51 \quad (3.12)$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการ (3.11)

$$\frac{477.92 - J_1}{0.74} + \frac{J_1 - J_2}{61.73} + \frac{617.15 - J_2}{7.47} = 0$$

$$0.016J_1 + 1.5J_2 = -728.45 \quad (3.13)$$

จากสมการ (3.12), (3.13) สามารถแก้สมการได้ค่า J ที่ node ต่างๆ ได้ดังนี้

$$J_1 = 14,719 \text{ W/m}^2$$

$$J_2 = 329 \text{ W/m}^2$$

คำนวณขนาดแท่งรังสีอินฟราเรดและความร้อนที่ถ่ายเทอกจากแท่งรังสีอินฟราเรดที่ติดตั้งระหว่างวัสดุอบแห้ง, Q_1 ได้จากสมการ

$$Q_1 = \frac{E b_1 - J_1}{(1 - \epsilon_1) / \epsilon_1 A_1} \quad (3.14)$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการ (3.14) ได้

$$Q_1 = \frac{16,368.13 - 14,719}{3.472} = 475 \text{ W}$$

ความร้อนที่แผ่รังสีจากแท่งรังสีอินฟราเรดไปยังวัสดุอบแห้ง, Q_{12} ได้จากสมการ

$$Q_{12} = \frac{J_1 - J_2}{1/A_1 F_{12}} \quad (3.15)$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (3.15) ได้

$$Q_{12} = \frac{14,719 - 329}{41.67} = 345 \text{ W}$$

ความร้อนของรังสีที่แผ่จากแท่งรังสีอินฟราเรดไปยังผนังห้องอบแห้ง, Q_{13} ได้จากสมการ

$$Q_{13} = \frac{J_1 - Eb_3}{1/A_1 F_{13}} \quad (3.16)$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (3.16) ได้

$$Q_{13} = \frac{14,719 - 617.15}{125} = 113 \text{ W}$$

จากขนาดของแท่งรังสีอินฟราเรดตรงกลาง (Q_1) ที่คำนวณได้เท่ากับ 475 W เลือกแท่งรังสีอินฟราเรดที่มีขายในเชิงพาณิชย์ ขนาด 650 W เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.017 m ระยะ projection 0.5 m

3.2 เครื่องมือวัดในการทดลอง

3.2.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก Sartorius capacity 2100 กรัม ความละเอียด 0.01 กรัม และ เครื่องชั่งน้ำหนัก Modus model 323 capacity 5000 กรัม ความละเอียด 0.1 กรัม

3.2.2 เครื่องมือวัดอัตราการไหลอากาศ Air Flow anemometer LCA 6000 และ Air Flow AV- 2

3.3.3 เครื่องมือวัดขนาด Vernier Calliper

3.3.4 เครื่องมือวัดอุณหภูมิในเนื้อ Yogogawa model dx 112 - 1 - 2 N 200

3.3.5 มิเตอร์วัดการใช้ไฟฟ้า OHO 15 AMP kW / H single phase

3.3.6 เครื่องวัด Volt- Amp Yogogama 2343 04 digital clamp

3.3.7 เครื่องวัดสี Minalta model Chroma meter CR 300

3.3.8 สารเคมีที่ใช้ทดลองทำการทดสอบตัวของผลิตภัณฑ์ N – Heptane

3.3 การทดลองและการเก็บข้อมูล

3.3.1 กรณีอบแห้งด้วยลมร้อน

3.3.1.1 การอบแห้งพริก

ทำการคัดเลือกพริกให้มีขนาดใกล้เคียงกัน นำมาถังทำความสะอาดแล้วนำวางบนตะแกรงเพื่อให้สะเด็ดน้ำ เตรียมความพร้อมของเครื่องอบแห้ง โดยทำความสะอาดภายในห้องอบแห้งให้เรียบร้อย เสร็จแล้วเดินเครื่องอบแห้งแบบใช้ขดลวดความร้อน เตรียมความพร้อมของเครื่องอบแห้ง โดยตั้งอุณหภูมิอากาศที่ใช้อบแห้งที่ 50°C ความเร็วลม 0.5 m/s นำพริกหนัก 100 กรัมมาใส่บนถาด ต่อสายเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิที่ผิวพริก วัดค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดให้ความร้อน บันทึกน้ำหนักของพริกทุก 10 นาที ทำการอบแห้งจนได้ความชื้นสูตร้ายที่ต้องการ เสร็จแล้วทำการหยุดเครื่องอบแห้ง บันทึกมวลของพริกหลังการอบแห้ง และค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง โดยอ่านจาก กิโลวัตต์-เอาร์มิเตอร์ ทำการทดลองในกรณีตัดไปโดยตั้งอุณหภูมิอากาศที่ใช้อบแห้งที่ 55 และ 60°C ที่ความเร็วลม 0.5 m/s ทำการทดลองในลักษณะเดิม แต่เปลี่ยนความเร็วลม โดยใช้ความเร็วลม $0.5, 1.0$ และ 1.5 m/s

3.3.1.2 การอบเนื้อวัว

ทำการเตรียมเนื้อวัวที่จะอบแห้ง โดยนำเนื้อวัวที่อุณหภูมิ 5°C หันให้มีขนาด $30 \times 10 \times 100 \text{ mm}$ (กว้าง x ยาว x สูง) นำมาถังทำความสะอาดแล้ววางบนตะแกรง เพื่อให้สะเด็ดน้ำ แล้วเตรียมความพร้อมของเครื่องอบแห้ง โดยทำความสะอาดภายในห้องอบแห้ง

ให้เรียบร้อยแล้วเดินเครื่องอบแห้งแบบใช้ค่าความร้อน เตรียมความพร้อมของเครื่องอบแห้ง โดยตั้งอุณหภูมิอากาศที่ใช้อบแห้งที่ 50°C ความเร็วลม 0.5 m/s นำเนื้อรัก 100 กรัมมาใส่บนถาด ต่อสายเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิที่ผิวนอกวัว วัดค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชุด漉ดให้ความร้อนบันทึกน้ำหนักของพริกทุก 10 นาที ทำการอบแห้งจนได้ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ เสร็จแล้วทำการหยุดเครื่องอบแห้ง บันทึกมวลของเนื้อรักหลังการอบแห้ง และค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง โดยอ่านจากกิโลวัตต์-เอาร์มิเตอร์ ทำการทดสอบในถาดต่อไปโดยตั้งอุณหภูมิอากาศที่ใช้อบแห้งที่ 55 และ 60°C ที่ความเร็วลม 0.5 m/s ทำการทดสอบ แต่เปลี่ยนความเร็วลม โดยใช้ความเร็วลม $0.5, 1.0$ และ 1.5 m/s

3.3.2 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล

3.3.2.1 การอบแห้งพริก

ทำการเลือกพริกที่มีขนาดใกล้เคียงกัน นำมาล้างทำความสะอาดแล้วนำวางบนตะแกรงเพื่อให้สะเด็ดน้ำ เตรียมความพร้อมของเครื่องอบแห้ง โดยทำความสะอาดภายในห้องอบแห้งให้เรียบร้อยแล้วเดินเครื่องอบแห้งแบบใช้อินฟราเรดไกล เตรียมความพร้อมของเครื่องอบแห้ง โดยป้อน power เท่ากับ 260 W ให้ความเร็วลมเป็น 0.5 m/s ควบคุมอุณหภูมิลมร้อนก่อนเข้าห้องอบโดยการเปิดปิดชุด漉ดความร้อนที่ 40°C นำพริกหนัก 100 กรัมมาใส่บนถาด ต่อสายเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิที่ผิวพริก วัดค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชุด漉ดให้ความร้อนบันทึกน้ำหนักของพริกทุก 5 นาที ทำการอบแห้งจนได้ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ เสร็จแล้วทำการหยุดเครื่องอบแห้ง บันทึกมวลของพริกหลังการอบแห้ง และค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง โดยอ่าน กิโลวัตต์-เอาร์มิเตอร์ ทำการทดสอบช้า โดยตั้ง power ที่ป้อนให้เป็น $370, 470$ และ 640 W ทำการทดสอบช้าแต่เปลี่ยนความเร็วลม โดยใช้ความเร็วลม $0.1, 0.3, 0.7$ และ 0.9 m/s

3.3.2.2 การอบเนื้อรัก

ทำการเตรียมเนื้อรักที่จะอบแห้งโดยนำเนื้อรักที่อุณหภูมิ 5°C หันให้มีขนาด $3 \times 1 \times 5 \text{ cm}$ (กว้าง x ยาว x สูง) นำมาล้างทำความสะอาดแล้ววางบนตะแกรงเพื่อให้สะเด็ดน้ำ เตรียมความพร้อมของเครื่องอบแห้ง โดยทำความสะอาดภายในห้องอบแห้งให้เรียบร้อยแล้วเดินเครื่องอบแห้งแบบใช้อินฟราเรดไกล เตรียมความพร้อมของเครื่องอบแห้งโดยป้อน power เท่ากับ 260 W ให้ความเร็วลมเป็น 0.5 m/s ควบคุมอุณหภูมิลมร้อนก่อนเข้าห้องอบโดยการเปิดปิดชุด漉ดความร้อนที่ 40°C นำเนื้อรักหนัก 100 กรัมมาใส่บนถาด วัดค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชุด漉ดให้ความร้อนบันทึกน้ำหนักของเนื้อรักทุก 5 นาที ทำการอบแห้งจนได้ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ เสร็จแล้วทำการหยุดเครื่องอบแห้ง บันทึกมวลของเนื้อรักหลังการอบแห้ง และค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง โดยอ่าน กิโลวัตต์-เอาร์มิเตอร์ ทำการทดสอบช้า โดยตั้ง power ที่ป้อนให้เป็น

370, 470 และ 640 W ทำการทดลองขึ้นแต่เปลี่ยนความเร็วลม โดยใช้ความเร็วลม 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 m/s

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.4.1 การวิเคราะห์สมการคณิตศาสตร์

วิธีการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสมการการอบแห้งขั้นบางใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทดสอบแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression) นอกจากนี้ยังใช้ค่า (root mean square error, RMSE) เป็นตัวบ่งชี้ที่แสดงความสามารถในการทำนายของสมการ ซึ่งนิยามของ RMSE มีดังนี้

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{Prediction},i} - MR_{\text{Experiment},i})^2}{N}} \quad (3.17)$$

เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

3.4.2 การวิเคราะห์สมรรถนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อน และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ซึ่งได้กำหนดพารามิเตอร์เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษาเปรียบเทียบโดย อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.18)

$$\text{อัตราการอบแห้ง (DR)} = \frac{m_w}{DT} \quad (3.18)$$

เมื่อ m_w คือ มวลของน้ำที่ระเหย, DT คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนคำนวณได้จากสมการที่ (3.19)

$$\text{SEC}_{\text{HA}} = \frac{E_{\text{fan}} + E_{\text{heater}}}{m_w} \quad (3.19)$$

ความถี่นี้เปลี่ยนไปด้วยพัฒนาการณ์อุบแห่งลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด คำนวณได้จากสมการที่ (3.20)

$$\text{SEC}_{\text{HA+IR}} = \frac{E_{\text{fan}} + E_{\text{heater}} + E_{\text{ir}}}{m_w} \quad (3.20)$$

เมื่อ E_{fan} คือ พลังงานที่ให้กับพัดลม, E_{heater} คือ พลังงานที่ให้กับบด ลดความร้อน, E_{ir} คือ พลังงานที่ให้กับแห่งอินฟราเรด

3.4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

3.4.3.1 การหาค่าการหดตัว

ในการหาค่าการหดตัวของการอบแห้งผลิตภัณฑ์ โดยใช้ n -heptane ซึ่งคุณสมบัติจะไม่ดูดซึมไปในผลิตภัณฑ์ อาศัยหลักการแทนที่ในของเหลวหาปริมาตรของผลิตภัณฑ์แล้วนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การหดตัว โดยขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

- 1) นำ n -heptane มาทดสอบหาปริมาตร โดยเทลงในหลอดทดลองทำการบันทึกค่าปริมาตรเริ่มต้น
- 2) เอาเนื้อที่จะนำไปอบแห้งใส่ลงในหลอดทดลองแล้วบันทึกปริมาตรไว้
- 3) นำเนื้อที่อบแห้งแล้วใส่ลงในหลอดทดลองแล้วบันทึกปริมาตรไว้
- 4) หาเปอร์เซ็นต์การหดตัว

$$\text{เปอร์เซ็นต์การหดตัว} = \frac{V_i - V_e}{V_i} \times 100 \quad (3.21)$$

เมื่อ V_e คือ ปริมาตรผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง, V_i คือ ปริมาตรผลิตภัณฑ์ก่อนอบแห้ง

3.4.3.2 การหาสมบัติค้านสีของเนื้อ

การหาสมบัติค้านสีของผลิตภัณฑ์ใช้เครื่องวัดคุณภาพสี ซึ่งจะวัดออกมามีเป็นค่า L, a และ b โดยค่า L เป็นค่าความสว่าง (lightness parameter) a เป็นค่าสีแดง (redness parameter) b เป็นค่าสีเหลือง (yellowness parameter) หากการเปลี่ยนแปลงสีก่อนและหลังการอบแห้งโดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- 1) ทำการเตรียมเครื่องวัดสีโดยการ Calibrate กับแผ่นมาตรฐานของเครื่อง
- 2) นำผลิตภัณฑ์ที่เตรียมก่อนจะนำเข้าอบมาวัดสี โดยให้แสดงผลของข้อมูลเป็นค่า L, a และ b
- 3) นำผลิตภัณฑ์หลังอบมาวัดสี โดยให้แสดงผลของข้อมูลเป็นค่า L, a และ b
- 4) ทำการวัดสี และบันทึกค่าตัวอย่างละ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย
- 5) เมื่อได้ข้อมูลครบ นำมาวิเคราะห์หาค่าการเปลี่ยนแปลงของสีของผลิตภัณฑ์

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (3.22)$$

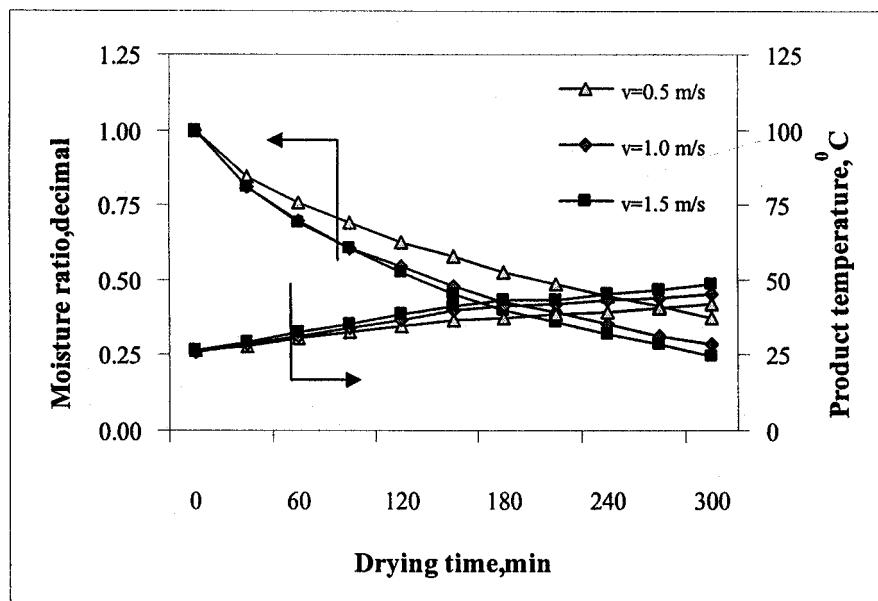
เมื่อ ΔE คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีของผลิตภัณฑ์, ΔL คือ ค่าผลต่างความสว่างของผลิตภัณฑ์, Δa คือ ค่าผลต่างสีแดงของผลิตภัณฑ์, Δb คือ ค่าผลต่างสีเหลืองของผลิตภัณฑ์

บทที่ 4 ผลและวิจารณ์

ผลจากการศึกษาสำหรับตามหัวข้อ การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไก่ และการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไก่ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การอบแห้งเนื้อด้วยลมร้อน

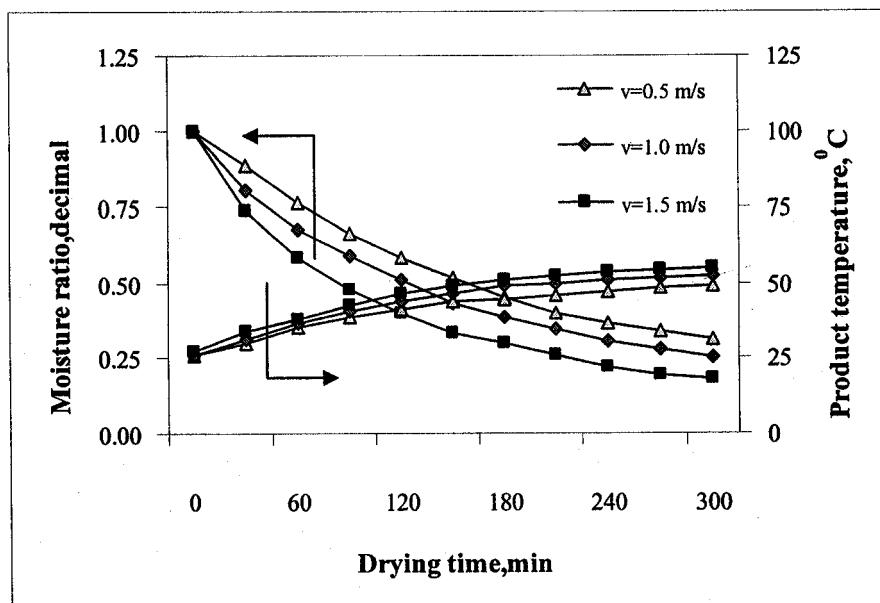
4.1.1 ผลของความเร็วลม



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 50°C และความหนาของเนื้อ 1.0 cm

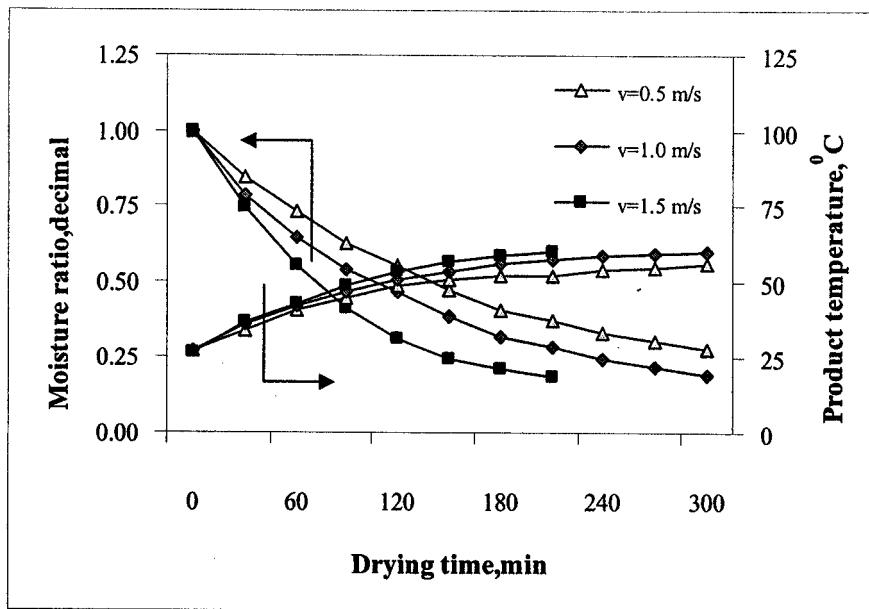
จากภาพที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ซึ่งเป็นการทดลองอบแห้งโดยควบคุมอุณหภูมิท้องอบแห้งเท่ากับ 50°C เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 พบร่วงการอบแห้งด้วยความเร็วลมเท่ากับ 1.5 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.5 และ 1.0 m/s เท่ากับ 56 และ 8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิ

ภายในของผลิตภัณฑ์ในการอบแห้งที่ความเร็วลมต่าง ๆ จากผลการทดลองจะพบว่าอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์สามารถแบ่งออกเป็นสองช่วง คือช่วงแรกอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดๆหนึ่งอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ จะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย จากราฟจะสังเกตเห็นว่า ที่ความเร็วลม 1.5 m/s จะมีความชันมากกว่าที่ความเร็วลมอื่น ๆ นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการลดลงของอัตราส่วนความชื้น ในกรณีที่ใช้ความเร็วลมสูงจะลดลงเร็วกว่ากรณีที่ใช้ความเร็วลมต่ำ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า กรณีที่ใช้ความเร็วลมสูง ปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับเนื้อจะมีปริมาณมากซึ่งจะสอดคล้องกับลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเนื้อส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำภายในเนื้อสูงตาม ดังนั้นจากเหตุผลที่กล่าวมาเนื้อจึงสามารถลดความชื้นได้เร็วขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วลม



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 55°C และความหนาของเนื้อ 1.0 cm

จากภาพที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาเป็นการทดลองอบแห้งโดยควบคุมอุณหภูมิห้องอบแห้งเท่ากับ 55°C เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 พบร้าการอบแห้งด้วยความเร็วลมเท่ากับ 1.5 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.5 และ 1.0 m/s เท่ากับ 82 และ 47 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาในการอบแห้ง จากการทดลองพบว่าแนวโน้มของกราฟคล้ายกับภาพที่ 4.1 โดยเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้น



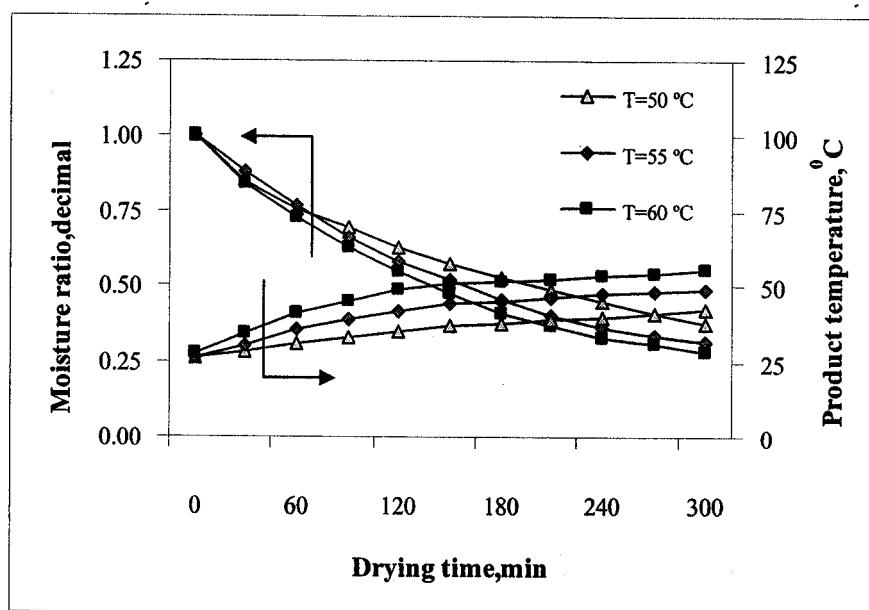
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 60°C และความหนาของเนื้อ 1.0 cm

จากภาพที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เป็นการทดลองอบแห้งโดยควบคุมอุณหภูมิห้องอบแห้งเท่ากับ 60°C เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 พบว่าการอบแห้งด้วยความเร็วลมเท่ากับ 1.5 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.5 และ 1.0 m/s เท่ากับ 93 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกายในผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาในการอบแห้งผลที่ได้พบว่าแนวโน้มของการลดลงกับภาพที่ 4.1 โดยเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นอุณหภูมิกายในผลิตภัณฑ์จะลดลง

4.1.2 ผลของอุณหภูมิอบแห้ง

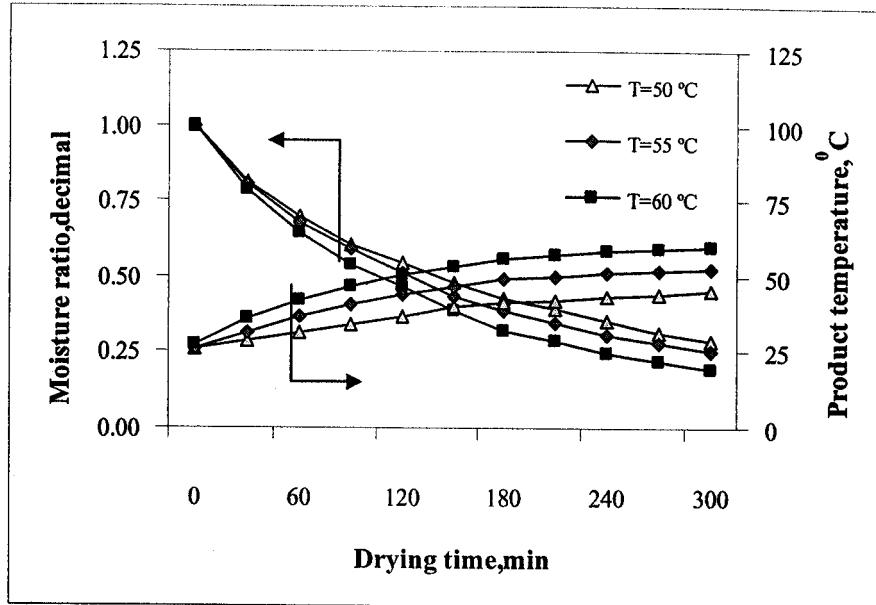
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความเร็วลมเท่ากับ 0.5 m/s จากกราฟจะเห็นว่าสัดส่วนความชื้นลดลงเร็วขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง และเมื่อพิจารณาที่สัดส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 60°C จะใช้เวลาสั้นกว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C และ 55°C เท่ากับ 44 และ 15 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกายในผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ พบว่าอุณหภูมิกายในผลิตภัณฑ์สามารถแบ่งออกเป็นสองช่วง โดยในช่วงแรกอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดหนึ่งอุณหภูมิผลิตภัณฑ์จะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย หากเปรียบเทียบที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ พบว่าที่อุณหภูมิ 60°C จะมีความชันมากกว่าที่อุณหภูมิอื่น ๆ นอกจากนั้นยังพบว่าอัตราการลดลงของอัตราส่วนความชื้นในกรณีที่ใช้อุณหภูมิสูงจะลดลงเร็วกว่ากรณีที่ใช้

อุณหภูมิค่า ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่ากรณีที่ใช้อุณหภูมิ ปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับเนื้อก็มีปริมาณมาก ซึ่งจะสอดคล้องกับลักษณะการเพิ่มน้ำหนักของอุณหภูมิเนื้อ ส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำภายในเนื้อสูงตาม ดังนั้นจากเหตุผลที่กล่าวมา เนื้อจึงสามารถลดความชื้นได้เร็วขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น ดังภาพที่ 4.4

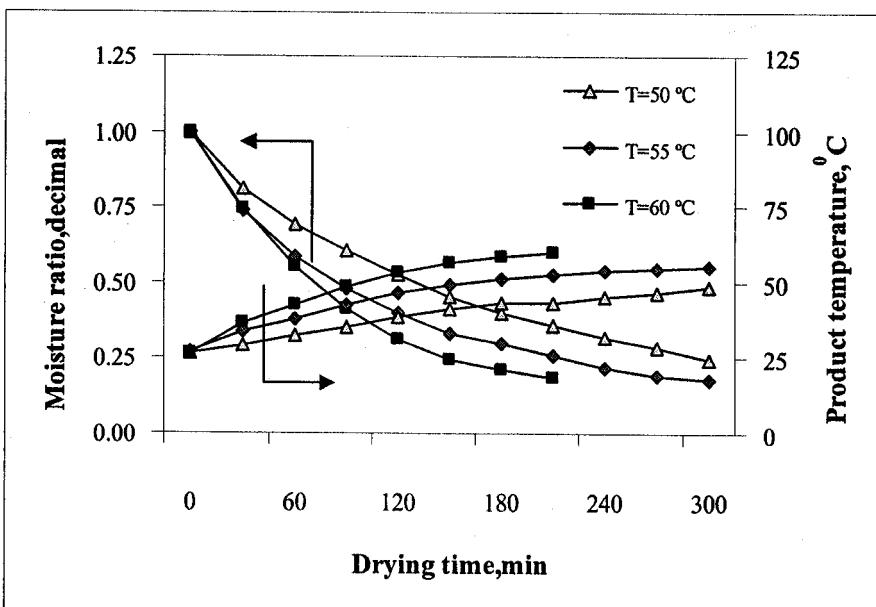


ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความเร็วลม 0.5 m/s และความหนาของเนื้อ 1.0 cm

จากภาพที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เป็นการทดลองบนแห้งโดยใช้ความเร็วลม 1.0 m/s จากกราฟจะเห็นว่าสัดส่วนความชื้นจะลดลงเร็วขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง และเมื่อพิจารณาที่สัดส่วนความชื้น เท่ากับ 0.5 พบร่วงการอบแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 60°C จะใช้เวลาสั้นกว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C และ 55°C เท่ากับ 29 และ 19 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายนอกกับอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์ กับระยะเวลาในการอบแห้ง จากการทดลองพบว่าแนวโน้มของกราฟคล้ายกับภาพที่ 4.4 เมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิภายนอกกับอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความเร็วลม 1.0 m/s และความหนาของเนื้อ 1.0 cm



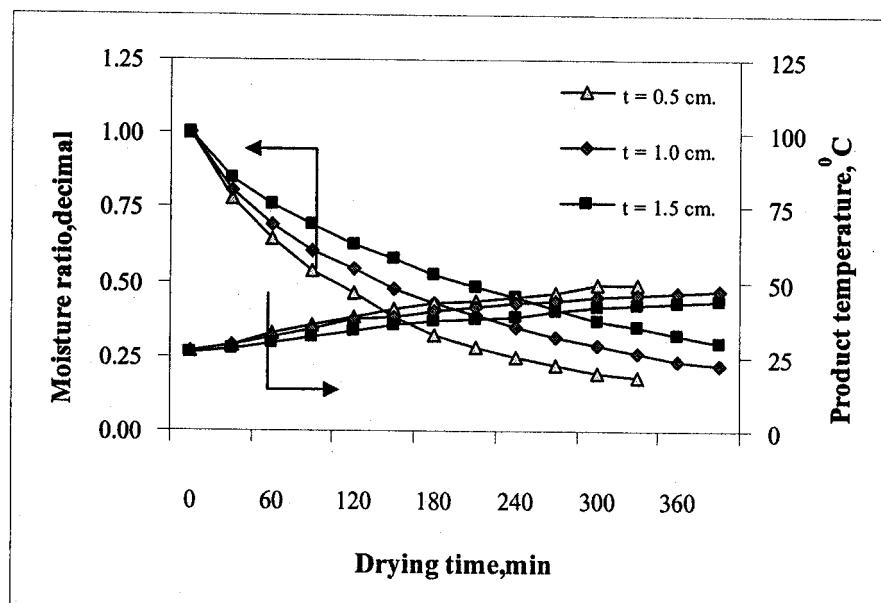
ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความเร็วลม 1.5 m/s และความหนาของเนื้อ 1.0 cm

จากภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เป็นการทดลอง บนแห้งที่ความเร็วลม 1.5 m/s จากกราฟจะเห็นว่าสัดส่วนความชื้นจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

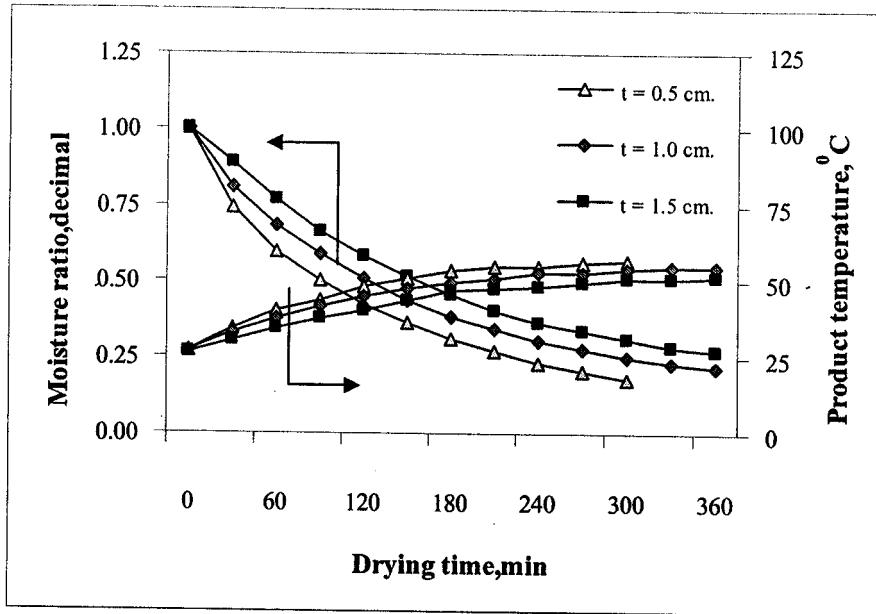
อบแห้ง และเมื่อพิจารณาที่สัดส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 60°C จะใช้เวลาสั้นกว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C และ 55°C เท่ากับ 86 และ 21 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

4.1.3 ผลของความหนา

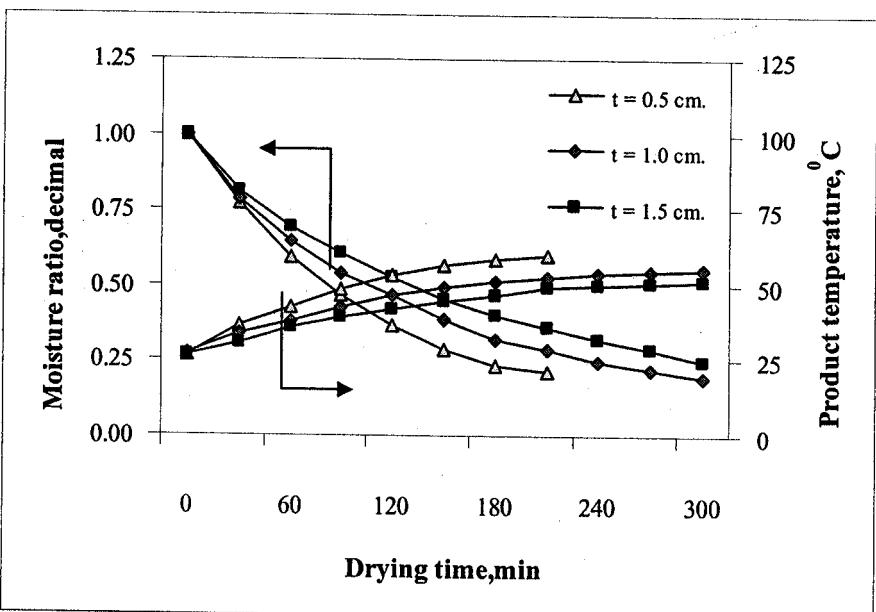
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิ อบแห้ง 50°C และความเร็วลม 1.0 m/s จากกราฟเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 จะพบว่าที่ความหนาของเนื้อ 0.5 cm จะใช้เวลาการอบแห้งสั้นกว่าที่ความหนาของเนื้อ 1.0 และ 1.5 cm เท่ากับ 33 และ 86 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ นอกจากนั้นจะเห็นได้ว่าอัตราการลดลงของอัตราส่วนความชื้นในกรณีที่ใช้ความหนาน้อยจะลดลงเร็วกว่า กรณีที่ใช้ความหนาของผลิตภัณฑ์มาก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า กรณีที่ใช้ความหนาน้อยปริมาณพลังงานความร้อนมีการແلاءเปลี่ยนกับเนื้อ ได้ง่ายซึ่งจะสอดคล้องกับลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเนื้อในภาพ ส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำภายในเนื้อสูงตาม ดังนั้น จากเหตุผลที่กล่าวมาเนื้อจึงสามารถลดความชื้นได้เร็วขึ้นเมื่อความหนาของผลิตภัณฑ์ลดลง ดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C และความเร็วลม 1.0 m/s



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้ง 55°C และ
ความเร็วลม 1.0 m/s



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60°C และ
ความเร็วลม 1.0 m/s

จากภาพที่ 4.8 แสดง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ อุณหภูมิอบแห้ง 55°C และความเร็วลม 1.0 m/s จากกราฟเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ

0.5 จะพบว่าที่ความหนาของเนื้อ 0.5 cm จะใช้เวลาการอบแห้งสั้นกว่าที่ความหนาของเนื้อ 1.0 และ 1.5 cm เท่ากับ 36 และ 78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิ อบแห้ง 60°C และความเร็วลม 1.0 m/s จากกราฟเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 จะพบว่าที่ความหนาของเนื้อ 0.5 cm จะใช้เวลาการอบแห้งสั้นกว่าที่ความหนาของเนื้อ 1.0 และ 1.5 cm เท่ากับ 50 และ 93 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกายในผลิตภัณฑ์ กับระยะเวลาผลการทดลองพบว่ามีแนวโน้มของกราฟคล้ายกับภาพที่ 4.7 โดยเมื่อความหนาของ ผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นอุณหภูมิกายในผลิตภัณฑ์จะลดลง

4.1.4 ผลของการหดตัวและการเปลี่ยนแปลงของสี

โดยตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ ที่ อบแห้งด้วยลมร้อน โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีและการหดตัว ที่อัตราส่วนความชื้นประมาณ 0.5 พบร่วม

4.1.4.1 เปรียบเทียบด้านอุณหภูมิ เปอร์เซ็นต์การหดตัวและการเปลี่ยนแปลงของ สีจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้ง

4.1.4.2 เปรียบเทียบด้านความเร็วลม เมื่อเพิ่มความเร็วลมจะทำให้เปอร์เซ็นต์การ หดตัวเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของสีจะลดลง

4.1.4.3 เปรียบเทียบด้านความหนา พบร่วมที่ความหนามาก จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ การหดตัวน้อยลง แต่จะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีมากกว่าที่ความหนาน้อย

ตารางที่ 4.1 ตารางคุณสมบัติทางกายภาพของเนื้อที่อบแห้งด้วยลมร้อน

อุณหภูมิ($^{\circ}$ C)/ความเร็วลม (m/s) /ความหนาเนื้อ (cm)	การเปลี่ยนแปลงสี (ΔE)	การลดตัว (เปอร์เซ็นต์)
50/0.5/0.5 50/0.5/1.0 50/0.5/1.5 50/1.0/0.5 50/1.0/1.0 50/1.0/1.5 50/1.5/0.5 50/1.5/1.0 50/1.5/1.5	11.0000b \pm 0.2484	28.0100a \pm 0.2370
	11.0000b \pm 0.4968	27.3000a \pm 0.4968
	12.3500c \pm 0.4478	27.3333a \pm 0.3795
	9.1333a \pm 0.3795	29.9333b \pm 0.2868
	10.4500b \pm 0.3286	29.3100b \pm 0.5345
	11.1333b \pm 0.2868	27.9667c \pm 0.2868
	8.4000a \pm 0.2484	31.2333c \pm 1.1740
	8.7667a \pm 0.3126	29.9333b \pm 0.2868
	10.4500b \pm 0.2151	29.2667b \pm 0.5171
55/0.5/0.5 55/0.5/1.0 55/0.5/1.5 55/1.0/0.5 55/1.0/1.0 55/1.0/1.5 55/1.5/0.5 55/1.5/1.0 55/1.5/1.5	12.3167c \pm 0.6841	29.2800b \pm 0.6889
	12.7000c \pm 0.6572	27.9333a \pm 0.2868
	14.0500d \pm 1.0612	27.4000a \pm 0.2484
	11.2000b \pm 0.4968	29.9333b \pm 0.2868
	12.4500c \pm 0.1242	29.3333b \pm 0.5171
	12.6333c \pm 0.5171	28.0167a \pm 0.2633
	9.1000a \pm 0.2484	31.9667c \pm 0.1434
	10.4167b \pm 0.3126	30.0667b \pm 0.1434
	11.1667b \pm 0.3795	29.3400b \pm 0.5560
60/0.5/0.5 60/0.5/1.0 60/0.5/1.5 60/1.0/0.5 60/1.0/1.0 60/1.0/1.5 60/1.5/0.5 60/1.5/1.0 60/1.5/1.5	14.9167d \pm 0.5870	32.0667c \pm 0.2868
	16.2500e \pm 0.4478	29.7567b \pm 0.1275
	16.5333e \pm 0.3795	29.9667b \pm 0.1434
	12.7500c \pm 0.5414	33.0667d \pm 0.7589
	14.3333d \pm 0.5171	31.9000c \pm 0.4303
	14.7167d \pm 0.6841	30.0433b \pm 0.5667
	11.1667b \pm 0.3795	33.5333d \pm 0.3795
	12.4167c \pm 0.5601	32.0633c \pm 0.2513
	12.7333c \pm 0.2586	29.9567b \pm 0.1654

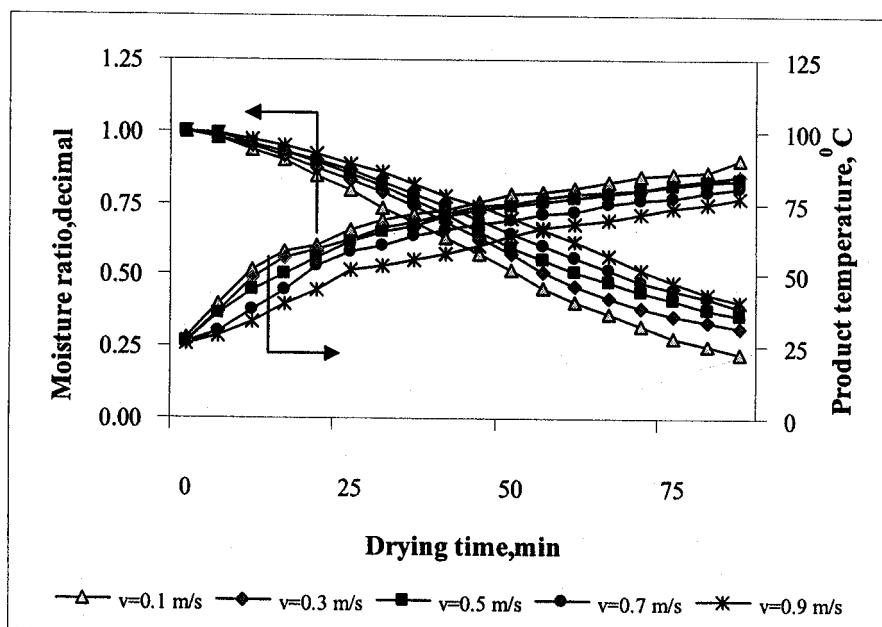
หมายเหตุ อักษรระบุนักกินภายในกลุ่มนี้เดียวกันหมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่

p<0.05

4.2 การอบแห้งเนื้อคั่วylemonร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

4.2.1 ผลของความเร็วลม

จากภาพที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งเนื้อคั่วylemonต่าง ๆ โดยป้อนกำลังไฟฟ้าให้กับแห้งอินฟราเรดเท่ากับ 260 W จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลา และที่ความเร็วลม 0.1 m/s จะมีอัตราส่วนความชื้นลดลงเร็วที่สุด เมื่อเทียบกับความเร็วลมต่าง ๆ

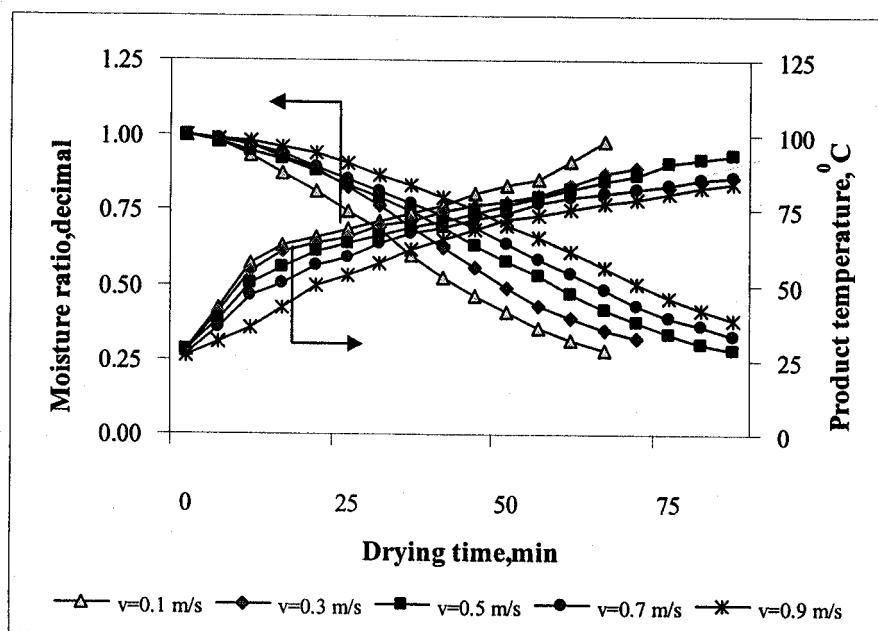


ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 260 W ระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 10 cm

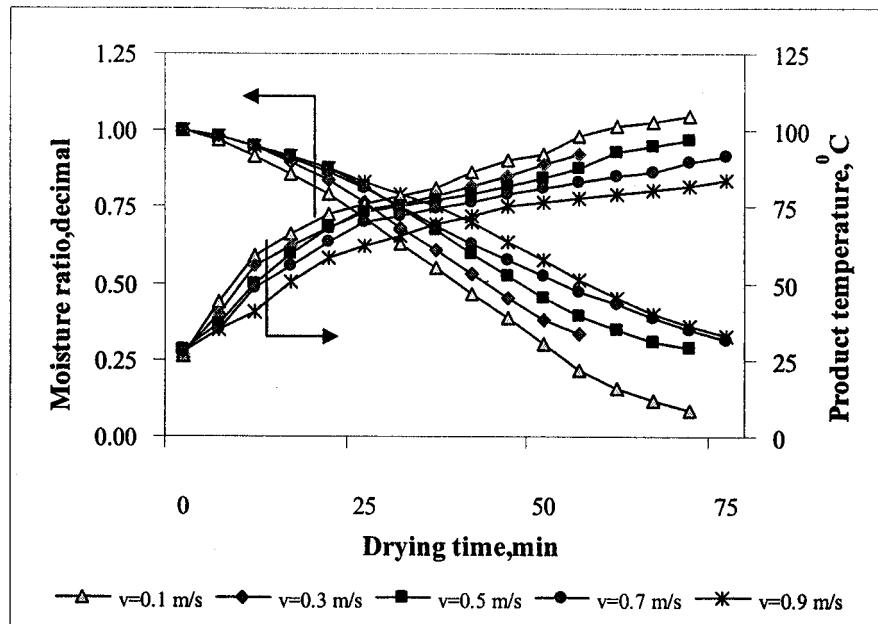
เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 พบร่วมกับการอบแห้งด้วยความเร็วลม 0.1 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม $0.3, 0.5, 0.7$ และ 0.9 m/s เท่ากับ $10, 20, 30$ และ 40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จึงสรุปผลการทดลองได้ว่าที่อัตราการไหลดของอากาศต่าจะมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าที่อัตราการไหลดของอากาศสูง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าอัตราการไหลดของอากาศที่สูงส่งผลทำให้อุณหภูมิที่ผิวและภายในผลิตภัณฑ์ลดลงจึงส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลง ดังจะเห็นได้จากลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกายในผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาในการอบแห้งที่ความเร็วลมต่าง ๆ พบร่วมกับอุณหภูมิกายใน

ผลิตภัณฑ์สามารถแบ่งออกเป็นสองช่วง โดยในช่วงแรกอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดที่อุณหภูมิผลิตภัณฑ์จะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย หากเปรียบเทียบที่ความเร็วลมต่าง ๆ ที่ความเร็วลม 0.1 m/s จะมีความชันมากกว่าที่ความเร็วลมอื่น ๆ และอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์ก็จะสูงกว่าที่ความเร็วลมอื่นด้วย นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบทุกความเร็วลม ความเร็วลมที่มากขึ้นจะได้กราฟที่มีความชันลดลงเรื่อยๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าความเร็วลมทำให้อุณหภูมิกายในเนื้อวัสดุลดลง เนื่องจากอากาศจะนำพาเอาความร้อนจากบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ ออกไปเร็วขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิกายในผลิตภัณฑ์ลดลง

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เป็นการทดลองอบแห้งโดยป้อน Power เท่ากับ 370 W ให้กับแท่นรังสีอินฟราเรด เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้น เท่ากับ 0.5 พนว่างการอบแห้งด้วยความเร็วลม 0.1 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม $0.3, 0.5, 0.7$ และ 0.9 m/s เท่ากับ $25, 50, 63$ และ 75 เปรอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.11



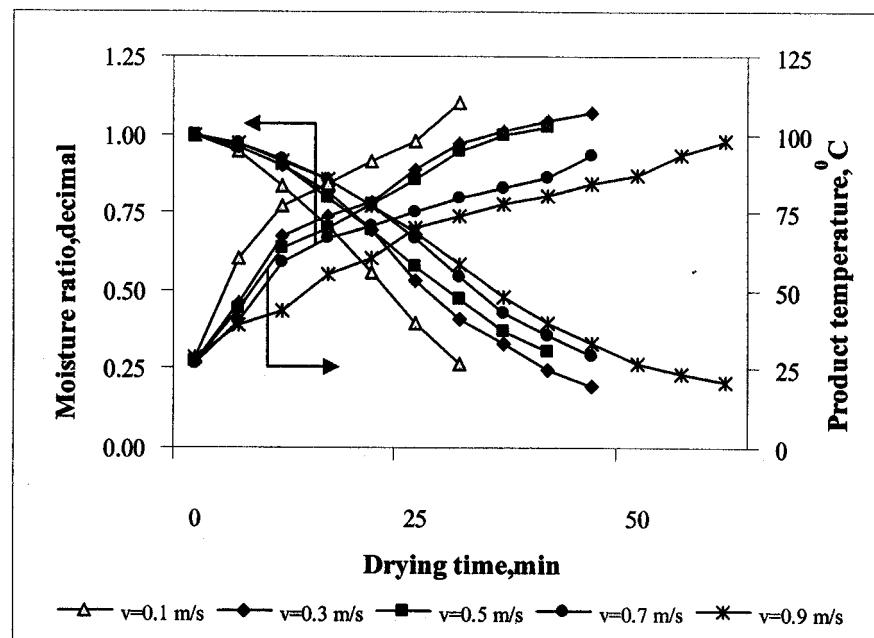
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 370 W ระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 10 cm



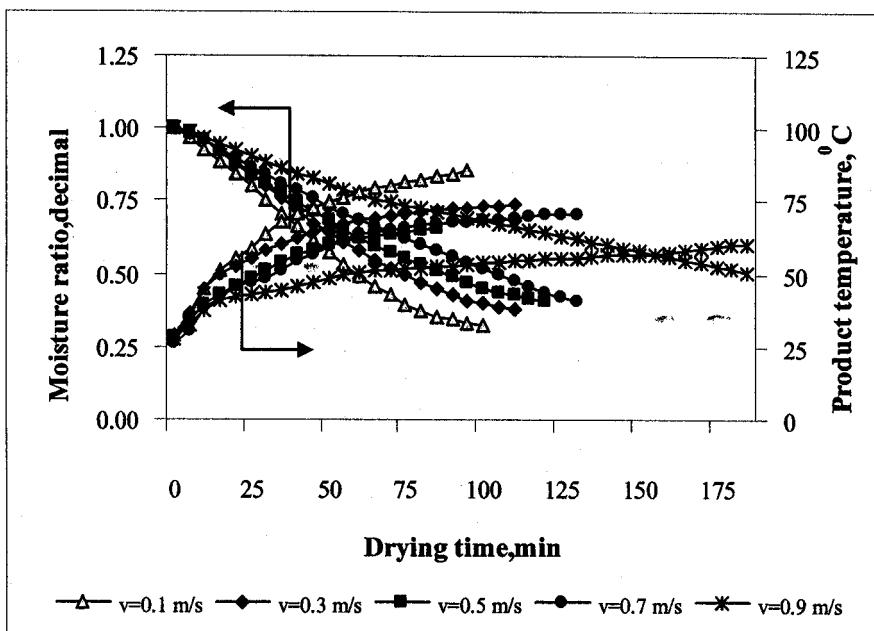
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 470 W
ระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 10 cm

จากภาพที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เป็นการทดลองอบแห้งโดยป้อน Power เท่ากับ 470 W ให้กับแท่งรังสีอินฟราเรด เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 พบว่าการอบแห้งด้วยความเร็วลม 0.1 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 m/s เท่ากับ 14, 29, 43 และ 57 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เป็นการทดลองอบแห้งโดยป้อน Power เท่ากับ 640 W ให้กับแท่งรังสีอินฟราเรด เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 พบว่าการอบแห้งด้วยความเร็วลม 0.1 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 m/s เท่ากับ 25, 50, 55 และ 75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับในส่วนความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาในการอบแห้งจากการทดลอง พบว่าแนวโน้มของกราฟคล้ายกับภาพที่ 4.10 คือ เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์จะลดลง ดังภาพที่ 4.13

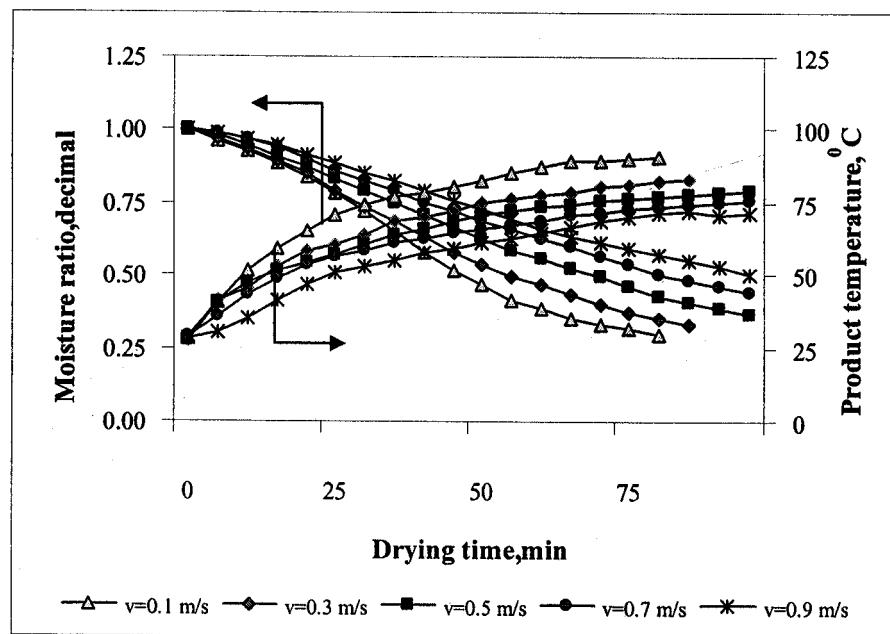


ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 640 W
ระยะห่างระหว่างหลอดคันฟราเรคกับผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 10 cm



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 260 W
ระยะห่างระหว่างหลอดคันฟราเรคกับผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 15 cm

จากภาพที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งเนื้อวัวที่ความเร็วลมต่าง ๆ การทดสอบอบแห้งนี้ใช้ Power เท่ากับ 260 W และระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์เท่ากับ 15 cm จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลา และที่ความเร็วลม 0.1 m/s จะมีอัตราส่วนความชื้นลดลงเร็วที่สุด เมื่อเทียบกับความเร็วลมต่าง ๆ เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบให้ความเร็วลมที่ 0.1 m/s เป็นค่าอ้างอิงเปรียบเทียบกับความเร็วลม 0.3 m/s พบร่วมเวลาในการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น 15 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบกับที่ความเร็วลม 0.5, 0.7 และ 0.9 m/s พบร่วมเวลาจะต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้น 38, 69 และ 146 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จึงสรุปผลการทดลองได้ว่า ที่อัตราการไหลดของอากาศต่ำจะมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าที่อัตราการไหลดของอากาศสูง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า อัตราการไหลดของอากาศที่สูง ส่งผลทำให้อุณหภูมิที่ผิวและภายในผลิตภัณฑ์ลดลง จึงส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลงด้วย ดังจะเห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์

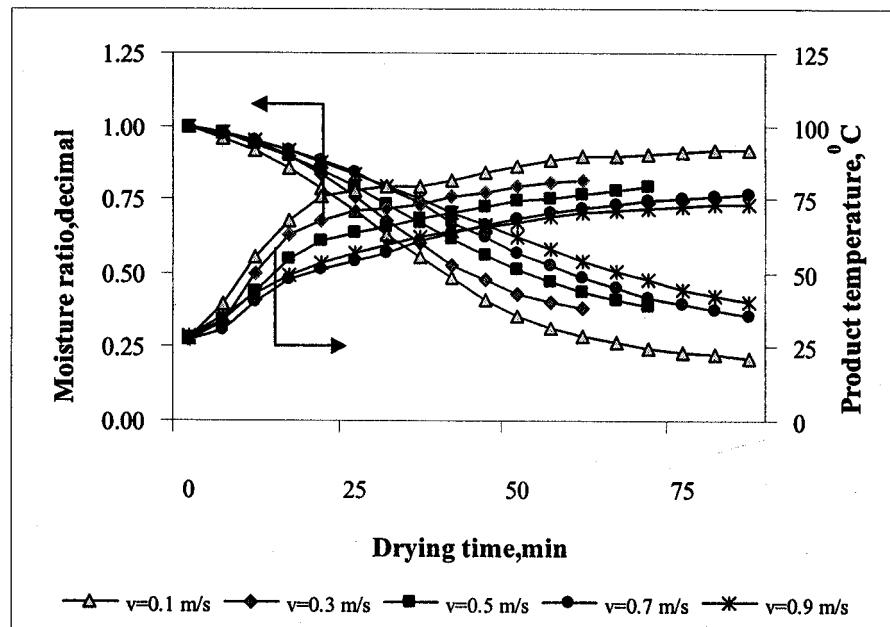


ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 370 W ระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์เท่ากับ 15 cm

จากภาพที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขั้ตตราส่วนความชื้นกับเวลา เป็นการทดลองอบแห้งโดยป้อน Power เท่ากับ 370 W ให้กับแท่นรังสีอินฟราเรด หากพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 จะพบว่าที่ความเร็วลม 0.1 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 m/s เท่ากับ 30, 50, 70 และ 110 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยความสัมพันธ์

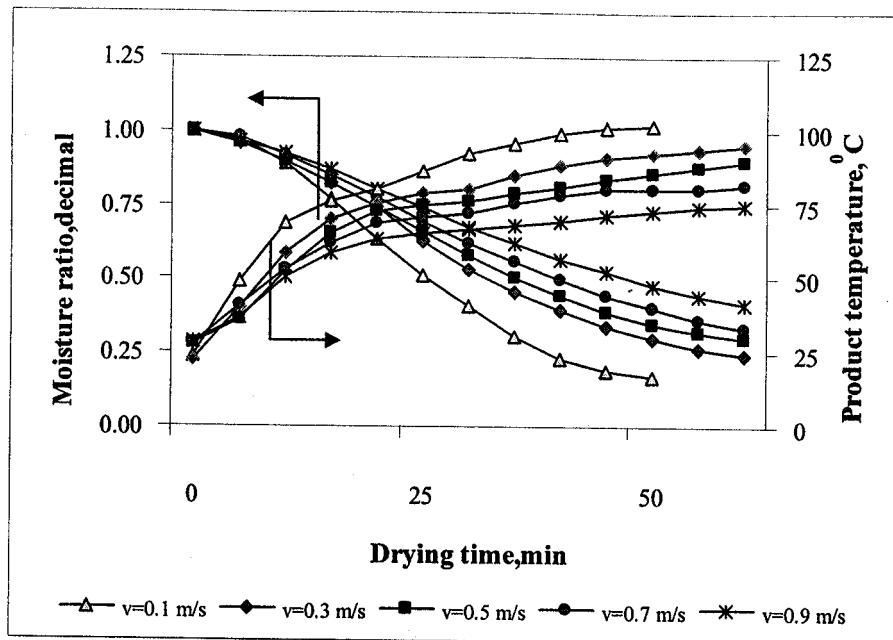
ระหว่างอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์กับระยะเวลา พนวณแนวโน้มของ Graf คล้ายกับภาพที่ 4.14

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เป็นการทดลองอบแห้งโดยป้อน Power เท่ากับ 470 W ให้กับแท่นรังสีอินฟราเรด หากพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 จะพบว่าที่ความเร็วลม 0.1 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 m/s เท่ากับ 14, 43, 71 และ 100 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.16 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาพบว่ามีแนวโน้มของ Graf คล้ายกับภาพที่ 4.14



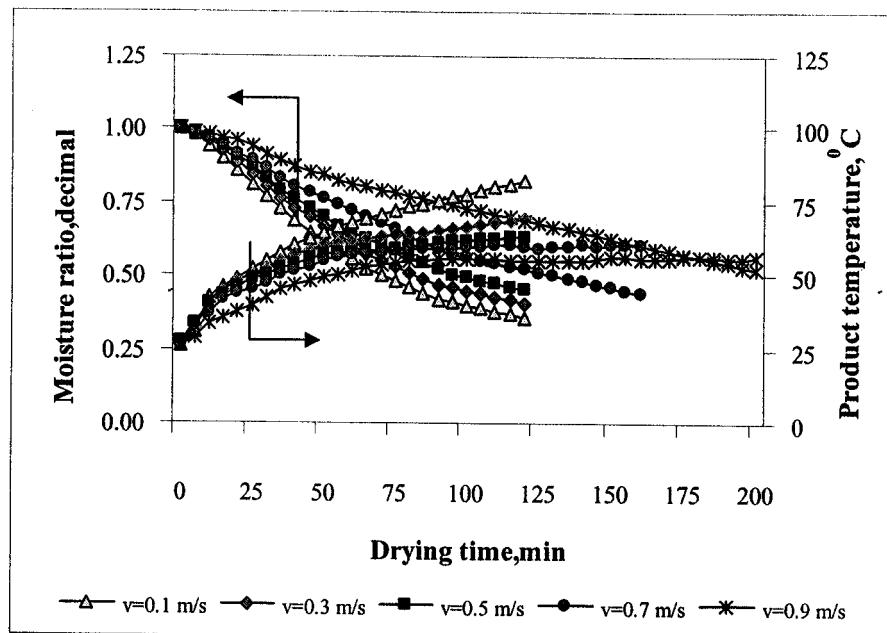
ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 470 W
ระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 15 cm

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาเป็นการทดลองอบแห้งโดยป้อน Power เท่ากับ 640 W ให้กับแท่นรังสีอินฟราเรด หากพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 จะพบว่าที่ความเร็วลม 0.1 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 m/s เท่ากับ 40, 52, 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 640 W
ระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์เท่ากับ 15 cm

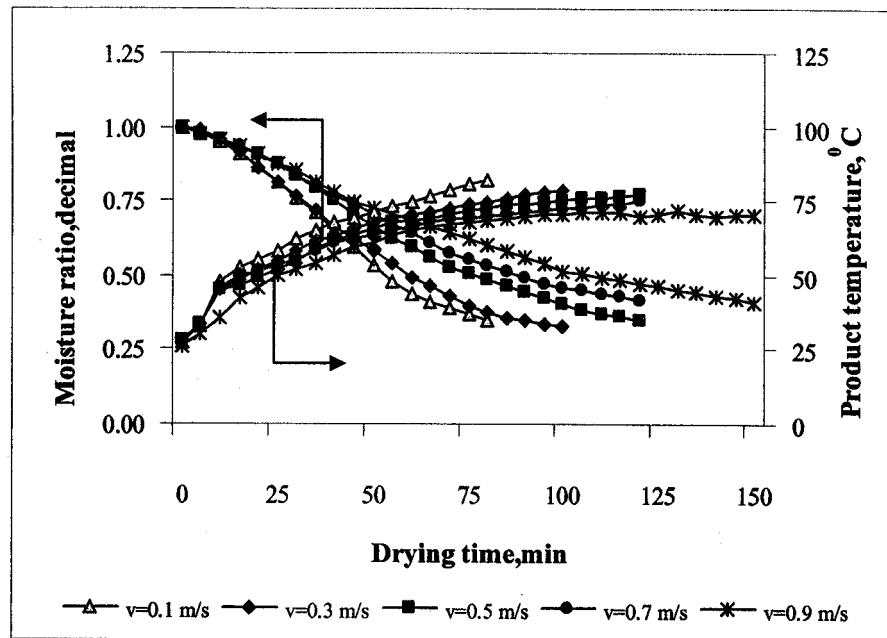
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ในการอบแห้งเนื้อวัวที่ความเร็วต่างๆ การทดลองอบแห้งนี้ใช้ Power เท่ากับ 260 W กับแท่งรังสีอินฟราเรด จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลา และที่ความเร็วลม 0.1 m/s จะมีอัตราส่วนความชื้นลดลงเร็วที่สุด เมื่อเทียบกับความเร็วลมต่างๆ เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ ให้ความเร็วลมที่ 0.1 m/s เป็นค่าอ้างอิงและเทียบกับความเร็วลม 0.3 m/s พบร่วมเวลาในการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น 14 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบกับที่ความเร็วลม 0.5, 0.7 และ 0.9 m/s พบร่วมจะต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นเป็น 36, 71 และ 200 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จึงสรุปผลการทดลองได้ว่าที่อัตราการไหลดของอากาศต่างจะมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าที่อัตราการไหลดของอากาศสูง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า อัตราการไหลดของอากาศที่สูงส่งผลทำให้อุณหภูมิที่ผิวและภายในผลิตภัณฑ์ลดลง จึงส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลงด้วย ดังจะเห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จากการจะเห็นว่าที่ความเร็วลม 0.1 m/s จะมีอุณหภูมิกายในผลิตภัณฑ์สูงกว่าที่ความเร็วลมอื่นๆ ดังภาพที่ 4.18



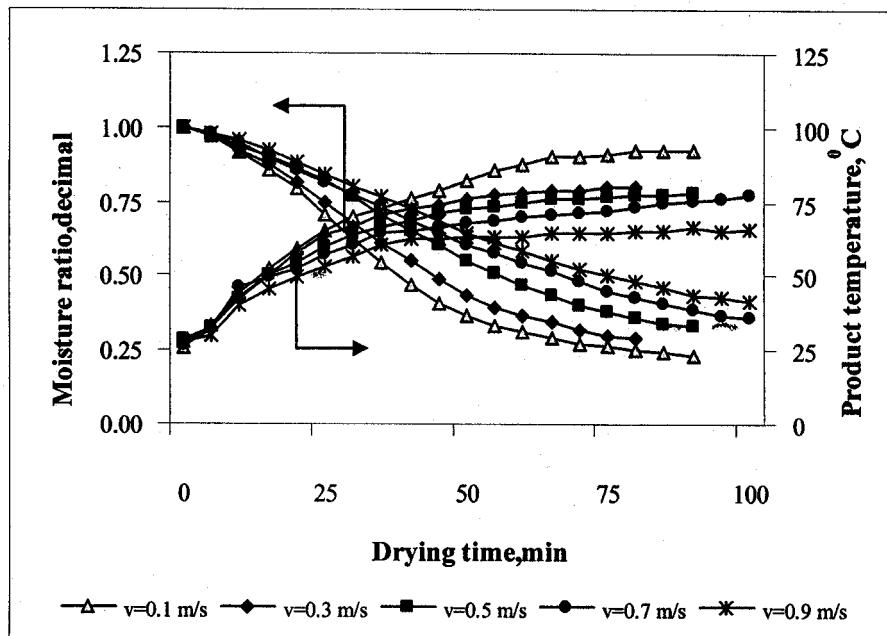
ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 260 W ระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 20 cm

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เป็นการทดลองแบบห้องโดยป้อน Power เท่ากับ 370 W ให้กับแท่งรังสีอินฟราเรด เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 พบว่าที่ความเร็วลม 0.1 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 m/s เท่ากับ 44, 56, 111 และ 122 เบอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.19 ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกายในผลิตภัณฑ์กับระยะเวลา พนวจมีแนวโน้มของกราฟคล้ายกับภาพที่ 4.17

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เป็นการทดลองแบบห้องโดยป้อน Power เท่ากับ 470 W ให้กับแท่งรังสีอินฟราเรด จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเร็วลมจะส่งผลให้อัตราการลดลงของอัตราส่วนความชื้นลดต่ำลง เนื่องจากความร้อนที่ผลิตภัณฑ์ถูกระบายมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ ดังภาพที่ 4.20

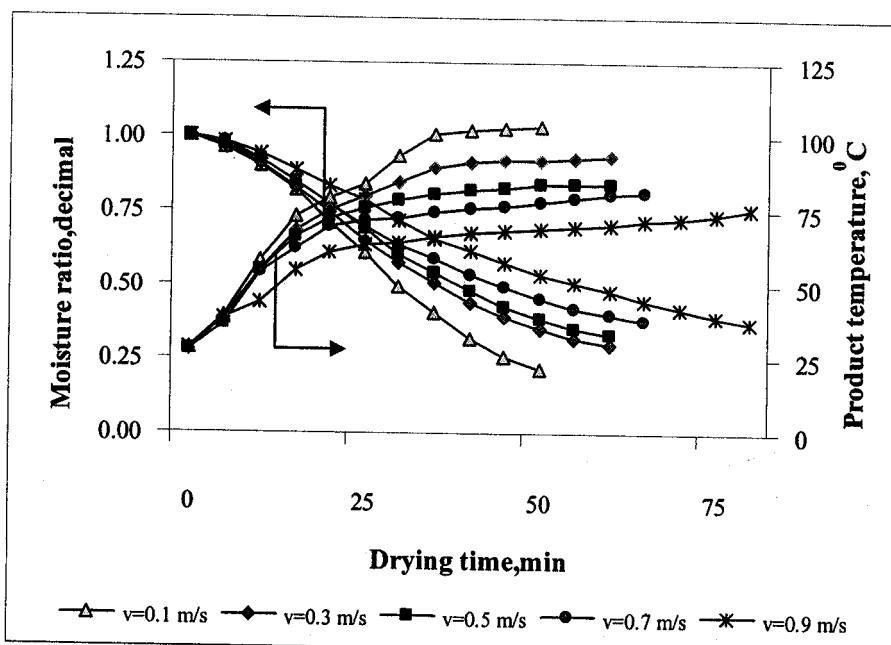


ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 370 W
ระยะห่างระหว่างหลอดคันฟราเรคกับผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 20 cm



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 470 W
ระยะห่างระหว่างหลอดคันฟราเรคกับผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 20 cm

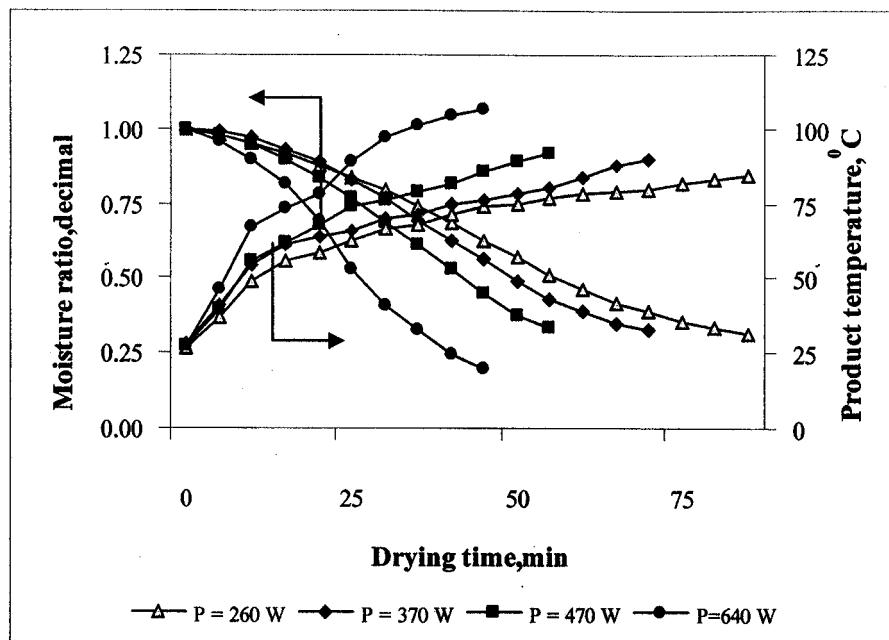
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาเป็นการทดลองแห่งโดยป้อน Power เท่ากับ 640 W ให้กับแห่งรังสีอินฟราเรด เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 พบว่า ที่ความเร็วลม 0.1 m/s จะใช้เวลาในการอบแห่งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 m/s เท่ากับ 40, 52, 80 และ 120 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกายในผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาในการอบแห่ง จากราฟพบว่าเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นอุณหภูมิกายในผลิตภัณฑ์จะลดลง ดังภาพที่ 4.21



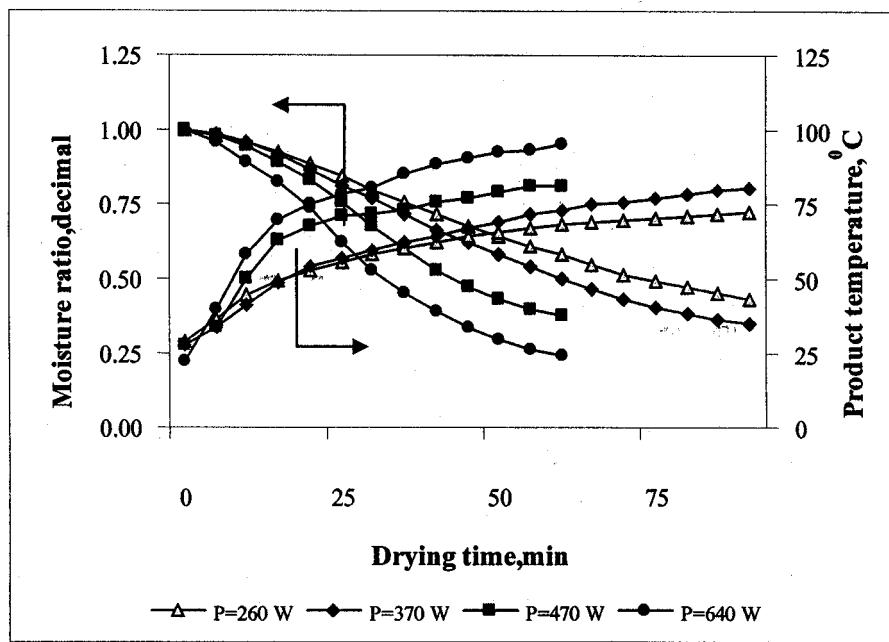
ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 640 W ระยะห่างระหว่างหลอดคันฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 20 cm

4.2.2 ผลของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแห่งรังสีอินฟราเรด

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ เมื่อใช้ความเร็วลม 0.3 m/s ระยะห่าง 10 cm และความหนาเนื้อ 1.0 cm จากรูป หากพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 พบว่า ที่กำลังไฟฟ้า 640 W ใช้ระยะเวลาในการอบแห่งสั้นกว่าที่กำลังไฟฟ้า 470, 370 และ 260 W เท่ากับ 60, 100 และ 120 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในการอบแห่งที่พลังงานต่างๆ จากราฟ พบว่าอุณหภูมิกายในผลิตภัณฑ์จะสูงสุด เมื่อให้กำลังไฟฟ้า 640 W และต่ำสุดเมื่อใช้กำลังไฟฟ้า 260 W ดังภาพที่ 4.22

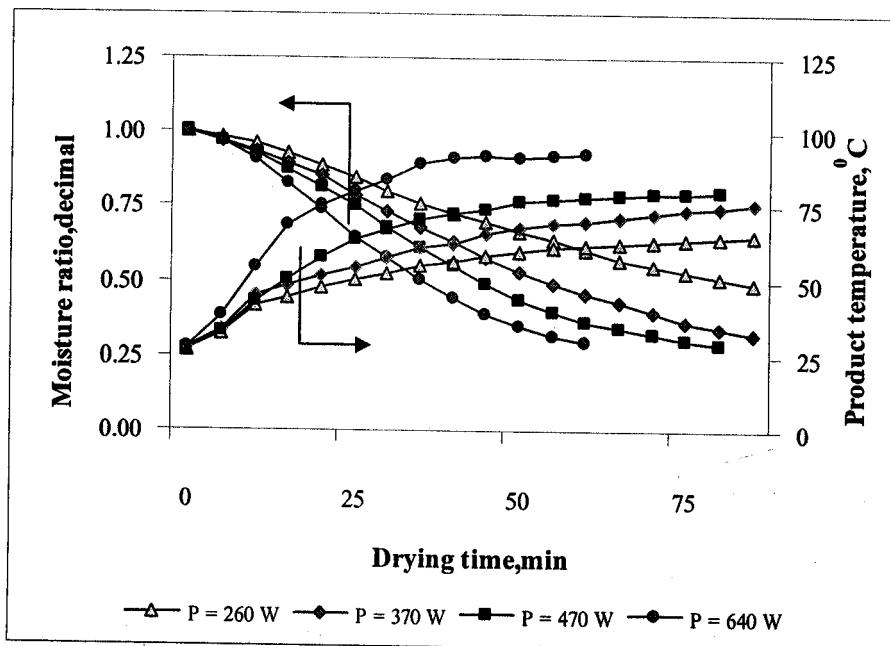


ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ระยะห่าง 10 cm
ความเร็วลม 0.3 m/s และความหนาเนื้อ 1.0 cm



ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ระยะห่าง 15 cm
ความเร็วลม 0.3 m/s และความหนาเนื้อ 1.0 cm

จากภาพที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ เมื่อใช้ความเร็วลม 0.3 m/s ระยะห่าง 10 cm และความหนาเนื้อ 1.0 cm จากภาพหากพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 พบว่า ที่กำลังไฟฟ้า 640 W ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่กำลังไฟฟ้า $470, 370$ และ 260 W เท่ากับ $33, 88$ และ 133 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า พลังงานที่ให้กับแห้งอินฟราเรดสูง ส่งผลทำให้ความชื้นของรังสีเพิ่มขึ้น พลังงานที่ส่งให้กับผลิตภัณฑ์มากขึ้น จนทำให้อุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์สูงขึ้น



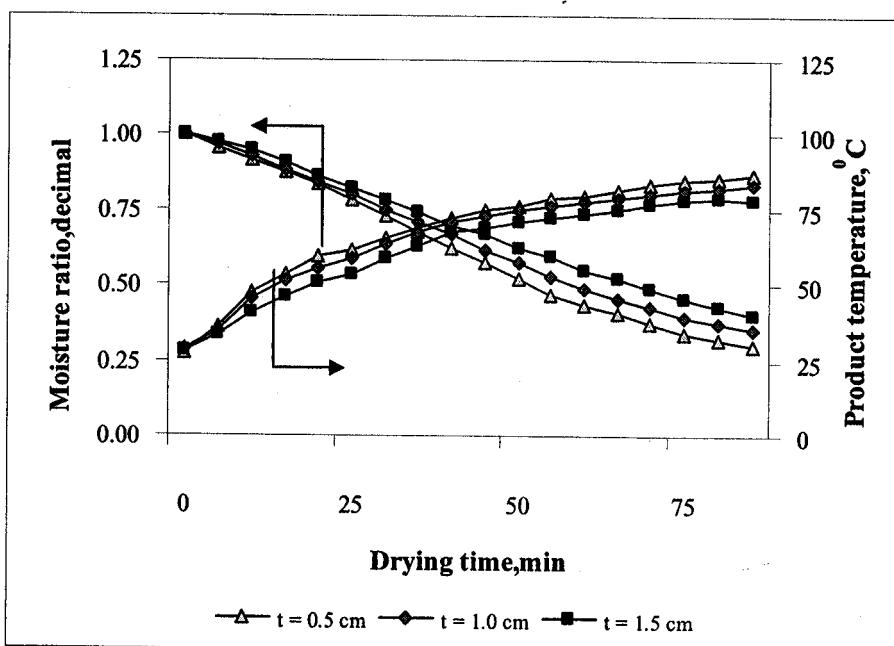
ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ระยะห่าง 20 cm
ความเร็วลม 0.3 m/s และความหนาเนื้อ 1.0 cm

จากภาพที่ 4.24 จะเห็นว่าอัตราการลดลงของอัตราส่วนความชื้นจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากพลังงานที่ต่อกräทบผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้า ดังจะเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

4.2.3 ผลของความหนา

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เป็นการทดลองอบแห้ง โดยให้กำลังไฟฟ้ากับแห้งอินฟราเรด 260 W และความเร็วลม 0.1 m/s หากพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 จากการทดลองที่ความหนาของเนื้อเป็น 0.5 cm จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความหนาของเนื้อที่ 1.0 และ 1.5 cm เท่ากับ 12 และ 31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบาย

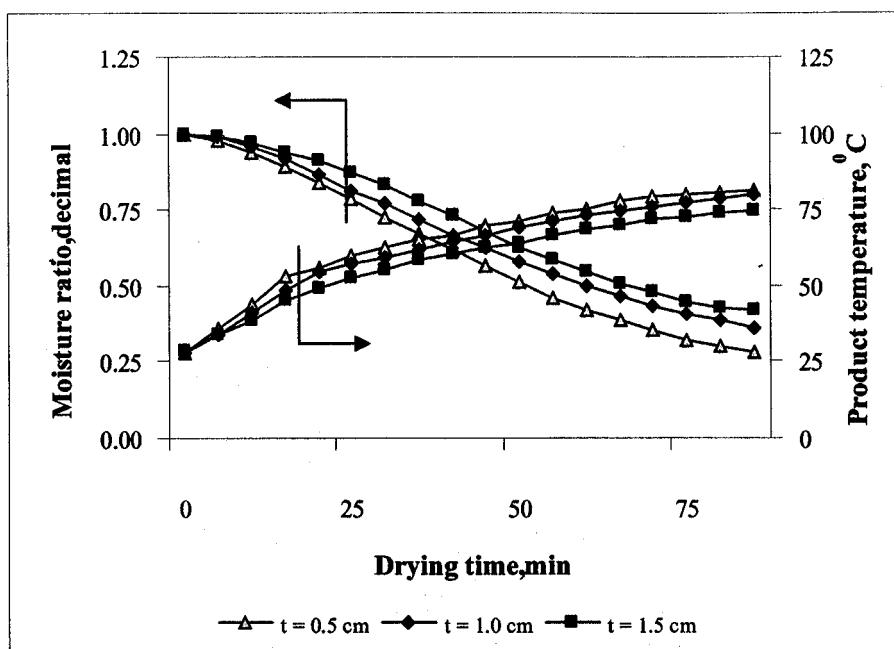
ได้ว่า กรณีที่ใช้ความหนา 0.5 cm ปริมาณพลังงานความร้อนมีการแลกเปลี่ยนกับเนื้อได้ง่าย ซึ่งจะสอดคล้องกับลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเนื้อที่แสดงในภาพส่วนผลให้อัตราการระเหยน้ำภายในเนื้อสูงตาม จากเหตุผลที่กล่าวมา เนื้อจึงสามารถลดความชื้นได้เร็วขึ้นเมื่อความหนาลดลง ดังภาพที่ 4.25



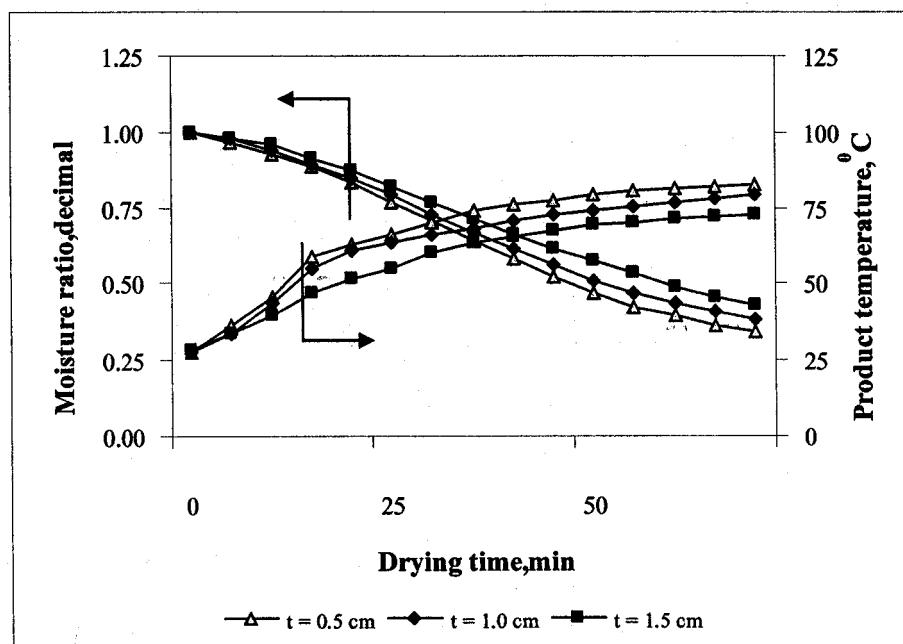
ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 260 W และความเร็วลม 0.1 m/s

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อให้กำลังไฟฟ้ากับแท่นอบฟราเดค 370 W และความเร็วลม 0.3 m/s จะเห็นว่าที่ความหนา 0.5 cm จะสามารถลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้เร็วสุด ซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ โดยที่ความหนาของผลิตภัณฑ์น้อยอุณหภูมิกายในจะสูง ดังภาพที่ 4.26

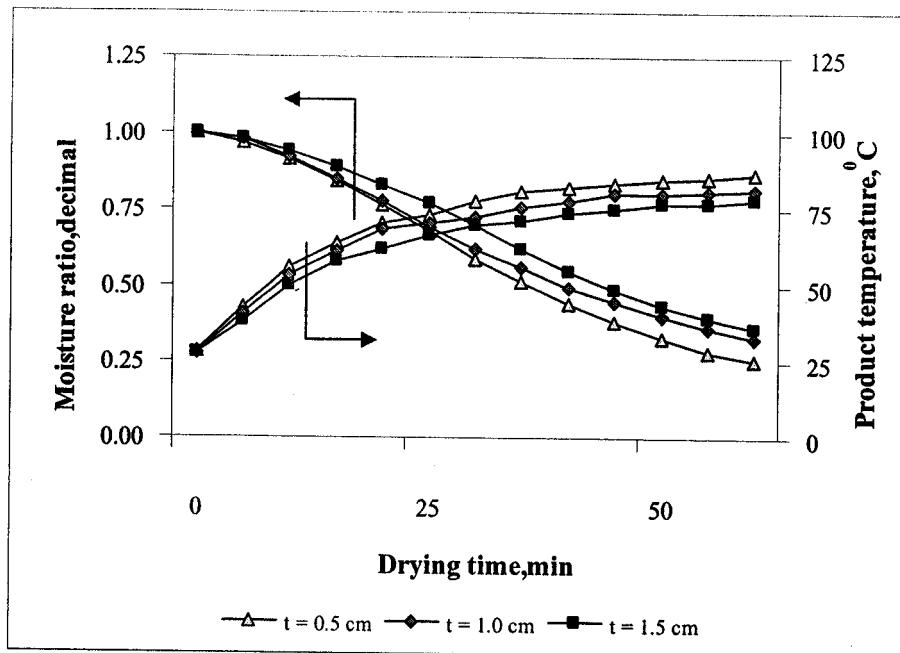
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อให้กำลังไฟฟ้ากับแท่นอบฟราเดคเท่ากับ 470 W และความเร็วลม 0.5 m/s จากกราฟเมื่อพิจารณาที่ อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 พบร่วมที่ความหนา 0.5 cm จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความหนา 1.0 และ 1.5 cm เท่ากับ 9 และ 26 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.27



ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 370 W และความเร็วลม 0.3 m/s



ภาพที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 470 W และความเร็วลม 0.5 m/s



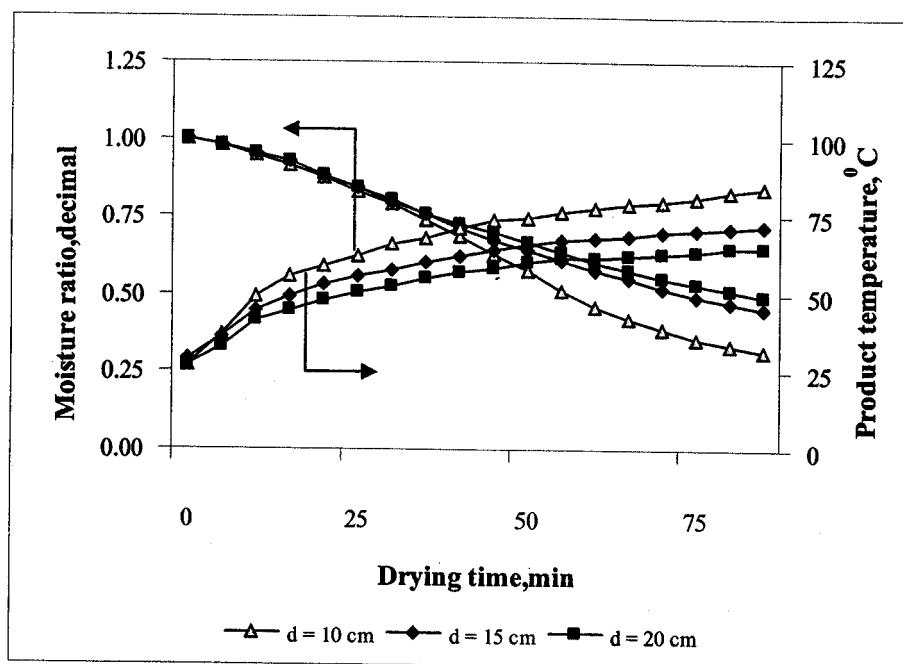
ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 640 W และความเร็วลมเป็น 0.7 m/s

จากภาพที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น และอุณหภูมิผลิตภัณฑ์กับเวลา เมื่อให้กำลังไฟฟ้ากับแท่นอินฟราเรด 640 W และความเร็วลม 0.7 m/s ผลจากการทดลองพบว่า ความชื้นจะลดลงเร็วขึ้นเมื่อความหนาของผลิตภัณฑ์ลดลง ซึ่งมีแนวโน้มของผลการทดลองคล้ายกับกรณีก่อนหน้านี้

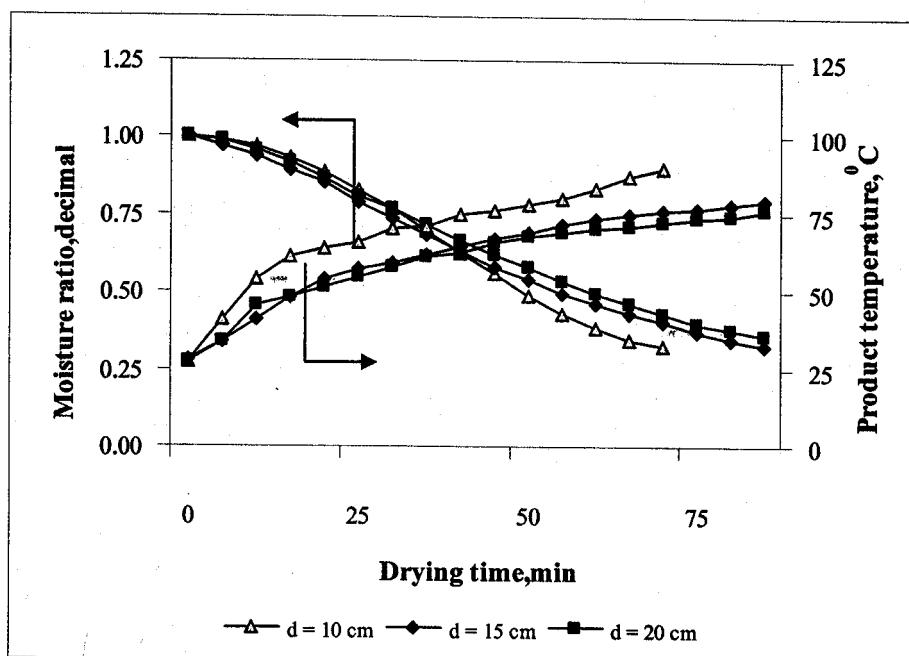
4.2.4 ผลของระยะห่าง

จากการศึกษาผลของระยะการติดตั้งแท่นรังสีอินฟราเรด สรุปได้ว่าระยะห่างมีผลต่อระยะเวลาในการอบแห้งเนื้อ โดยสังเกตได้ดังภาพที่ 4.29 ซึ่งหากพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 ที่ระยะห่าง 10 cm จะใช้เวลาสั้นที่สุด โดยใช้เวลาสั้นอยกว่าที่ระยะห่าง 15 cm และ 20 cm เท่ากับ 27 และ 45 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อระยะห่างลดลงจะส่งผลให้อุณหภูมิผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพ

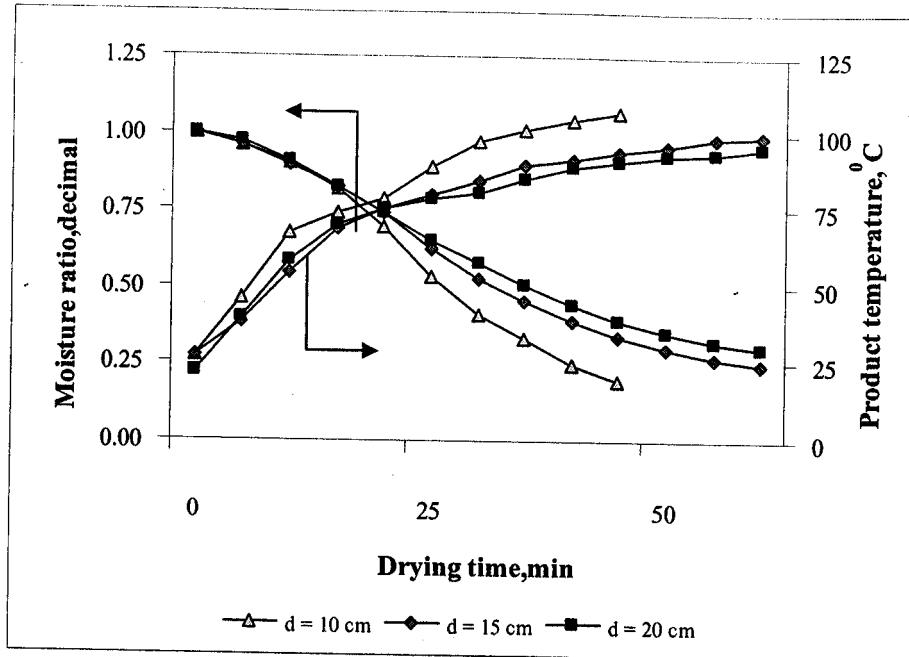
เมื่อป้อนพลังงานเพิ่มขึ้นจาก 260 W เป็น 370 W อัตราการอบแห้งที่ระยะห่าง 10 cm ที่ยังมีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด หากพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ จะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างแท่นอินฟราเรดกับเนื้อ 10 cm จะมีอัตราส่วนความชื้นต่อเวลาลดลงมากที่สุด ดังภาพที่ 4.30



ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 260 W
ความเร็วลม 0.3 m/s และความหนาเนื้อ 1.0 cm



ภาพที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 370 W
ความเร็วลม 0.3 m/s และความหนาเนื้อ 1.0 cm



ภาพที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 640 W
ความเร็วลม 0.3 m/s และความหนาเนื้อ 1.0 cm

จากภาพที่ 4.31 ป้อนพลังงานเท่ากับ 640 W หากสังเกตจากอัตราการอบแห้งโดยพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ จะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างแท่งอินฟราเรดกับเนื้อ 10 cm จะมีอัตราส่วนความชื้นต่อเวลาลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับที่ระยะห่าง 15 cm พนว่าจะใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่า 20 เบอร์เซ็นต์ และเมื่อเทียบกับที่ระยะห่าง 20 cm ใช้เวลาไม่น้อยกว่า 40 เบอร์เซ็นต์

4.2.5 ผลของการหดตัวและการเปลี่ยนแปลงของสี

จากการทดลองคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ โดยทดสอบการอบแห้งด้วยลมร้อน ร่วมกับรังสีอินฟราเรด สังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีและการหดตัว ที่อัตราส่วนความชื้นประมาณ 0.5 พนว่า

4.2.5.1 เปรียบเทียบด้านกำลังงานที่จำายให้แท่งอินฟราเรด พนว่าเบอร์เซ็นต์การหดตัวและการเปลี่ยนแปลงของสีจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มกำลังงานที่จำายให้แท่งอินฟราเรด

4.2.5.2 เปรียบเทียบด้านความเร็วลม พนว่าเมื่อเพิ่มความเร็วลมเบอร์เซ็นต์การหดตัวและการเปลี่ยนแปลงของสีจะลดลง

ตารางที่ 4.2 ตารางคุณสมบัติทางกายภาพของเนื้อที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

กำลังวัตต์ (W)/ ความเร็วลม (m/s)	การเปลี่ยนแปลงสี (ΔE)	การลดตัว (เปอร์เซ็นต์)
260/0	9.3000ab \pm 0.2151	31.6667b \pm 0.7171
	9.1833ab \pm 0.3993	31.5333b \pm 0.1434
	7.7833a \pm 0.4362	28.6667a \pm 0.7589
	7.5167a \pm 0.1897	28.4500a \pm 0.3726
	7.0667a \pm 0.2868	28.7833a \pm 0.3795
370/0	9.6167c \pm 0.3126	32.2667b \pm 0.3795
	9.3500bc \pm 0.5414	31.7000b \pm 0.7452
	8.8000b \pm 0.2484	31.6333b \pm 0.5171
	7.6000a \pm 0.4478	28.4000a \pm 0.2484
	7.1500a \pm 0.5414	29.1000a \pm 0.4303
470/0	11.7333d \pm 0.2586	33.9333c \pm 0.2868
	11.4167d \pm 0.2586	33.4333c \pm 0.2868
	9.2667bc \pm 0.5870	33.2333b \pm 0.0717
	7.7000bc \pm 0.5692	32.3000b \pm 0.4303
	7.6500a \pm 0.4478	32.1833b \pm 0.5020
640/0	15.0167e \pm 0.1897	34.1000c \pm 0.4303
	14.6500e \pm 0.3726	33.4167c \pm 0.2586
	11.6333d \pm 0.1897	33.3000c \pm 0.4968
	9.8667c \pm 0.3126	33.3167c \pm 0.3795
	8.8500b \pm 0.3286	32.3000b \pm 0.6572

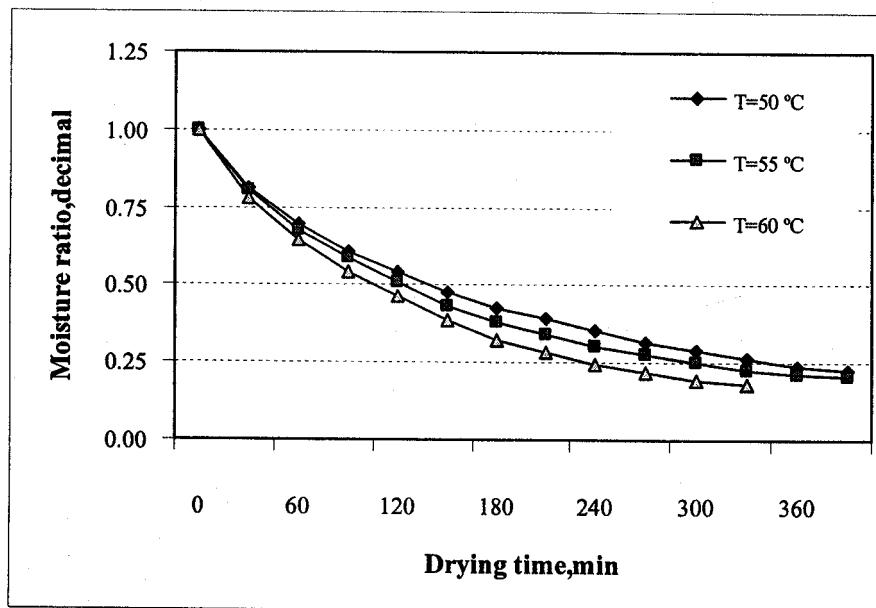
หมายเหตุ ระยะห่างระหว่างผลิตภัณฑ์และแท่งอินฟราเรดเท่ากับ 15 cm ความหนาผลิตภัณฑ์ 0.5 cm อัตราเรเมื่อนกันภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p < 0.05$

4.3 การเปรียบเทียบการใช้พลังงานในการอบแห้งเนื้อตัวยลมร้อน และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

ในงานวิจัยนี้ ได้ทดลองและวิเคราะห์การอบแห้งเนื้อแคนเดคเดียวตัวยลมร้อน และกรณีลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ซึ่งผลจากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

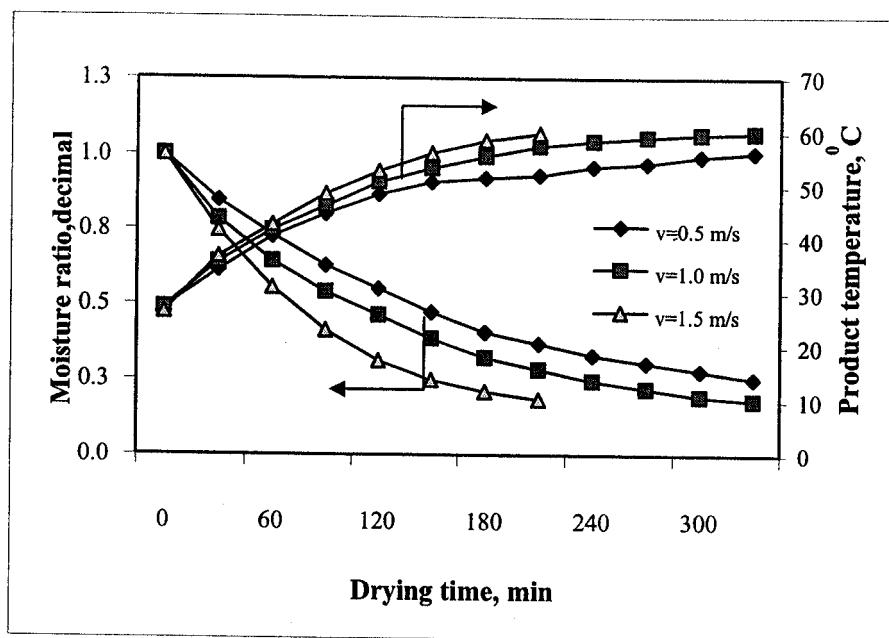
4.3.1 การอบแห้งเนื้อตัวยลมร้อน

การศึกษาในส่วนนี้ ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความเร็วลม ที่มีต่อพฤติกรรมการอบแห้งเนื้อ รวมทั้งความสัมพันธ์เปลี่ยนพลังงานจำเพาะ ซึ่งมีรายละเอียดของผลการศึกษาดังนี้



ภาพที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความเร็วลม 1.0 m/s

จากการที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งเนื้อตัวยลมร้อน ที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ โดยใช้ความเร็วลม 1.0 m/s จากภาพสรุปได้ว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C อัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์จะลดลงเร็วที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเนื้อแคนเดคเดียวได้รับพลังงานความร้อนมากที่สุด ทำให้อัตราการระเหยน้ำจากผลิตภัณฑ์สูงตามด้วย ดังจะเห็นได้จากอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกายในเนื้อ ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 4.33 และหากใช้อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 เป็นเกณฑ์ในการพิจารณา พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C จะใช้เวลาสั้นกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 °C และ 50 °C เท่ากับ 17 และ 42 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น อุณหภูมิผลิตภัณฑ์กับเวลา
ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60°C

จากภาพที่ 4.33 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้น อุณหภูมิเนื้อ กับเวลาที่ความเร็วลมต่าง ๆ โดยควบคุมอุณหภูมิอบแห้งให้คงที่เท่ากับ 60°C จะเห็นได้ว่าอัตราการ ลดลงของอัตราส่วนความชื้นในกรณีที่ใช้ความเร็วลมสูงจะลดลงเร็วกว่ากรณีที่ใช้ความเร็วลมต่ำ ซึ่ง สามารถอธิบายได้ว่า กรณีที่ใช้ความเร็วลมสูง ปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับเนื้อก็มี ปริมาณมาก ซึ่งจะสอดคล้องกับลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเนื้อ ส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำ ภายในเนื้อสูงตาม ดังนั้นจากเหตุผลที่กล่าวมา เนื้อจึงสามารถลดความชื้นได้เร็วขึ้นเมื่อเพิ่ม ความเร็วลม

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการศึกษาถึงความสัมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์กับอุณหภูมิ อบแห้ง กรณีอบแห้งด้วยลมร้อน จะมีการใช้พลังงาน 2 ส่วน คือ พลังงานที่จ่ายให้พัดลมและ พลังงานที่จ่ายให้ความร้อน ผลกระทบการศึกษาสรุปได้ดังนี้

4.3.1.1 พิจารณาที่ความเร็วลมคงที่ จากการศึกษาพบว่า ความสัมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์ จำเพาะจะลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะสั้น

4.3.1.2 พิจารณาที่อุณหภูมิคงที่ จากการศึกษาพบว่า ความสัมมูลถือเป็นผลลัพธ์ของการลดความเร็วของลม ทั้งนี้เพื่อการอบแห้งด้วยลมร้อน ความเร็วลมจะมีผลต่อการนำพาความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ ทำให้สามารถลดระยะเวลาการอบแห้ง

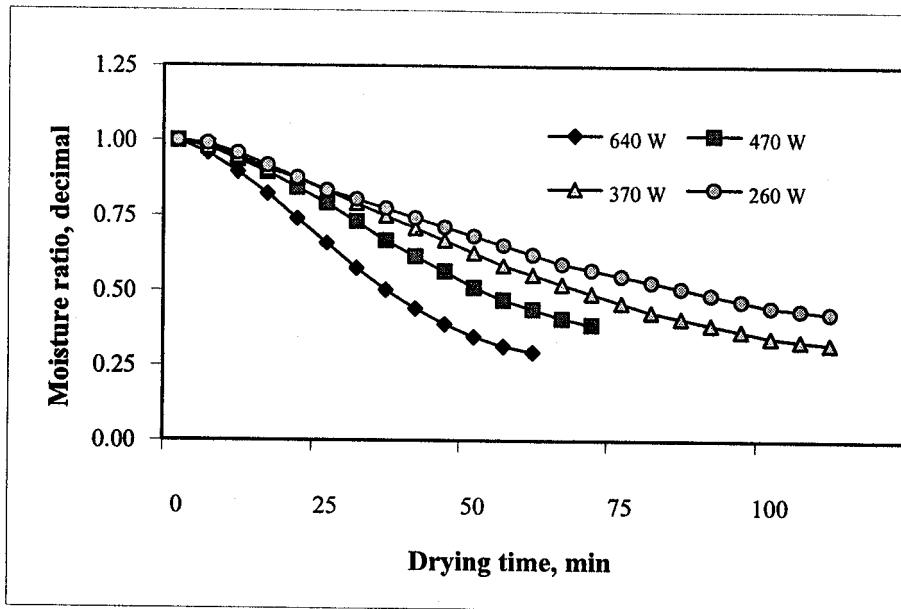
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองการอบแห้งเนื้อด้วยลมร้อนเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้น เท่ากับ 0.5

Drying temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Velocity (m/s)	Drying time (min)	Drying rate (kg/hr)	Specific energy consumption (MJ/kg-H ₂ O evap)
50	0.5	195	0.015	63.3
	1.0	170	0.018	104.2
55	0.5	160	0.019	61.4
	1.0	140	0.021	102.4
60	0.5	135	0.022	59.5
	1.0	120	0.025	101.4

4.3.2 การอบแห้งเนื้อด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

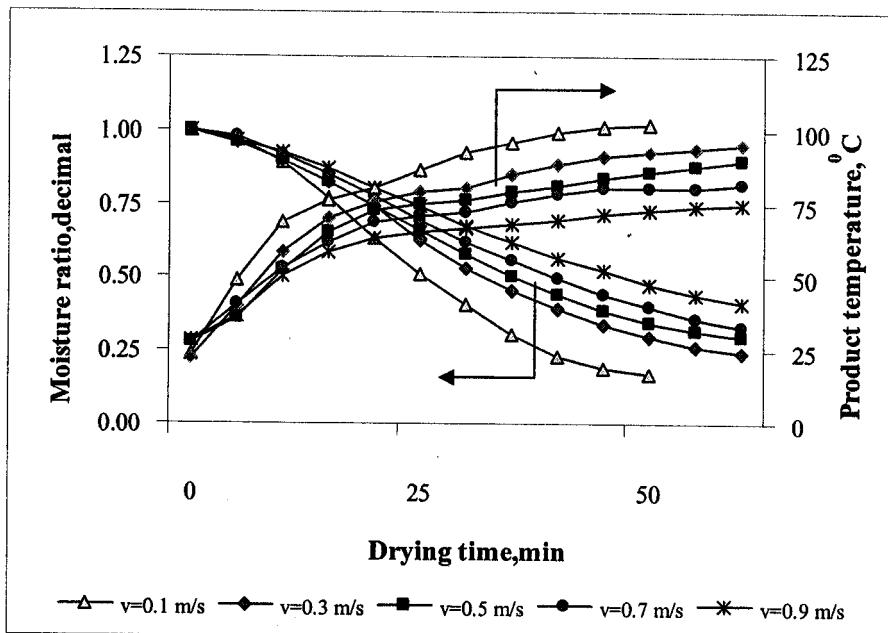
การศึกษาในส่วนการอบแห้งเนื้อด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ได้ศึกษาถึงผลของกำลังไฟฟ้าที่จำเป็นให้กับแท่นอบอินฟราเรด และความเร็วลมที่มีผลต่อพฤติกรรมการอบแห้ง และความสัมมูลถือเป็นผลลัพธ์ของการลดเวลาการอบแห้ง ได้ดังภาพที่ 4.34 และ 4.35

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ โดยกำหนดความเร็วลมให้คงที่เท่ากับ 0.5 m/s จากการทดลองสรุปได้ว่า อัตราส่วนความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้กับแท่นอบอินฟราเรด โดยที่กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 640 W จะมีอัตราการลดลงของความชื้นเร็วที่สุด ในขณะที่อัตราการลดลงของความชื้นจะช้าที่สุด เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 260 W หากพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 พบว่า การป้อนกำลังไฟฟ้าให้กับแท่นอบอินฟราเรดเท่ากับ 640 W จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการป้อนกำลังไฟฟ้า 470 W, 370 W และ 260 W เท่ากับ 43, 94 และ 143 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.34 ซึ่งสามารถให้เหตุผลได้ว่า การเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่จำเป็นให้กับแท่นอบอินฟราเรดสูงขึ้นส่งผลให้ความเร็วของรังสีที่แผ่จากแท่นอบอินฟราเรดเพิ่มขึ้น ทำให้เนื้อไส้รับพลังงานความร้อนเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้ทำให้น้ำภายในเนื้อสามารถระเหยได้เร็วขึ้น



ภาพที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ความเร็วลม 0.5 m/s ระยะห่างระหว่างผลิตภัณฑ์กับแท่นอบอินฟราเรด เท่ากับ 15 cm

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความเร็วลมต่าง ๆ โดยควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้เท่ากับ 640 W จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลา และที่ความเร็วลม 0.1 m/s จะมีอัตราส่วนความชื้นลดลงเร็วที่สุด เมื่อเทียบกับที่ความเร็วลมต่าง ๆ เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 ซึ่งเป็นค่าที่สอดคล้องกับความชื้นของเนื้อแคนเดกเดียวนะ พบว่าการอบแห้งโดยใช้ความเร็วเท่ากับ 0.1 m/s จะใช้เวลาสั้นกว่ากรณีใช้ความเร็วลม $0.3, 0.5, 0.7$ และ 0.9 m/s เท่ากับ $25, 43, 54$ และ 79 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.35 ซึ่งสรุปผลการทดลองได้ว่า การอบแห้งเนื้อแคนเดกเดียวน้ำร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ความเร็วต่างๆ จึงมีอัตราการอบแห้งสูงกว่ากรณีใช้ความเร็วลมสูงซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ เนื่องจากพฤติกรรมการให้ความร้อนของการแผรังสี จึงมีข้อแตกต่างจากการให้ความร้อนด้วยลมร้อน คือความร้อนจากแท่นอบอินฟราเรดจะถูกแผ่ไปยังเนื้อโดยตรง โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางการถ่ายเทความร้อนใด ๆ ดังนั้นจึงส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวของเนื้อสูงกว่าอุณหภูมิของลมร้อนที่ไหลผ่าน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากเนื้อไปสู่อากาศหรือลมที่พัดผ่านเนื้อ ดังนั้นหากเพิ่มความเร็วลม ก็จะช่วยทำให้ความร้อนที่ถ่ายเทจากเนื้อมีปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเนื้อที่แสดงในภาพที่ 4.35



ภาพที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ $P = 640 \text{ W}$ ระยะห่างระหว่างผลิตภัณฑ์กับแท่นอินฟราเรดเท่ากับ 15 cm

ตารางที่ 4.4 แสดงผลลัพธ์ที่ใช้ในการอบแห้งโดยใช้คลื่นความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดซึ่งประกอบด้วยพลังงาน 3 ส่วน คือ พลังงานที่จ่ายให้พัดลม ขนาดความร้อน และแท่นอินฟราเรด จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

4.3.2.1 พิจารณาที่ความเร็วลมคงที่ จากการศึกษาพบว่า ความสูงเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะจะลดลง เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแท่นอินฟราเรด ทั้งนี้เนื่องจาก เปอร์เซ็นต์การลดลงของระยะเวลาการอบแห้ง มากกว่าเพิ่มเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของพลังงานที่ใช้

4.3.2.2 พิจารณาที่กำลังไฟฟ้าคงแห่งอินฟราเรดคงที่ จะพบว่าความสูงเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วลม ทั้งนี้เกิดจากอากาศจะเป็นตัวกลางที่ทำให้อุณหภูมิที่ผ่านของผลิตภัณฑ์ลดลง ทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์กรณีที่ใช้ความเร็วลมสูงกว่ากรณีที่ใช้ความเร็วลมต่ำ ดังจะเห็นได้จากภาพที่ 4.35

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการอบแห้งเนื้อคั่วylmร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด เมื่อพิจารณาที่ อัตราส่วนความชื้น เท่ากับ 0.5

Infrared power (W)	Velocity (m/s)	Drying time (min)	Drying rate (kg/hr)	Specific energy consumption (MJ/kg-H ₂ O evap)
260	0	95	0.032	29.6
	0.5	85	0.035	43.0
	1.0	185	0.016	122.7
370	0	70	0.043	31.1
	0.5	65	0.044	41.4
	1.0	105	0.029	83.5
470	0	50	0.060	28.2
	0.5	50	0.060	37.9
	1.0	70	0.043	64.1
640	0	35	0.086	26.9
	0.5	35	0.086	33.7
	1.0	48	0.063	53.7

4.3.3 การเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

จากการศึกษาสามารถสรุปข้อแตกต่างของการอบแห้งเนื้อคั่วylmร้อน และการอบแห้งเนื้อคั่วylmร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ได้ดังนี้

4.3.3.1 กลไกการถ่ายเทความร้อน

กลไกของการอบแห้งด้วยลมร้อน กระบวนการจะเริ่มจากความร้อนถ่ายเทจากลมร้อนด้วยการพาความร้อนไปยังผิวของเนื้อ หลังจากนั้นจะเกิดการนำความร้อนจากผิวไปสู่เนื้อด้านใน ด้วยเหตุนี้ อุณหภูมิของเนื้อจะต่ำกว่าลมร้อนซึ่งเป็นตัวกลางการถ่ายเทความร้อนเสมอ ดังแสดงในภาพที่ 4.33 สำหรับลมร้อนที่พัดผ่านเนื้อ นอกจากจะเป็นตัวกลางการถ่ายเทความร้อนแล้วยังทำหน้าที่เป็นตัวกลางการถ่ายเทน้ำด้วย โดยจะทำหน้าที่ลดความชื้นที่ผิวของเนื้อ

กลไกของการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด การถ่ายเทความร้อนในการอบแห้งด้วยเทคนิคแบบผสมผ้านนี้ สามารถแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ช่วง คั่งนี้ ช่วงแรก คือ อุณหภูมิที่ผิวของเนื้อต่ำกว่าลมร้อน ซึ่งเนื้อจะได้รับความร้อนจาก 2 แหล่ง คือ จากลมร้อนและแห้งอินฟราเรด โดยกลไกการถ่ายเทความร้อนในส่วนของลมร้อน และมวลจะเกิดขึ้นในลักษณะเช่นเดียวกับที่ได้อธิบายไว้ในกรณีการอบแห้งด้วยลมร้อน สำหรับในส่วนของแห้งอินฟราเรด การถ่ายเทความร้อนจะอาศัยหลักการแผ่รังสี ซึ่งไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายความร้อน ดังนั้นรังสีหรือคลื่นความร้อนจะถูกส่งไปยังผิวของเนื้อโดยตรง ซึ่งจากการวิจัยที่ผ่านมา กล่าวไว้ว่า คลื่นความร้อนบางส่วนสามารถทะลุผ่านเข้าไปผิวในของวัสดุได้ ทำให้มีประสิทธิภาพ การถ่ายเทความร้อนสูง สำหรับในช่วงที่ 2 คือ ช่วงอุณหภูมิที่ผิวของเนื้อสูงกว่าลมร้อน ในช่วงนี้ เนื้อจะรับความร้อนจากแห้งอินฟราเรดเพียงแหล่งเดียว ในขณะเดียวกัน เนื้อจะสูญเสียความร้อน ให้กับลมร้อนที่พัดผ่าน ซึ่งในช่วงนี้ ลมร้อนจะทำหน้าที่ระบายความชื้นที่ผิวของเนื้อ ดังนั้นาหากใช้ ความเร็วลมที่สูง ก็จะมีผลทำให้เนื้อสูญเสียความร้อนมากขึ้น ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากภาพที่ 4.35

4.3.3.2 ระยะเวลาการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง และความสัม�ล่องพลังงาน จำเพาะ

จากการศึกษาพบว่า การอบแห้งเนื้อด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด จะใช้ระยะเวลาการอบแห้งที่สั้น หรืออัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว นอกจากนั้นยังพบว่า ความสัมปล่องพลังงานจำเพาะกรณีอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด มีค่าต่ำกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เป็นผลมาจากการจุดเด่นของแห้งอินฟราเรด ในส่วนของประสิทธิภาพการให้ความร้อนโดยมีลมร้อนเป็นส่วนที่ช่วยในการระบายความชื้นที่ผิวของ เนื้อ ในทางตรงกันข้าม หากพิจารณาความสัมปล่องพลังงานจำเพาะของการอบแห้งด้วยลมร้อน พบร้า มีค่าค่อนข้างสูง ทั้งนี้เนื่องจากประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการนี้จะไม่ดีเท่าที่ควร โดยสามารถสังเกตเห็นได้จาก อัตราการเพิ่มน้ำหนักของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ที่นำเสนอในภาพที่ 4.33 ซึ่ง จะมีลักษณะการเพิ่มน้ำหนักของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์อย่างช้าๆ

4.3.3.3 คุณภาพของผลิตภัณฑ์

ตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบกับคุณภาพของเนื้อแครเดดเดียว ที่วางแผนตามท้องตลาด ซึ่งได้ให้กับคุณนายครรภ์เป็นผู้พิจารณาคุณภาพในด้านสี และการหดตัว พบร้าคุณภาพของเนื้อที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนในทุกเงื่อนไขอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติควรเลือกเงื่อนไขที่มีความสัมปล่องพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด ในส่วนของคุณภาพเนื้อที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด พบร้าคุณภาพของเนื้อแครเดดเดียวจะอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เมื่อใช้ความเร็วลมตั้งแต่ 0.3 m/s ขึ้นไป จากการทดลองพบว่า ความเร็วลมต่ำกว่า 0.3

m/s เนื้อจะเกิดการหลุดร่องข้างมาก ในขณะที่สีผิวจะเข้ม และมีรอยใหม่เป็นจุด ๆ คุณลักษณะ กับเนื้อย่างซึ่งจะเกิดขึ้นกับทุกค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแท่งอินฟราเรด

4.4 สมการจันศาสตร์การอบแห้ง

4.4.1 การอบแห้งด้วยลมร้อน

ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง การอบแห้งเนื้อด้วยลมร้อนเพื่อหาสมการการ อบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมที่สุด สำหรับอธิบายพฤติกรรมการอบแห้ง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

จากการทดลองหาสมการการอบแห้งชั้นบางของเนื้อ โดยได้ทำการศึกษาที่ความเร็ว ลม $0.5 - 1.5 \text{ m/s}$ อุณหภูมิของห้องอบอยู่ระหว่าง $50 - 60^\circ\text{C}$ ได้ทำการเปรียบเทียบสมการทาง คณิตศาสตร์ตามสมการการอบแห้งชั้นบางที่สรุปไว้ในตารางที่ 4.5 และผลการวิเคราะห์ค่าคงที่ ต่าง ๆ นำค่าคงที่ที่ได้ไปพิจารณาในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิ และความเร็วลมซึ่งมีรูปแบบสมการดังสมการ (4.1)

$$a, b, c, k_0 \text{ และ } k_1 = x_0 + x_1 T + x_2 V + x_3 TV \quad (4.1)$$

เมื่อ a, b, c, k_0 และ k_1 คือ ค่าคงที่ของสมการการอบแห้ง, T คือ อุณหภูมิใน การอบแห้ง, V คือ ค่าความเร็วลม, x_i คือ ค่าคงที่ของสมการ (4.1)

จากตารางที่ 4.5 แสดงค่าคงที่ของสมการการอบแห้งชั้นบาง, R^2 และ RMSE โดยสมการการอบแห้งชั้นบางทั้ง 8 สมการซึ่ง พบร่วมกัน Two-term exponential สามารถ ดำเนินการโดยการอบแห้งเนื้อด้วยลมร้อนได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 มากที่สุด (0.99904) และค่า RMSE น้อยที่สุด (0.010494) นอกจากนี้หากจัดเรียงความสามารถในการทำนายผลการอบแห้งจากมากไป หาน้อยจะได้ดังนี้ Two-term exponential Diffusion approach Logarithmic Page Modified Page Henderson and Pabis Wang and Singh และ Newton ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าคงที่สมการอบแห้งชั้นบางของเนื้อคั่ยลมร้อน

Model	Parameter	x_0	x_1	x_2	x_3	R^2	RMSE
Newton	k	0.0036	0	0	0.0003	0.9864	0.0394
Page	k	-0.0272	0.0007	0.0424	-0.0007	0.9980	0.0152
	n	1.2163	-0.0078	-0.7620	0.0141		
Modified Page	k	0.0035	0	-0.0113	0.0003	0.9976	0.0167
	n	0.8544	-0.0010	-0.2904	0.0052		
Henderson and Pabis	k	0.0029	0	-0.0111	0.0003	0.9909	0.0322
	a	0.7786	0.0029	0.0055	0		
Logarithmic	k	-0.0045	0.0001	-0.0054	0.0002	0.9981	0.0148
	a	0.9264	-0.0016	-0.2651	0.0050		
	c	-0.2430	0.0072	0.4376	-0.0083		
Wang and Singh	a	-0.0018	0	0.0077	-0.0002	0.9866	0.0148
	b	0	0	0	0		
Two-term exponential	k_0	-0.007	0.0002	0.0130	-0.0002	0.9990	0.0105
	k_1	0.0433	-0.0009	-0.0714	0.0012		
	a	-0.8745	0.0269	3.2488	-0.0613		
	b	1.6137	-0.0222	-3.0485	0.0576		
Diffusion approach	k	-0.0235	0.0006	0.0553	-0.0009	0.9989	0.0111
	a	1.1733	-0.0157	-2.6511	0.0515		
	b	0.1192	0.0027	0.0491	-0.0020		

4.4.2 การอบแห้งคั่ยลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด

ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง การอบแห้งเนื้อคั่ยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด เพื่อหาสมการการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมที่สุด สำหรับอธิบายพฤตกรรมการอบแห้ง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

จากการทดลองหาอัตราการอบแห้งชั้นบางของเนื้อโดยได้ทำการศึกษาที่ความเร็วลม 0.1–1.0 m/s กำลังงาน 260 – 640 W ได้ทำการเปรียบเทียบสมการทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณาถึง อิทธิพลของกำลังไฟฟ้าและความเร็วลมซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$a, b, c, k_0 \text{ และ } k_1 = x_0 + x_1 P + x_2 V + x_3 PV \quad (4.2)$$

เมื่อ a, b, c, k_0 และ k_1 คือ ค่าคงที่ของสมการการอบแห้ง, P คือ กำลังไฟฟ้า, V คือ ความเร็วลม, x_i คือ ค่าคงที่ของสมการ (4.2)

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าคงที่สมการการอบแห้งชั้นบางของเนื้อตัวลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

Model	Parameter	x_0	x_1	x_2	x_3	R^2	RMSE
Newton	k	0.0041	0	-0.0076	0	0.9828	0.0394
Page	k	0.0014	0	0.0065	0	0.9938	0.0237
	n	1.2568	0.0004	-0.6731	0.0006		
Modified Page	k	0.0031	0	-0.0074	0	0.9921	0.0268
	n	0.9861	0.0010	-0.2290	-0.0003		
Henderson and Pabis	k	0.0047	0	-0.0089	0	0.9881	0.0328
	a	1.0914	0	-0.1315	0.0002		
Logarithmic	k	0.0028	0	0.0043	0	0.9926	0.0260
	a	1.4541	0.0011	-1.4822	0.0012		
	c	-0.4404	-0.0010	1.4886	-0.0013		
Wang and Singh	a	-0.0010	0	0.0016	0	0.9900	0.0300
	b	0	0	0	0		
Two-term exponential	k_0	0.0136	0	-0.0132	0	0.9963	0.0184
	k_1	-0.0156	0	0.0168	0		
	a	4.0455	0.0004	-6.0054	0.0093		
	b	-2.9645	-0.0004	5.8889	-0.0091		
Diffusion approach	k	0.0378	0	-0.0535	0	0.9958	0.0195
	a	0.5880	-0.0033	-0.0013	0.0015		
	b	0.0461	0.0009	0.0956	-0.0004		

จากตารางที่ 4.6 แสดงค่าคงที่ของสมการการอบแห้งชั้นบาง R^2 และ RMSE โดยสมการการอบแห้งชั้นบางทั้ง 8 สมการซึ่ง พบร่วมกันว่าสมการ Two-term exponential สามารถ

ท่านายผลการอบแห้งเนื้อด้วยลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 มากที่สุด (0.99625) และค่า RMSE น้อยที่สุด (0.018438) นอกจากนี้หากจัดเรียงความสามารถในการท่านายผล การอบแห้งจากมากไปหาน้อยจะได้ดังนี้ Two-term exponential Diffusion approach Page Logarithmic Modified Page Wang and Singh Henderson and Pabis และ Newton ตามลำดับ

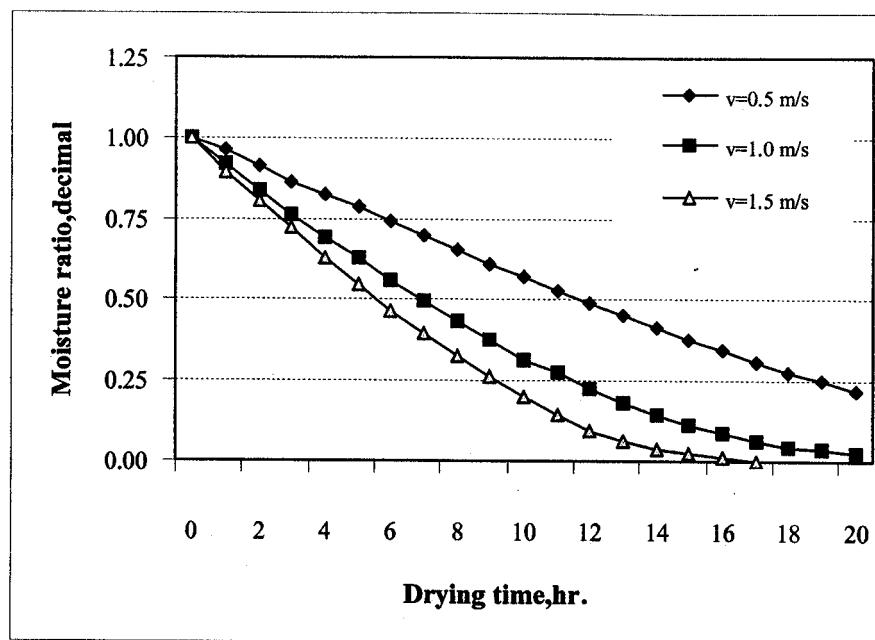
4.5 การอบแห้งพริกด้วยลมร้อน

4.5.1 ผลของความเร็วลม

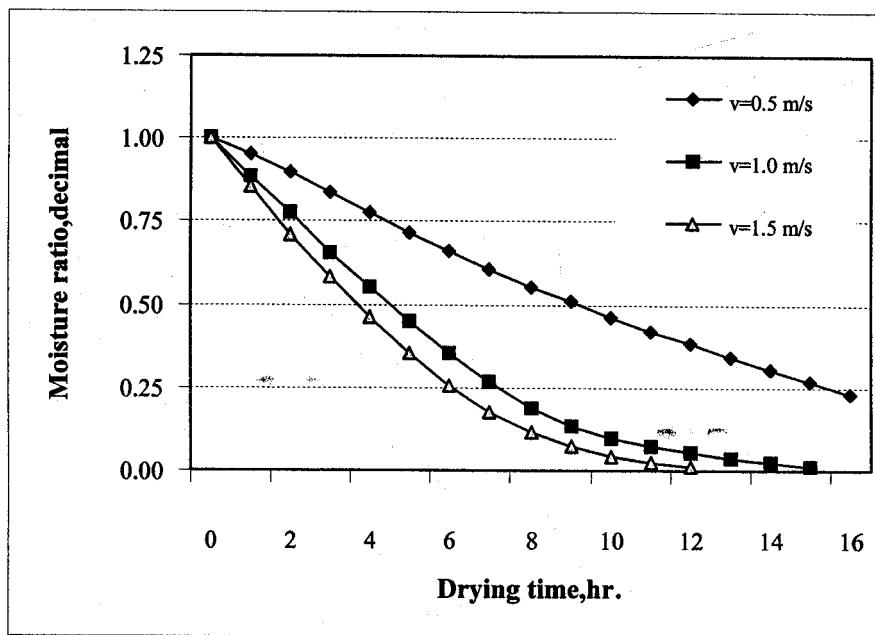
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ซึ่งเป็น การทดลองอบแห้ง โดยควบคุมอุณหภูมิห้องอบแห้งเท่ากับ 55°C เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25 พบว่าการอบแห้งด้วยความเร็วลมเท่ากับ 1.5 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.5 และ 1.0 m/s เท่ากับ 90 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.36 จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าที่ความเร็วลม 1.5 m/s จะมีความชันมากกว่าที่ความเร็วลมอื่น ๆ นอกจากนั้นยังพบว่าอัตราการลดลงของอัตราส่วนความชื้น ในกรณีที่ใช้ความเร็วลมสูงจะลดลงเร็วกว่ากรณีที่ใช้ความเร็วลมต่ำ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า กรณีที่ใช้ความเร็วลมสูง ปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับพริกจะมีปริมาณมาก ส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำภายในพริกสูงตาม จากเหตุผลที่กล่าวมาพริกจึงสามารถลดความชื้นได้เร็วขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วลม

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ซึ่งเป็น การทดลองอบแห้ง โดยควบคุมอุณหภูมิห้องอบแห้งเป็น 60°C เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25 พบว่า การอบแห้งด้วยความเร็วลมเท่ากับ 1.5 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.5 และ 1.0 m/s เท่ากับ 128 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.37

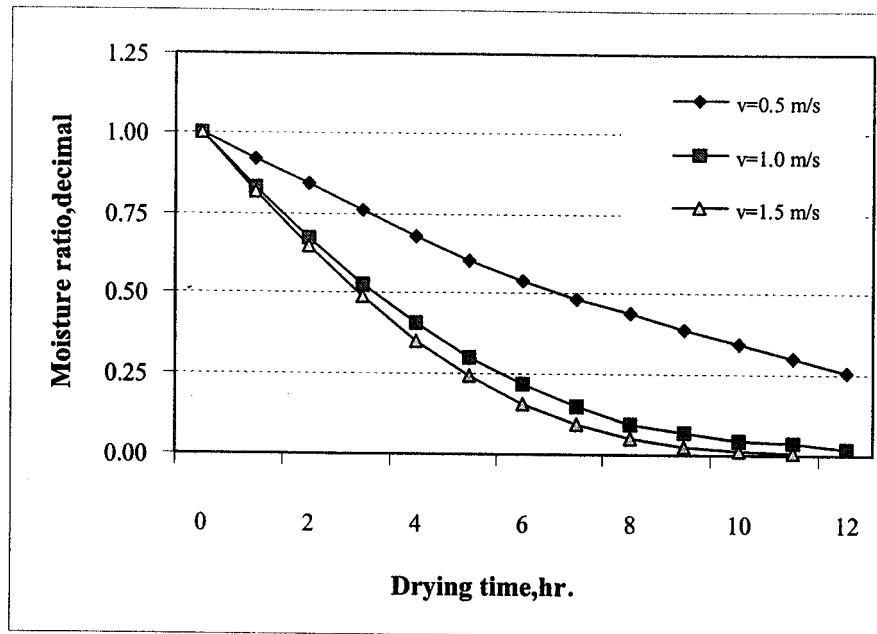
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ซึ่งเป็น การทดลองอบแห้ง โดยควบคุมอุณหภูมิห้องอบแห้งเป็น 65°C เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25 พบว่า การอบแห้งด้วยความเร็วลมเท่ากับ 1.5 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.5 และ 1.0 m/s เท่ากับ 127 และ 13 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.38



ภาพที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 55°C



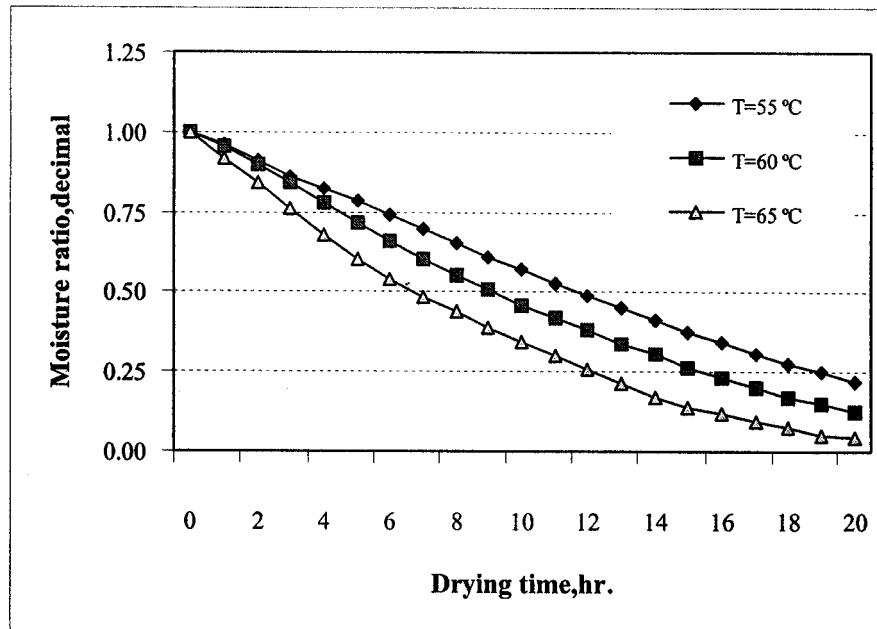
ภาพที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 60°C



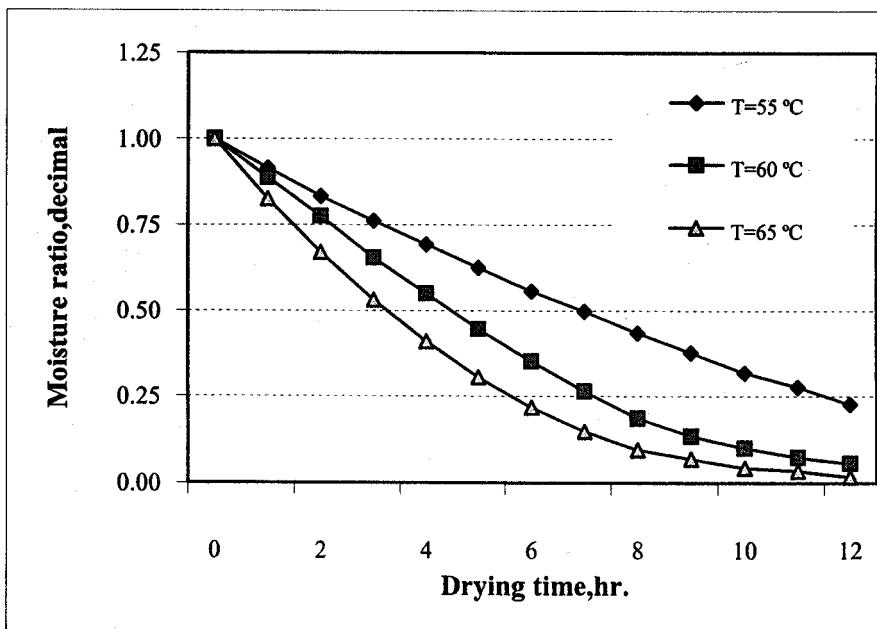
ภาพที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 65°C

4.5.2 ผลของอุณหภูมิอบแห้ง

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความเร็วลมเท่ากับ 0.5 m/s จากกราฟจะเห็นว่าสัดส่วนความชื้นจะลดลงเร็วขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง และเมื่อพิจารณาที่สัดส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25 พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 65°C จะใช้เวลาสั้นกว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง 60°C และ 55°C เท่ากับ 23 และ 46 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.39 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่ากรณีที่ใช้อุณหภูมิสูง ปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับพริกก็มีปริมาณมากส่งผลให้อัตราการระเหยนำหายในพริกสูงตาม จากเหตุผลที่กล่าวมาพริกจึงสามารถลดความชื้นได้เร็วขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น



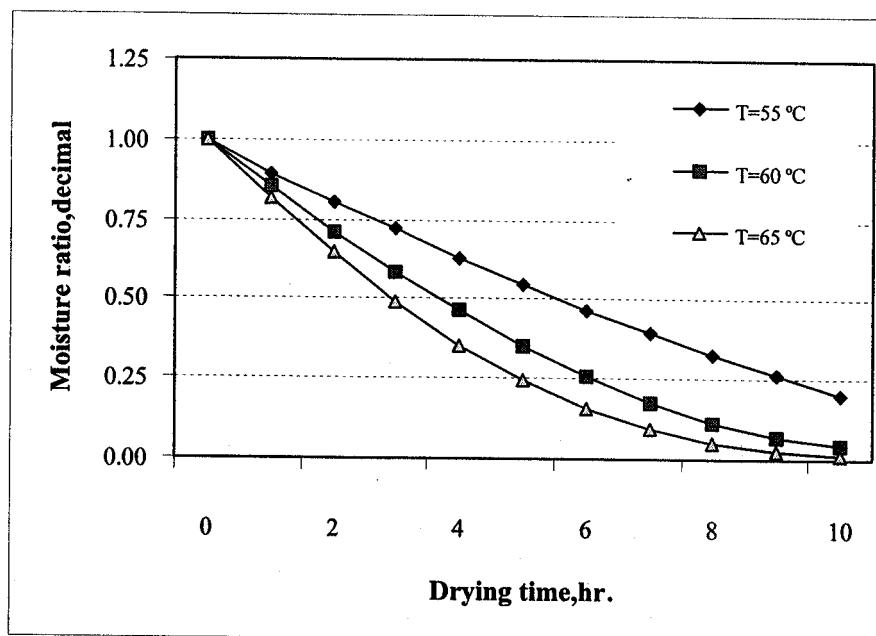
ภาพที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความเร็วลม 0.5 m/s



ภาพที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความเร็วลม 1.0 m/s

จากภาพที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความเร็วลมเท่ากับ 1.0 m/s จากกราฟจะเห็นว่าสัดส่วนความชื้นจะลดลงเร็วขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ อย่างแห้ง และเมื่อพิจารณาที่สัดส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25 พบร่วงการอบแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 65 °C

จะใช้เวลาสักว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง 60°C และ 55°C เท่ากับ 25 และ 100 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

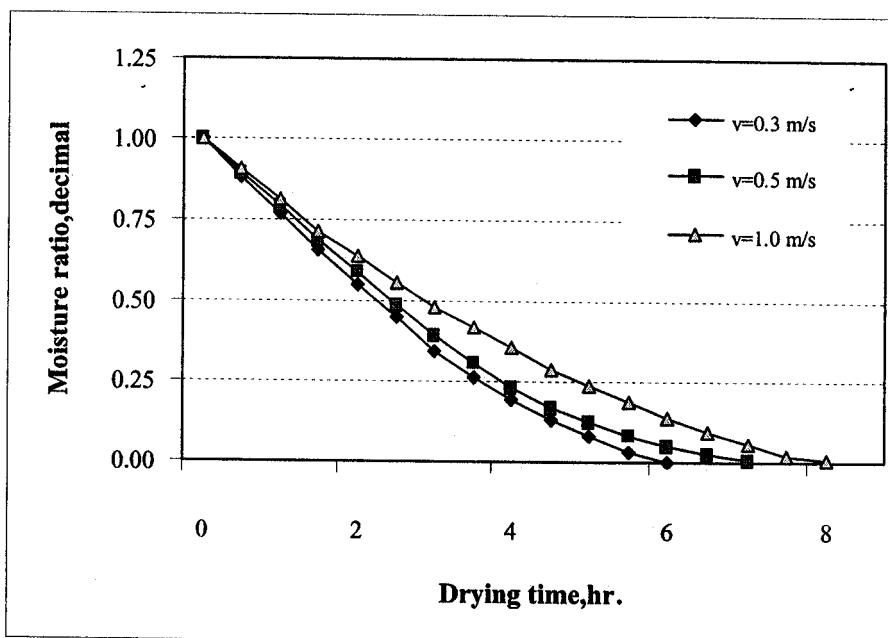


ภาพที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความเร็วลม 1.5 m/s

จากภาพที่ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความเร็วลมเท่ากับ 1.0 m/s จากกราฟจะเห็นว่าสัดส่วนความชื้นจะลดลงเร็วขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง และเมื่อพิจารณาที่สัดส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25 พบร่วงการอบแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 65°C จะใช้เวลาสักว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง 60°C และ 55°C เท่ากับ 18 และ 73 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

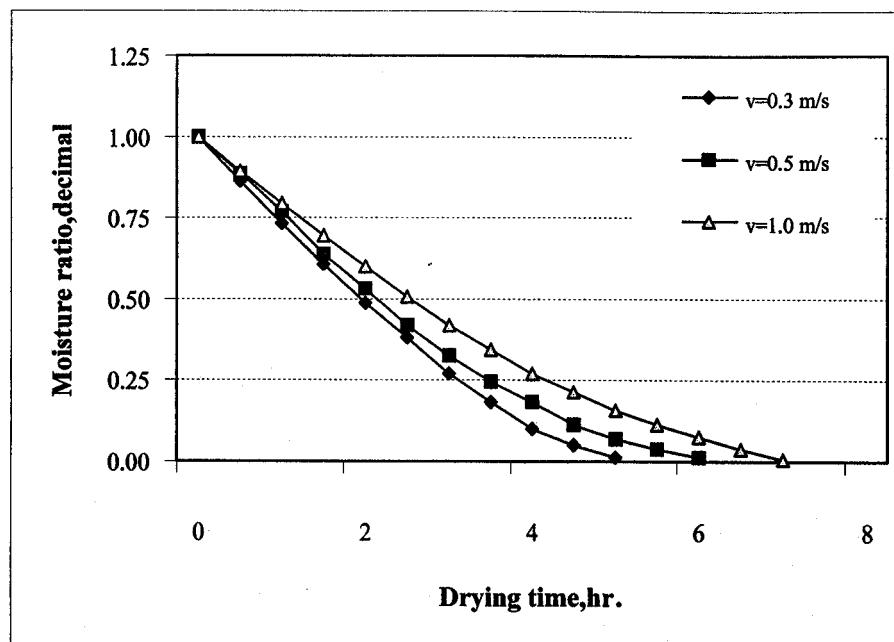
4.6 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

4.6.1 ผลของความเร็วลม

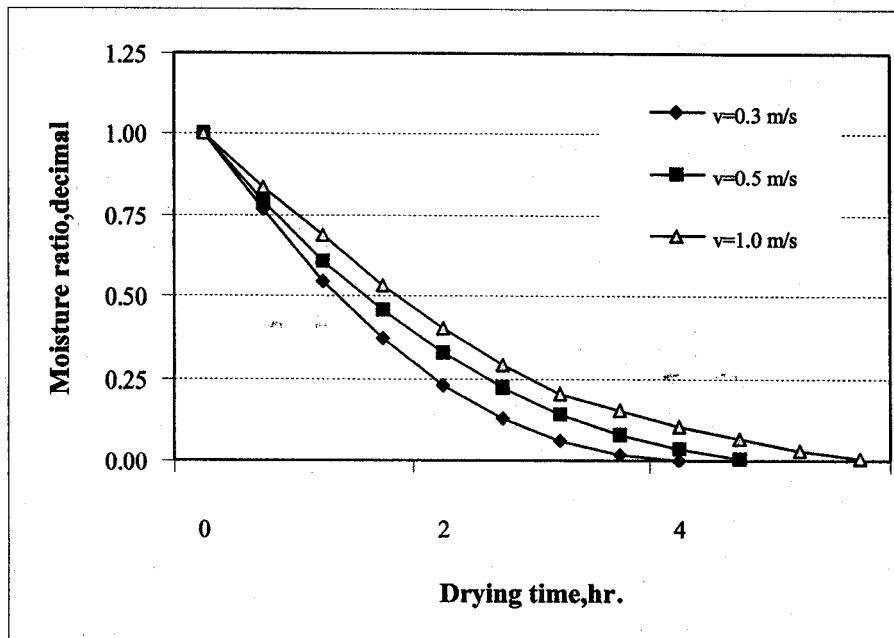


ภาพที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 260 W
ระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 10 cm

จากภาพที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เป็นการทดลองอบแห้งโดยป้อน Power เท่ากับ 260 W ให้กับแห้งรังสีอินฟราเรด เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25 พนท. ทราบว่าการอบแห้งด้วยความเร็วลม 0.3 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.5 และ 1.0 m/s เท่ากับ 5 และ 25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ หากเปรียบเทียบที่ความเร็วลมต่าง ๆ ที่ความเร็วลม 0.3 m/s จะมีความชันมากกว่าที่ความเร็วลมอื่น ๆ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบทุกความเร็วลม ความเร็วลมที่มากขึ้นจะได้กราฟที่มีความชันลดลงเรื่อย ๆ เนื่องจากอากาศจะนำพาเอากลิ่นจากบริเวณผิวด้วยของผลิตภัณฑ์ออกไปเร็วขึ้น



ภาพที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 370 W
ระยะห่างระหว่างหลอดคือในฟาราเดคกับผลิตภัณฑ์เท่ากับ 10 cm

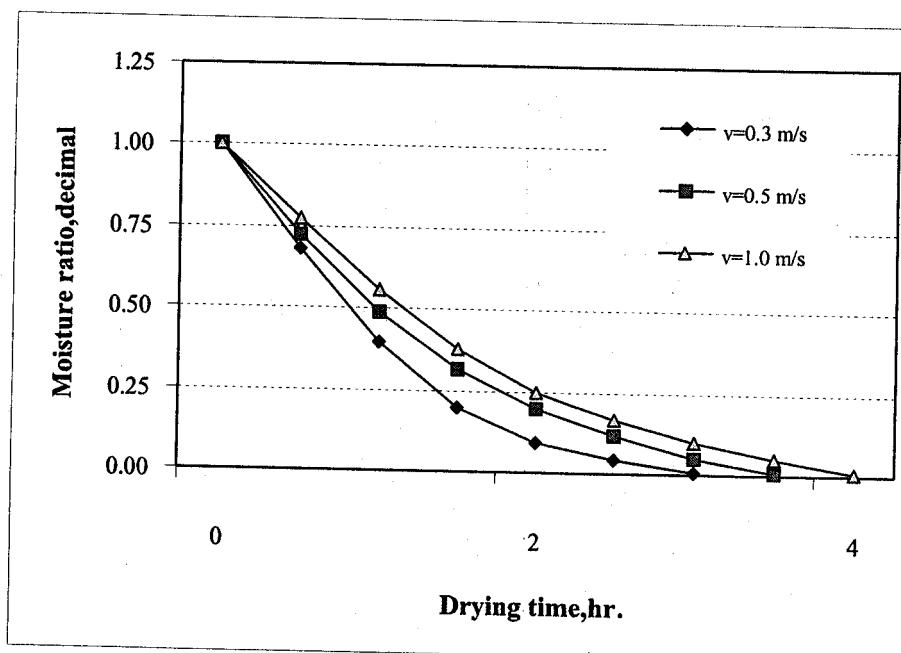


ภาพที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 470 W
ระยะห่างระหว่างหลอดคือในฟาราเดคกับผลิตภัณฑ์เท่ากับ 10 cm

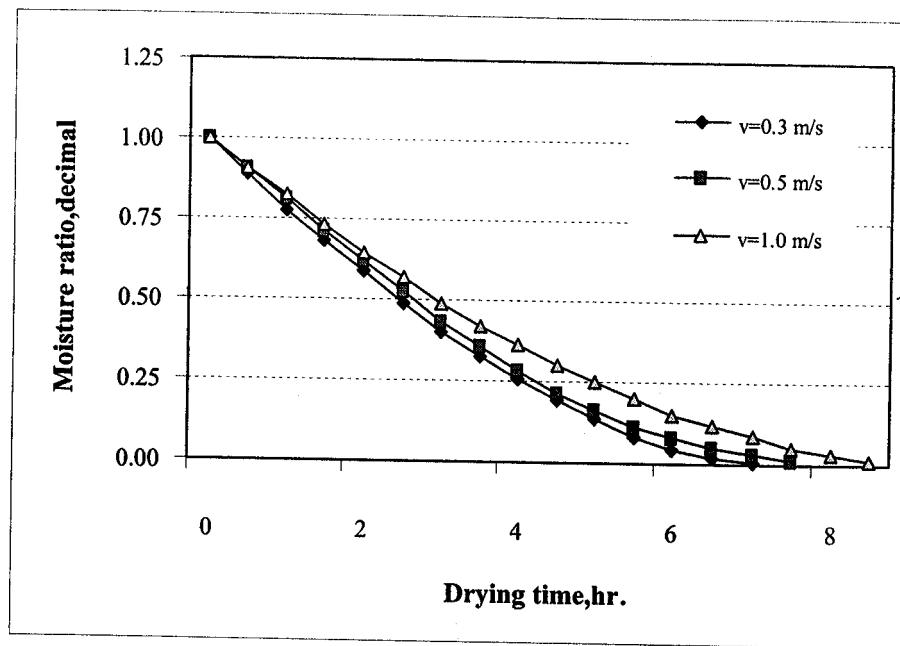
จากภาพที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เป็นการทดลองอบแห้งโดยปืน Power เท่ากับ 370 W ให้กับแท่นรังสีอินฟราเรด เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25 พบว่าการอบแห้งด้วยความเร็วลม 0.3 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.5 และ 1.0 m/s เท่ากับ 8 และ 23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เป็นการทดลองอบแห้งโดยปืน Power เท่ากับ 470 W ให้กับแท่นรังสีอินฟราเรด เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25 พบว่าการอบแห้งด้วยความเร็วลม 0.3 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.5 และ 1.0 m/s เท่ากับ 16 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เป็นการทดลองอบแห้งโดยปืน Power เท่ากับ 640 W ให้กับแท่นรังสีอินฟราเรด เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25 พบว่าการอบแห้งด้วยความเร็วลม 0.3 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.5 และ 1.0 m/s เท่ากับ 17 และ 36 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.45



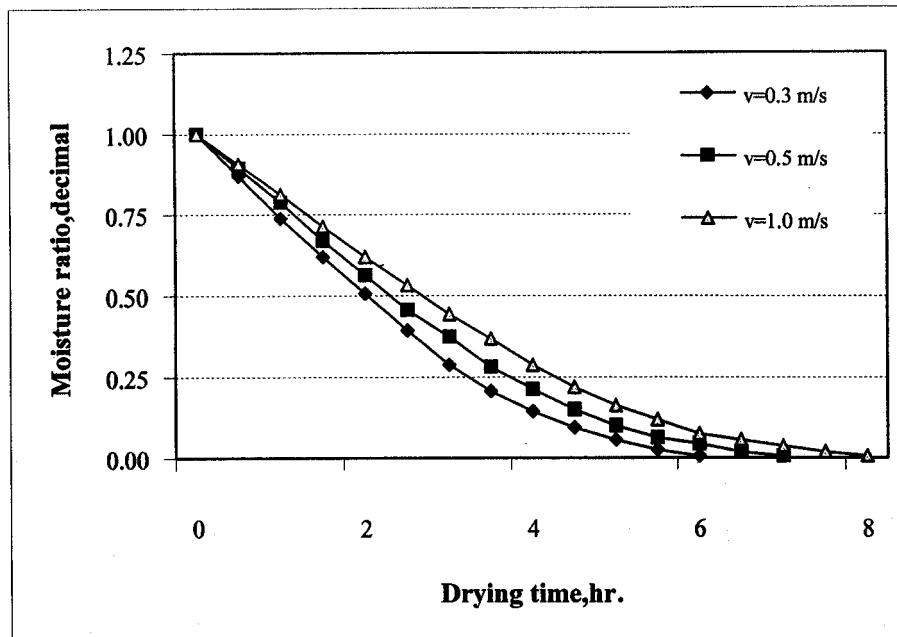
ภาพที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 640 W ระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับพลิตภัณฑ์ เท่ากับ 10 cm



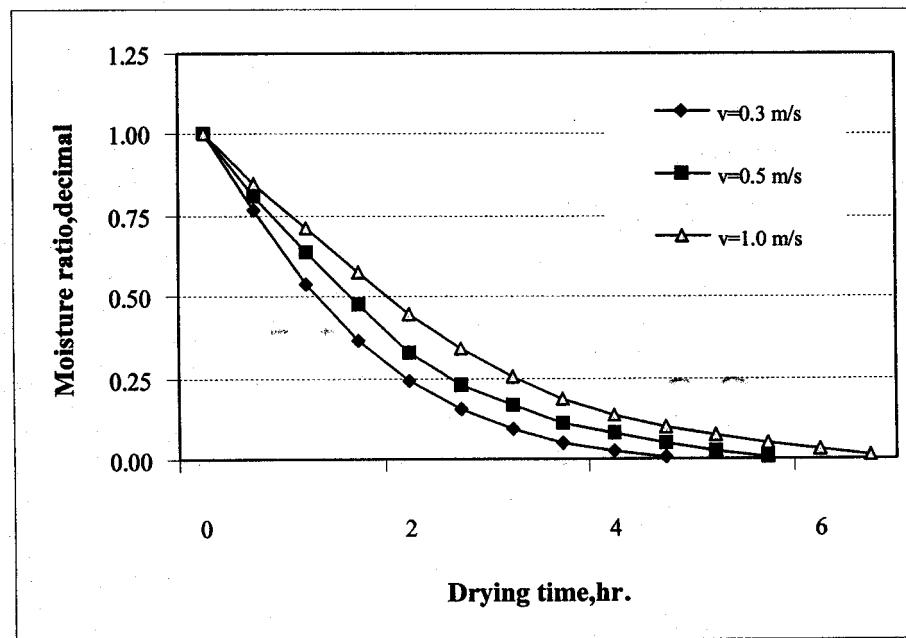
ภาพที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 260 W ระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 15 cm

จากภาพที่ 4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งพริกวัวที่ความเร็วลมต่าง ๆ การทดลองอบแห้งนี้ให้ Power เท่ากับ 260 W และระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 15 cm กับแห่งรังสีอินฟราเรด จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลา และที่ความเร็วลม 0.1 m/s จะมีอัตราส่วนความชื้นลดลงเร็วที่สุด เมื่อเทียบกับความเร็วลมต่าง ๆ เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25 เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ พนว่าการอบแห้งที่ความเร็วลมเท่ากับ 0.3 m/s จะใช้เวลาสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.5 และ 1.0 m/s เท่ากับ 5 และ 22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาเป็นการทดลองอบแห้งโดยป้อน Power เท่ากับ 370 W ให้กับแห่งรังสีอินฟราเรดหากพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25 จะพบว่าที่ความเร็วลม 0.3 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.5 และ 1.0 m/s เท่ากับ 10 และ 23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.47



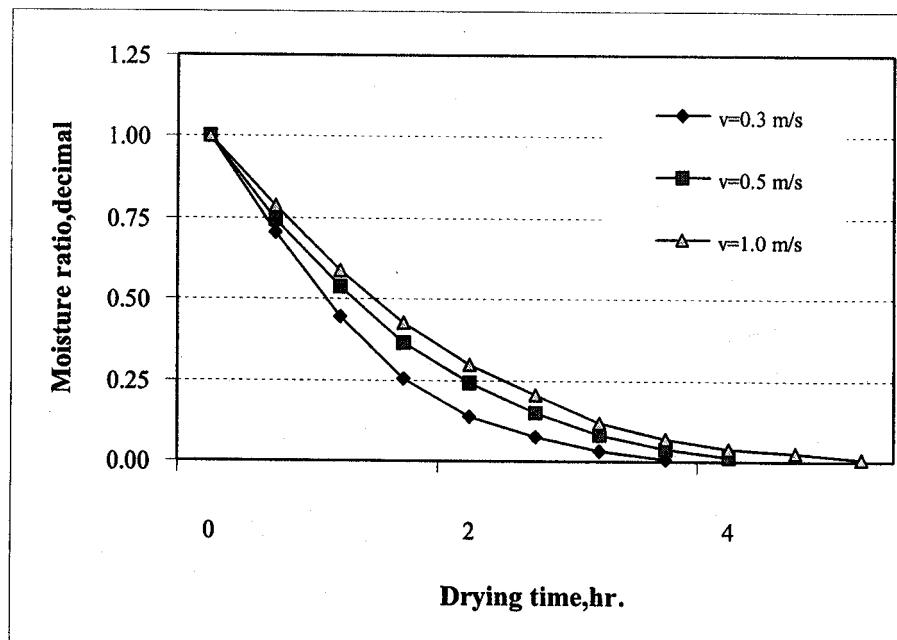
ภาพที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 370 W
ระยะห่างระหว่างหลอดคันฟราเรคกับผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 15 cm



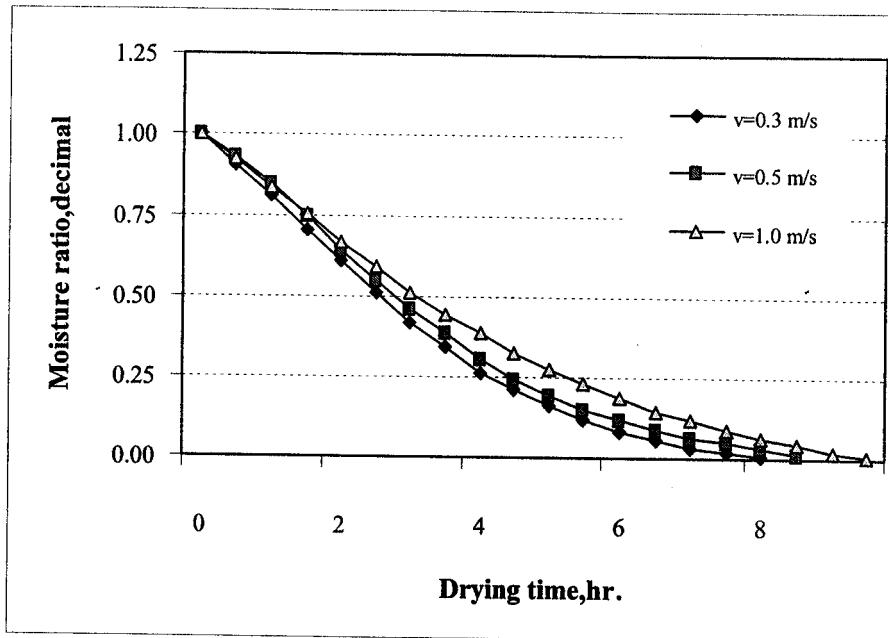
ภาพที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 470 W
ระยะห่างระหว่างหลอดคันฟราเรคกับผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 15 cm

จากภาพที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เป็นการทดลองอบแห้งโดยป้อน Power เท่ากับ 470 W ให้กับแท่นรังสีอินฟราเรด หากพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25 จะพบว่าที่ความเร็วลม 0.3 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.5 และ 1.0 m/s เท่ากับ 24 และ 48 เบอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เป็นการทดลองอบแห้งโดยป้อน Power เท่ากับ 640 W ให้กับแท่นรังสีอินฟราเรด หากพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25 จะพบว่าที่ความเร็วลม 0.3 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.5 และ 1.0 m/s เท่ากับ 12 และ 48 เบอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.49



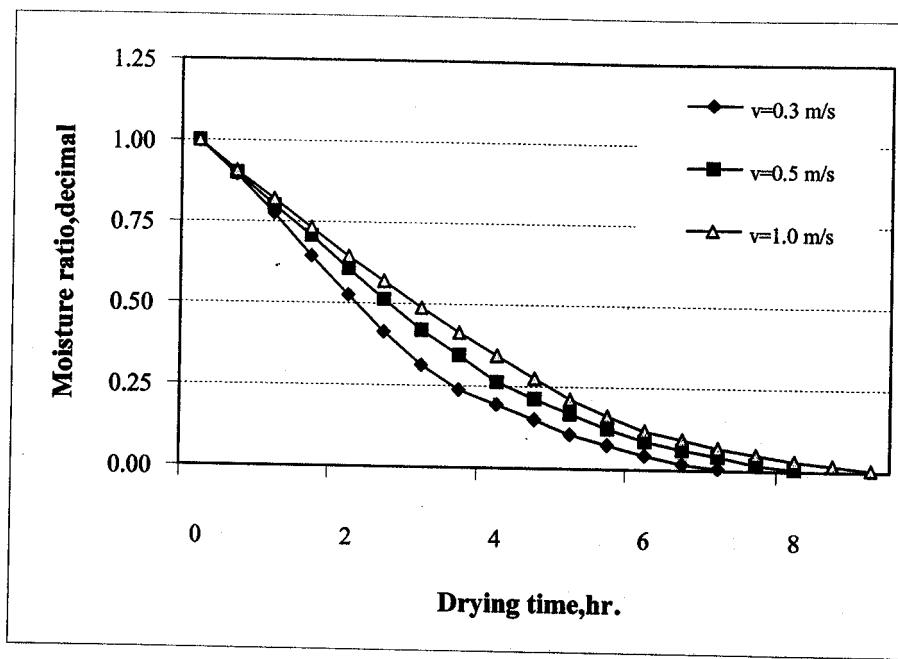
ภาพที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 640 W
ระยะห่างระหว่างหลอดคอลอฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 15 cm



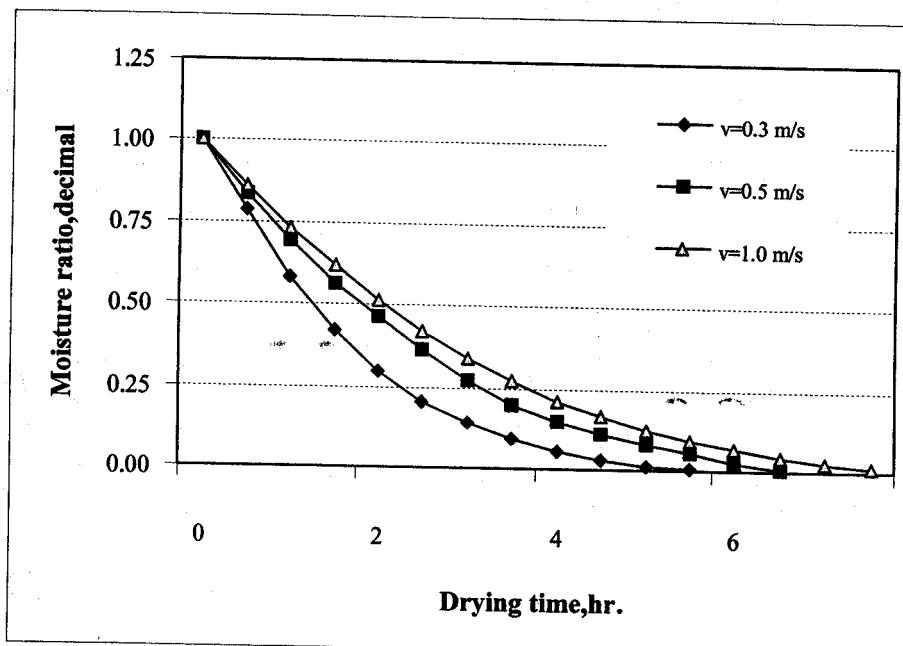
ภาพที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 260 W
ระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 20 cm

จากภาพที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาเป็นการทดลอง
บนแท่นโดยป้อน Power เท่ากับ 260 W ให้กับแท่นรังสีอินฟราเรด หากพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้น
เท่ากับ 0.25 จะพบว่าที่ความเร็วลม 0.3 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.5 และ
1.0 m/s เท่ากับ 6 และ 23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เป็นการทดลองบนแท่นโดย
ป้อน Power เท่ากับ 370 W ให้กับแท่นรังสีอินฟราเรด หากพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25
จะพบว่าที่ความเร็วลม 0.3 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.5 และ 1.0 m/s
เท่ากับ 6 และ 23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.51



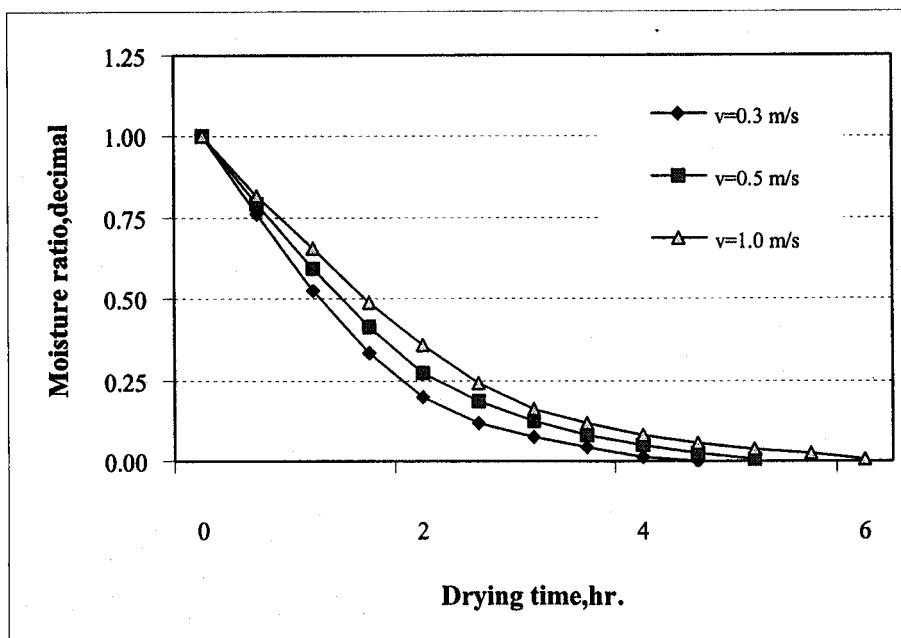
ภาพที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 370 W
ระยะห่างระหว่างหลอดคันฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 20 cm



ภาพที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 470 W
ระยะห่างระหว่างหลอดคันฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 20 cm

จากภาพที่ 4.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เป็นการทดลองอบแห้งโดยป้อน Power เท่ากับ 470 W ให้กับแท่งรังสีอินฟราเรด หาก Graf จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเร็วลมจะส่งผลให้อัตราการลดลงของอัตราส่วนความชื้นลดต่ำลง เนื่องจากความร้อนที่ผลิตภัณฑ์ถูกระบายมากขึ้น

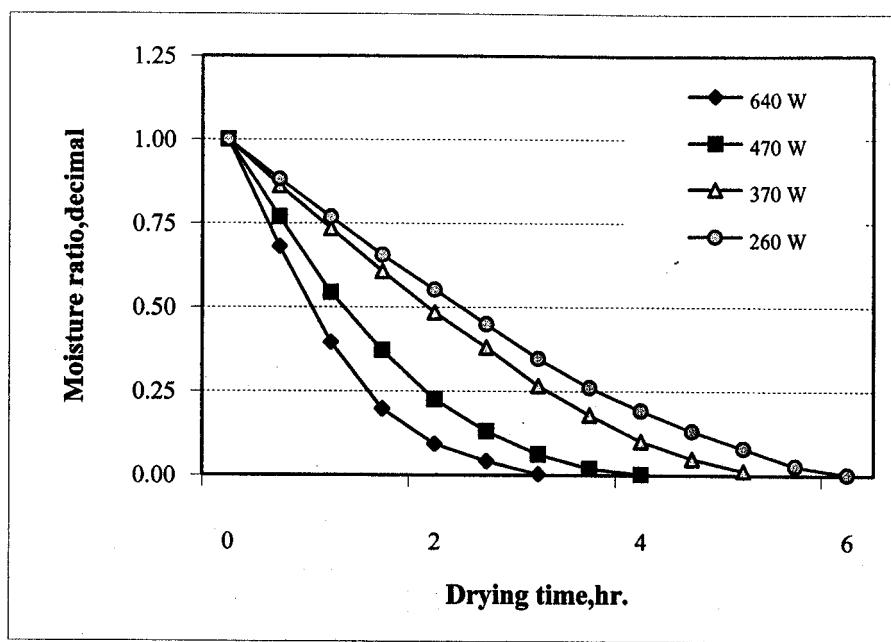
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เป็นการทดลองอบแห้งโดยป้อน Power เท่ากับ 640 W ให้กับแท่งรังสีอินฟราเรด หากพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25 จะพบว่าที่ความเร็วลม 0.3 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ความเร็วลม 0.5 และ 1.0 m/s เท่ากับ 16 และ 35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.53



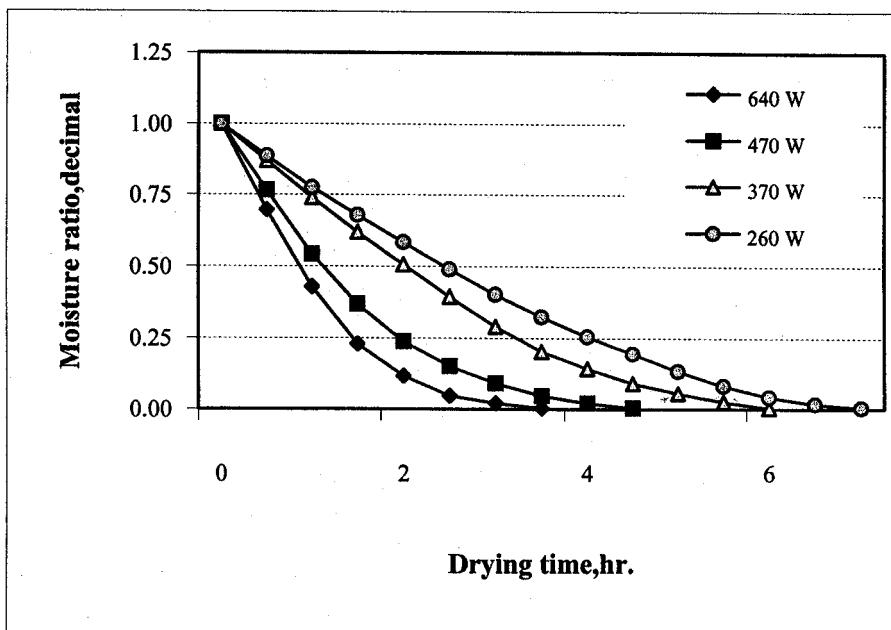
ภาพที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 640 W ระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 20 cm

4.6.2 ผลของการล้างไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแท่งรังสีอินฟราเรด

ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ เมื่อใช้ความเร็วลม 0.3 m/s ระยะห่าง 10 cm หากพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 พบร่วมที่กำลังไฟฟ้า 640 W ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่กำลังไฟฟ้า 470, 370 และ 260 W เท่ากับ 20, 60 และ 85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าพลังงานที่ให้กับแท่งอินฟราเรดสูง ส่งผลทำให้ความเข้มของรังสีเพิ่มขึ้นพลังงานที่ให้กับผลิตภัณฑ์มากขึ้น ดังภาพที่ 4.54

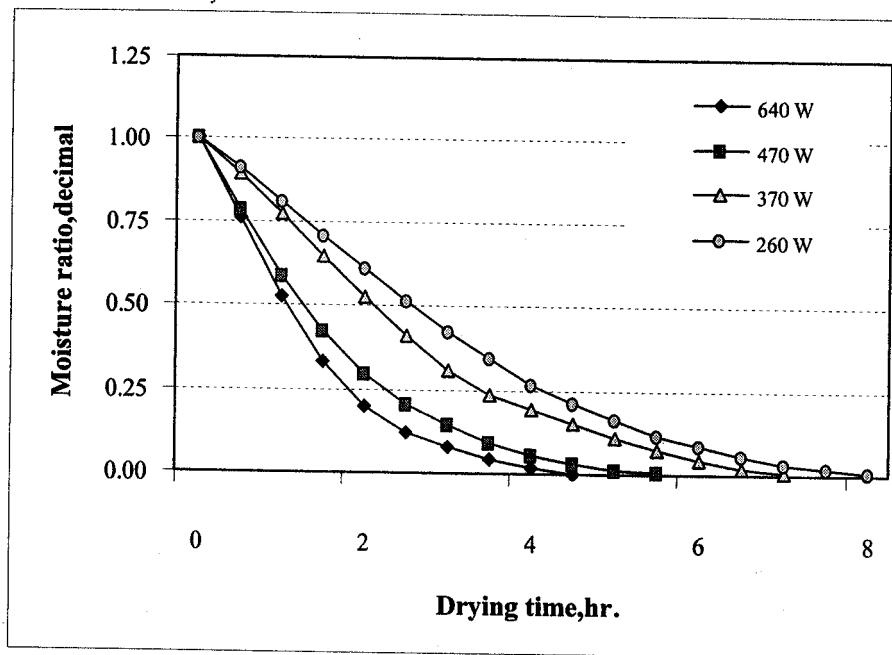


ภาพที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ระยะห่าง 10 cm
ความเร็วลม 0.3 m/s



ภาพที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ระยะห่าง 15 cm
ความเร็วลม 0.3 m/s

จากภาพที่ 4.55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ เมื่อใช้ความเร็วลม 0.3 m/s ระยะห่าง 15 cm จากภาพหากพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 พบว่าที่กำลังไฟฟ้า 640 W ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่กำลังไฟฟ้า $470, 370$ และ 260 W เท่ากับ $24, 75$ และ 120 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



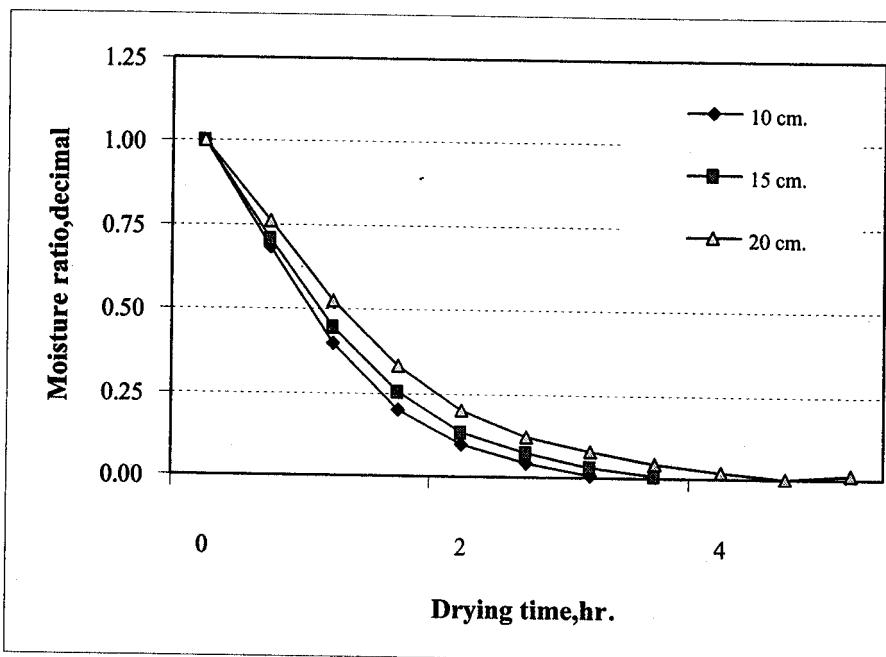
ภาพที่ 4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ระยะห่าง 20 cm
ความเร็วลม 0.3 m/s

จากภาพที่ 4.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ เมื่อใช้ความเร็วลม 0.3 m/s ระยะห่าง 20 cm จากภาพหากพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 พบว่า ที่กำลังไฟฟ้า 640 W ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่กำลังไฟฟ้า $470, 370$ และ 260 W เท่ากับ $20, 85$ และ 110 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

4.6.3 ผลของระยะห่าง

จากการศึกษาผลของระยะการติดตั้งหลอดรังสีอินฟราเรดสรุปได้ว่า ระยะห่างมีผลต่อระยะเวลาในการอบแห้งพริก โดยสังเกตได้ดังภาพที่ 4.57 ซึ่งหากพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25 ที่ระยะห่าง 10 cm จะใช้เวลาสั้นที่สุด โดยใช้เวลาน้อยกว่าที่ระยะห่าง 15 cm และ 20 cm เท่ากับ 8 และ 16 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าระยะห่างของแท่งอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ ส่งผลต่อความเข้มของรังสีที่ระยะห่างน้อยจะทำให้ได้รับความเข้มของ

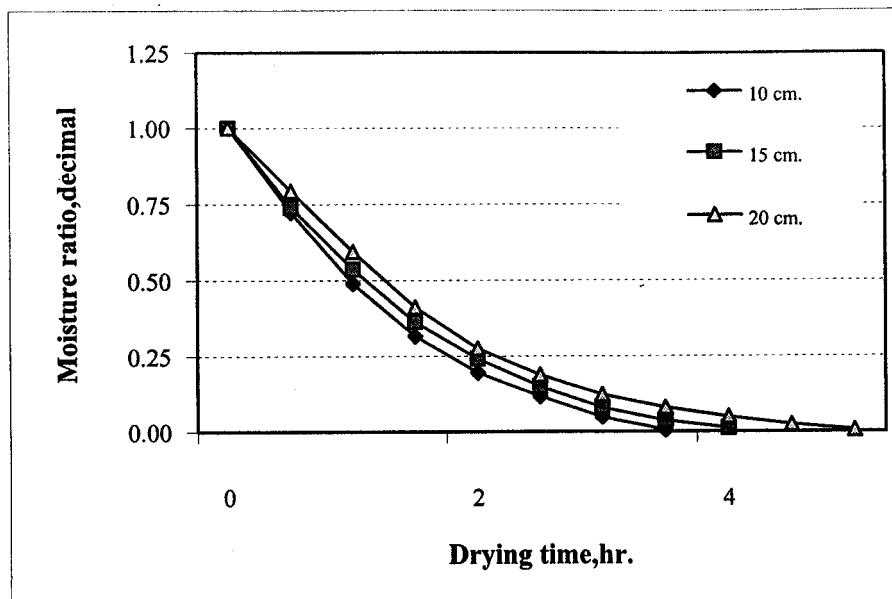
รังสีมาก



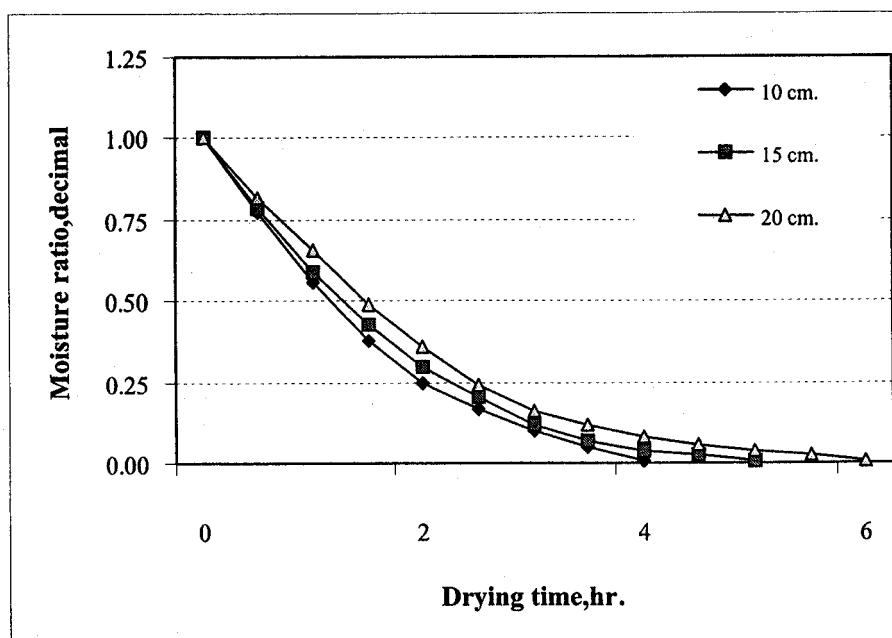
ภาพที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 640 W
ความเร็วลม 0.3 m/s

และเมื่อเพิ่มความเร็วลมจาก 0.3 m/s เป็น 0.5 m/s อัตราการอบแห้งที่ระยะห่าง 10 cm ก็ยังมีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด หากพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25 เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ จะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างแท่งอินฟราเรดกับพริก 10 cm จะมีอัตราส่วนความชื้นต่อเวลาลดลงมากที่สุด ดังภาพที่ 4.58

ถ้าป้อนพลังงานเท่ากับ 640 W หากสังเกตจากอัตราการอบแห้ง โดยพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25 เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ จะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างแท่งอินฟราเรดกับพริก 10 cm จะมีอัตราส่วนความชื้นต่อเวลาลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับที่ระยะห่าง 15 cm พบว่าจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า 5 เบอร์เซ็นต์ และเมื่อเทียบกับที่ระยะห่าง 20 cm ใช้เวลาอย่างกว่า 10 เบอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 4.59



ภาพที่ 4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 640 W
ความเร็วลม 0.5 m/s



ภาพที่ 4.59 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 640 W
ความเร็วลม 1.0 m/s

4.6.4 การเปลี่ยนแปลงสี

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ โดยทดสอบการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ที่อัตราส่วนความชื้นประมาณ 0.25

กำลังวัตต์ (W)/ความเร็วลม (m/s)	การเปลี่ยนแปลงสี (ΔE)
260/0.3	26.0667b \pm 0.2868
260/0.5	23.7667a \pm 0.5171
260/1.0	23.2333a \pm 0.6252
370/0.3	30.1000d \pm 0.2484
370/0.5	28.1333c \pm 0.2868
370/1.0	26.2333b \pm 0.5171
470/0.3	33.4167e \pm 0.1897
470/0.5	30.0833d \pm 0.3586
470/1.0	26.5667b \pm 0.1897
640/0.3	34.7000f \pm 0.6572
640/0.5	30.6500d \pm 0.7555
640/1.0	28.6000c \pm 0.1242

หมายเหตุ อักระหว่างกันภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p < 0.05$

จากตารางที่ 4.7 สังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีได้ดังนี้

4.6.4.1 เปรียบเทียบด้านพลังงาน พบร่วมกันว่าการเปลี่ยนแปลงของสีจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง

4.6.4.2 เปรียบเทียบความเร็วลม พบร่วมกันว่าการเปลี่ยนแปลงของสีจะลดลง เมื่อเพิ่มความเร็วลม

จากตารางที่ 4.8 สังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีได้ดังนี้

4.6.4.3 หากเปรียบเทียบด้านอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงของสีจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้ง

4.6.4.4 เปรียบเทียบด้านความเร็วลม พบร่วมกันว่าการเปลี่ยนแปลงสีจะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วลม

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ โดยทดสอบการอบแห้งด้วยลมร้อน ที่อัตราส่วนความชื้นประมาณ 0.25 พนว่า

อุณหภูมิ($^{\circ}$ C)/ความเร็วลม (m/s)	การเปลี่ยนแปลงสี (ΔE)
55/0.5	24.5367b \pm 0.1368
55/1.0	21.5500a \pm 0.1242
55/1.5	21.4500a \pm 0.1242
60/0.5	25.9667c \pm 0.3795
60/1.0	24.0667b \pm 0.6252
60/1.5	21.7000a \pm 0.6572
65/0.5	30.1667d \pm 0.3795
65/1.0	26.1667c \pm 0.2868
65/1.5	24.0333b \pm 0.1434

หมายเหตุ อักษรระบุเมื่อนักน้ำภายในกลุ่มนี้เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p < 0.05$

4.7 การเปรียบเทียบการใช้พลังงาน ในการอบแห้งพริกด้วยลมร้อน และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

ในงานวิจัยนี้ ได้ทดลองและวิเคราะห์การอบแห้งพริกด้วยลมร้อน และการผึ่งลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ซึ่งผลจากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

4.7.1 การอบแห้งพริกด้วยลมร้อน

การศึกษาในส่วนนี้ ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งและความเร็วลม ที่มีต่อพฤติกรรมการอบแห้งพริก รวมทั้งความสัม�ลีองพลังงานจำเพาะ ซึ่งมีรายละเอียดของผลการศึกษาดังนี้

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการศึกษาถึงความสัมปลีองพลังงานจำเพาะกับอุณหภูมิอบแห้ง กรณีอบแห้งด้วยลมร้อน จะมีการใช้พลังงาน 2 ส่วน คือ พลังงานที่จ่ายให้พัดลมและพลังงานที่จ่ายให้คลื่นความร้อน ผลจากการศึกษาสรุปได้ดังนี้

4.7.1.1 พิจารณาที่ความเร็วลมคงที่

จากการศึกษาพบว่า ความสัมปลีองพลังงานจำเพาะจะลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะสั้น

4.7.1.2 พิจารณาที่อุณหภูมิคงที่

จากการศึกษาพบว่า ความสัมประสิทธิ์ของพลาสติกด้วยลมร้อน ความเร็วลมจะมีผลต่อการนำพาความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ ทำให้สามารถลดระยะเวลาการอบแห้ง

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองการอบแห้งพريกด้วยลมร้อนเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25

Drying temperature (°C)	Velocity (m/s)	Drying time (hr)	Drying rate (kg/hr)	Specific energy consumption (MJ/kg-H ₂ O evap)
55	0.5	19.0	0.009	384
	1.0	11.5	0.015	463
60	0.5	15.5	0.011	346
	1.0	7.2	0.024	431
65	0.5	12.0	0.014	309
	1.0	5.4	0.031	403

4.7.2 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

การศึกษาในส่วนการอบแห้งพريกด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ได้ศึกษาถึงผลของการอบแห้งไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแห้งอินฟราเรด และความเร็วลมที่มีผลต่อพฤติกรรมการอบแห้ง และความสัมประสิทธิ์ของพลาสติกด้วยลมร้อน

ตารางที่ 4.10 แสดงผลลัพธ์ที่ใช้ในการอบแห้งโดยใช้ขดลวดความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดซึ่งประกอบด้วยพลาสติก 3 ส่วน คือ พลาสติกที่จ่ายไฟฟ้า ขดลวดความร้อน และแห้งอินฟราเรด จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า

4.7.2.1 พิจารณาที่ความเร็วลมคงที่

จากการศึกษาพบว่า ความสัมประสิทธิ์ของพลาสติกด้วยลมร้อน ความเร็วลมจะมีผลต่อการลดเวลาการอบแห้งมากกว่าเพิ่มเปอร์เซ็นต์การเพิ่มชั้นของพลาสติกที่ใช้

4.7.2.2 พิจารณาที่กำลังไฟฟ้าของแพ็คเกจอินฟราเรดคงที่

จากการศึกษาพบว่า ความสูงเปลี่ยนแปลงงานจำเพาะจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลม ทั้งนี้เกิดจากอากาศจะเป็นตัวกลางที่ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์ลดลง ทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ กรณีที่ใช้ความเร็วลมสูงต่ำกว่ากรณีที่ใช้ความเร็วลมต่ำซึ่งส่งผลให้ระยะเวลาการอบแห้งนานขึ้น

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองการอบแห้งพริกด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้น เท่ากับ 0.25

Infrared power (W)	Velocity (m/s)	Drying time (hr)	Drying rate (kg/hr)	Specific energy consumption (MJ/kg-H ₂ O evap)
260	0.3	4.0	0.043	48
	0.5	4.3	0.040	68
	1.0	5.0	0.035	98
370	0.3	3.3	0.052	52
	0.5	3.8	0.045	68
	1.0	4.3	0.040	82
470	0.3	1.9	0.091	49
	0.5	2.4	0.072	64
	1.0	2.9	0.060	76
640	0.3	1.4	0.124	46
	0.5	1.9	0.091	58
	1.0	2.3	0.075	72

4.7.3 การเปรียบเทียบการใช้พลังงาน

จากการทดลองการอบแห้งพริกด้วยลมร้อนพบว่า ที่อุณหภูมิ 65 °C ความเร็วลม เป็น 0.5 m/s มีความสูงเปลี่ยนแปลงงานจำเพาะน้อยที่สุดเป็น 309 MJ/kg water evap. โดยเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ 60 และ 55 °C จะใช้พลังงานเพิ่มขึ้น 13 และ 24 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดจะพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวจะมีความสูงเปลี่ยนแปลงงานมากกว่า และหากเปรียบเทียบค่าความสูงเปลี่ยนแปลงงานที่ความเร็วลม 0.5

m/s จากตารางที่ 4.9 และ 4.10 พบว่า หากใช้ลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดจะช่วยให้ลดระยะเวลาในการอบแห้งลง 70-80 เปอร์เซ็นต์ และลดความถี่เปลี่ยนพลังงาน 60 – 80 เปอร์เซ็นต์

4.8 สมการของศาสตร์การอบแห้ง

4.8.1 การอบแห้งพริกด้วยลมร้อน

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองการอบแห้งพริกด้วยลมร้อน เพื่อหาสมการการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมที่สุด สำหรับอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

จากการทดลองหาอัตราการอบแห้งชั้นบางของพริก โดยทำการศึกษาที่ความเร็วลม 0.5 – 1.5 m/s อุณหภูมิของห้องอบอยู่ระหว่าง 55 – 65 °C ได้ทำการเปรียบเทียบสมการทางคณิตศาสตร์ตามสมการการอบแห้งชั้นบางที่สรุปไว้ในตารางที่ 4.11 และผลการวิเคราะห์ค่าคงที่ต่างๆ นำค่าคงที่ที่ได้ไปพิจารณาในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วลมซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$a, b, c, k_0 \text{ และ } k_1 = x_0 + x_1 T + x_2 V + x_3 TV \quad (4.3)$$

เมื่อ a, b, c, k_0 และ k_1 คือ ค่าคงที่ของสมการการอบแห้ง, T คือ อุณหภูมิในการอบแห้ง, V คือ ค่าความเร็วลม, x_i คือ ค่าคงที่ของสมการ (4.3)

จากตารางที่ 4.11 แสดงค่าคงที่ของสมการการอบแห้งชั้นบาง, R^2 และ RMSE โดยสมการการอบแห้งชั้นบางทั้ง 8 สมการซึ่ง พบว่าสมการ Diffusion approach สามารถทำนายผลการอบแห้งพริกด้วยลมร้อนได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 มากที่สุด (0.9979) และค่า RMSE น้อยที่สุด (0.0187) นอกจากนี้หากจัดเรียงความสามารถในการทำนายผลการอบแห้งจากมากไปหาน้อยจะได้ดังนี้ Diffusion approach Logarithmic Page Modified Page Two-term exponential Henderson and Pabis Wang and Singh และ Newton ตามลำดับ

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าคงที่สมการอุณห์ชั้นบางของพริกตัวยกลงร้อน

Model	Parameter	x_0	x_1	x_2	x_3	R^2	RMSE
Newton	k	0.0024	0	-0.0108	0.0002	0.9860	0.0500
Page	k	-0.0009	0	0.0010	0	0.9965	0.0256
	n	1.314	-0.0064	-0.8679	0.0216		
Modified Page	k	0.0020	0	-0.0097	0.0002	0.9951	0.0303
	n	1.8317	-0.0094	-0.1066	0.0023		
Henderson and Pabis	k	0.0031	0	-0.0118	0.0002	0.9889	0.0448
	a	1.3603	-0.0055	-0.2652	0.0049		
Logarithmic	k	0.0035	0	-0.0098	0.0002	0.9974	0.0217
	a	1.9088	-0.0053	0.1990	-0.0078		
	c	-0.5368	-0.0009	-0.4284	0.0119		
Wang and Singh	a	0.0017	0	0.0033	0	0.9874	0.0482
	b	0	0	0	0		
Two-term exponential	k_0	0.0059	-0.0001	-0.0013	0	0.9942	0.0329
	k_1	-0.0061	0.0001	0.0019	-0.0001		
	a	-211.377	3.8742	44.0577	-1.1017		
	b	213.3332	-3.8894	-45.2166	1.1207		
Diffusion approach	k	0.0269	-0.0005	-0.0552	0.0011	0.9979	0.0187
	a	4.8126	-0.1064	-4.5054	0.0867		
	b	-1.2303	0.0034	1.5991	-0.0316		

4.8.2 การออมแห่งพريกตัวยลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองการออมแห่งพريกตัวยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด เพื่อหาสมการ การออมแห่งชั้นบางที่เหมาะสมที่สุด สำหรับอธิบายพฤติกรรมการออมแห่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าคงที่สมการออมแห่งชั้นบางของพريกตัวยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

Model	Parameter	x_0	x_1	x_2	x_3	R^2	RMSE
Newton	k	-0.0010	0	0.0017	0	0.9828	0.0377
Page	k	0.0004	0	0.0002	0	0.9940	0.0223
	n	1.2016	0.0005	-0.0165	-0.0001		
Modified Page	k	-0.0008	0	0.0017	0	0.9935	0.0233
	n	1.5186	-0.0004	-0.0720	0.0001		
Henderson and Pabis	k	-0.0003	0	0.0016	0	0.9858	0.0342
	a	1.1427	-0.0002	-0.0066	0		
Logarithmic	k	0.0007	0	0.0008	0	0.9927	0.0246
	a	1.2858	-0.0002	-0.0451	0		
	c	-0.1655	0	0.0434	0		
Wang and Singh	a	-0.0002	0	-0.0006	0	0.9927	0.0246
	b	0	0	0	0		
Two-term exponential	k_0	-0.0116	0	0.0115	0	0.9934	0.0234
	k_1	0.0122	0	-0.0119	0		
	a	22.8730	-0.0445	-15.3538	0.0524		
	b	-21.8763	0.0446	15.4324	-0.0526		
Diffusion approach	k	0.0052	0	0.0020	0	0.9952	0.0200
	a	-3.2598	0.0069	3.2014	-0.0265		
	b	0.5971	0.0004	0.2173	-0.0002		

จากการทดลองหาอัตราการอบแห้งชั้นบางของพริก โดยทำการศึกษาที่ความเร็วลม 0.1– 1.0 m/s กำลังงาน 260 – 640 W ได้ทำการเปรียบเทียบสมการทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณาถึงอิทธิพลของกำลังไฟฟ้าและความเร็วลมซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$a, b, c, k_0 \text{ และ } k_1 = x_0 + x_1 P + x_2 V + x_3 PV \quad (4.4)$$

เมื่อ a, b, c, k_0 และ k_1 คือ ค่าคงที่ของสมการการอบแห้ง, P คือ ค่ากำลังไฟฟ้า, V คือ ค่าความเร็วลม, x_i คือ ค่าคงที่ของสมการ (4.4)

จากตารางที่ 4.12 แสดงค่าคงที่ของสมการการอบแห้งชั้นบาง R^2 และ RMSE โดยสมการการอบแห้งชั้นบางทั้ง 8 สมการซึ่งพบว่าสมการ Diffusion approach สามารถทำนายผลการอบแห้งพริกด้วยลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด ได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 มากที่สุด(0.9952) และค่า RMSE น้อยที่สุด (0.0200) นอกจากนี้หากจัดเรียงความสามารถในการทำงานของผลการอบแห้งจากมากไปหาน้อยจะได้ดังนี้ Diffusion approach Page Modified Page Two-term exponential Logarithmic Wang and Singh Henderson and Pabis และ Newton ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

ผลจากการศึกษาการอบรมแห่งด้วยลมร้อน รังสีอินฟราเรด และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด จึงนำมาสรุปผลของงานวิจัยได้ดังนี้

5.1 การอบรมแห่งด้วยลมร้อน

จากการศึกษาพบว่าความเร็วลมส่างผลต่อการอบรมแห่งด้วยลมร้อน โดยที่ความเร็วลมสูง อัตราส่วนความชื้นจะลดลงเร็วกว่ากรณีที่ใช้ความเร็วลมต่ำ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า กรณีที่ใช้ความเร็วลมสูง ปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับผลิตภัณฑ์ (พริก,เนื้อวัว) จะมีปริมาณมาก ซึ่งจะสอดคล้องกับลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ ส่างผลให้การนำความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์เร็วขึ้น เนื่องด้วยกันในกรณีที่ใช้อุณหภูมิสูง อัตราส่วนความชื้นจะลดลงเร็วกว่ากรณีที่ใช้อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิของลมร้อนสูงปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับผลิตภัณฑ์ ก็มีปริมาณมาก พิจารณาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ โดยจะส่งผลให้การนำความชื้นออก จากผลิตภัณฑ์สูงตาม ดังนี้จากเหตุผลที่กล่าวมาผลิตภัณฑ์จึงสามารถลดความชื้นได้เร็วขึ้น เมื่อเพิ่ม อุณหภูมิให้สูงขึ้น ในกรณีที่ความหนาของเนื้อวัวน้อยอัตราส่วนความชื้นจะลดลงเร็วกว่า กรณีที่ใช้ความหนาของเนื้อวัวมาก เป็นเพราะกรณีที่ใช้ความหนาน้อย ปริมาณพลังงานความร้อนนีการ แลกเปลี่ยนกับผลิตภัณฑ์ได้ง่าย นอกจากนี้ระบบทางการเคลื่อนที่ของน้ำที่ระเหยก็สันด้วยสังเกต จากลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ ส่างผลให้อัตราการส่วนความชื้นลดลงเร็วขึ้น

ด้านคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์การอบรมแห่งด้วยลมร้อนสังเกตการเปลี่ยนแปลง ของสี และการหลดตัวของพริก และเนื้อวัวพบว่าเปอร์เซ็นต์การหลดตัว และการเปลี่ยนแปลงสีจะ เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบรมแห่ง และเมื่อเพิ่มความเร็วลมจะทำให้เปอร์เซ็นต์การหลดตัว และ การเปลี่ยนแปลงสีลดลง นอกจากนี้ด้านความหนา พบร้าหากเนื้อวัวมีความหนานามากขึ้นจะให้ค่า เปอร์เซ็นต์การหลดตัวน้อยลง แต่จะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีมากกว่าที่ความหนาน้อย

ผลการศึกษาถึงความสัมมูลกับอุณหภูมิของลม กรณีอบรมแห่งด้วยลมร้อน จะมีการใช้พลังงาน 2 ส่วน คือ พลังงานที่จ่ายให้พัดลมและพลังงานที่จ่ายให้คลุมความร้อน พบร้าหากความเร็วลมคงที่ความสัมมูลกับอุณหภูมิของลม แต่จะลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของลม ทั้งนี้ เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอบรมแห่งจะสั้น และถ้าอุณหภูมิคงที่ ความสัมมูลกับอุณหภูมิของลมจะลดลง

เมื่อเพิ่มความเร็วลม ทั้งนี้ เพราะความเร็วลมจะมีผลต่อการนำพาความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ ทำให้สามารถลดระยะเวลาการอบแห้ง

จากการศึกษาที่ความเร็วลม $0.5 - 1.5 \text{ m/s}$ อุณหภูมิของห้องอบอยู่ระหว่าง $50 - 60^\circ\text{C}$ ได้ทำการเปรียบเทียบสมการทางคณิตศาสตร์ ตามสมการอบแห้งชั้นบาง และผลการวิเคราะห์ค่าคงที่ต่าง ๆ นำค่าคงที่ที่ได้ไปพิจารณาในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณาถึงอิทธิพลของกำลังไฟฟ้าและความเร็วลม โดยสมการอบแห้งชั้นบางทั้ง 8 สมการ ซึ่งพบว่าสมการ Two-term exponential และ Diffusion approach สามารถคำนวณ ผลการอบแห้งของเนื้อและพริกตามลำดับด้วยล้มร้อนได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 มากที่สุด และค่า RMSE น้อยที่สุด

5.2 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

จากการศึกษาพบว่าท่ออัตราการไหลดของอากาศต่ำ จะมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าท่ออัตราการไหลดของอากาศสูง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าอัตราการไหลดของอากาศที่สูงส่งผลทำให้อุณหภูมิที่ผิวและภายในผลิตภัณฑ์ลดลงจึงส่งผลให้ยั่งยืนในการอบแห้งลดลงด้วย เนื่องจากความเร็วลมทำให้อุณหภูมิกายในผลิตภัณฑ์ลดลง เพราะอากาศจะนำพาเอาความร้อนจากบริเวณผิวของ ผลิตภัณฑ์ออกไปเร็วขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิกายในผลิตภัณฑ์ลดลง หากกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแท่นอบแห้งอินฟราเรดสูง จะมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าที่กำลังไฟฟ้าต่ำ โดยพลังงานที่ให้กับแท่นอบแห้งอินฟราเรดสูงส่งผลทำให้ความเข้มของรังสีเพิ่มขึ้นพลังงานที่ส่งให้กับผลิตภัณฑ์มากขึ้นด้วยทำให้อุณหภูมิกายในผลิตภัณฑ์สูง กรณีที่ใช้ความหนานน้อย ปริมาณพลังงานความร้อนมีการแตกเปลี่ยนกับผลิตภัณฑ์ได้ง่าย และระยะเวลาการเคลื่อนที่ของน้ำ汽ทึบ ซึ่งจะสอดคล้องกับลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำ汽ในผลิตภัณฑ์สูงตาม จากเหตุผลที่กล่าวมา ผลิตภัณฑ์จึงสามารถลดความชื้นได้เร็วขึ้นเมื่อความหนาลดลงระยะห่างของแท่นอบแห้งอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ส่งผลต่อความเข้มของรังสี ที่ระยะห่างน้อยจะทำให้อุณหภูมิกายในผลิตภัณฑ์สูงขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าที่ระยะห่างมาก

ด้านคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ โดยทดสอบการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด สังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีและการหดตัว พนวณเปอร์เซ็นต์การหดตัวและการเปลี่ยนแปลงของสีจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง แต่เปอร์เซ็นต์การหดตัวและการเปลี่ยนแปลงของสีจะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วลมออกจากน้ำหากความหนานมากขึ้นจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวน้อย แต่จะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีมากกว่าที่ความหนานน้อย

ผลการศึกษาความสัมมูลภาพของผลิตภัณฑ์ โดยทดสอบการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดซึ่งประกอบด้วยพลังงาน 3 ส่วน คือ พลังงานที่จ่ายให้พัดลม ขนาดความร้อน

และแท่งอินฟราเรด พบว่าที่ความเร็วลมคงที่ ความสัมมไปลีองพลังงานจำเพาะจะลดลง เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแท่งอินฟราเรด ทั้งนี้เนื่องจาก การเพิ่มพลังงานจะทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งเร็วขึ้น ส่งผลให้ความสัมมไปลีองพลังงานจำเพาะลดลงด้วย และที่กำลังไฟฟ้าของแท่งอินฟราเรดคงที่ ความสัมมไปลีองพลังงานจำเพาะจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลม ทั้งนี้เกิดจากอาการจะเป็นตัวกลางที่ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์ลดลง ทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์กรณีที่ใช้ความเร็วลมสูงต่ำกว่ากรณีที่ใช้ความเร็วลมต่ำ ซึ่งส่งผลให้ระยะเวลาการอบแห้งนานขึ้น

การอบแห้งผลิตภัณฑ์ด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด จากการทดลองหาอัตราการอบแห้งขึ้นของผลิตภัณฑ์ โดยได้ทำการศึกษาที่ความเร็วลม $0.1 - 1.0 \text{ m/s}$ กำลังงาน $260 - 640 \text{ W}$ ได้ทำการเปรียบเทียบสมการทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณาถึงอิทธิพลของกำลังไฟฟ้าและความเร็วลม แสดงค่าคงที่ของสมการการอบแห้งขึ้นของ R^2 และ RMSE โดยสมการการอบแห้งขึ้นของทั้ง 8 สมการซึ่งพบว่าสมการ Two-term exponential และ Diffusion approach สามารถทำนายผลการอบแห้งของเนื้อ แล้วพริก ตามลำดับได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 มากที่สุดและค่า RMSE น้อยที่สุด

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดเพื่อนำไปลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ ซึ่งการจะนำไปประยุกต์ใช้งานควรคำนึงถึงสิ่งเหล่านี้

5.3.1 ควรมีการเลือกผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นมาทำการทดลองอบแห้ง ด้วยวิธีลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด เพื่อเป็นแนวทางเลือกในการนำไปใช้งานจริงได้เหมาะสม

5.3.2 ควรทดลองการอบแห้งในเงื่อนไขต่าง ๆ เพิ่มขึ้น เช่น การอบแห้งเนื้อติดไขมัน ว่ามีผลอย่างไรต่อการอบแห้ง ทดลองความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ เพื่อเปรียบเทียบที่ความชื้นเริ่มต้นต่าง ๆ กัน และทดลองควบคุมการกำหนดจังหวะการปิดและเปิดการทำงานของแท่งรังสีอินฟราเรดอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการอบแห้ง

5.3.3 ควรทดลองวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์เพิ่มเติม เช่น วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพไขมัน โปรตีน และค้านอีน ๆ

เอกสารอ้างอิง

ເອກສາຣອ້າງອີງ

- Abe, T. and Afzal, T.M. "Thin-layer infrared radiation drying of rough rice", Journal of Agricultural Engineering Research. 67: 289-297; 1997.
- Afzal, T.M. and Abe, T. "Diffusion in potato during far infrared radiation drying", Journal of Food Engineering. 37: 353-365; 1998.
- Afzal, T.M., Abe, T. and Hikida, Y. "Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley", Journal of Food Engineering. 42: 177-182; 1999.
- Ebru Kavak Akpinar, Yasar Bicer and Cengiz Yildiz. "Thin layer drying of red pepper", Journal of Food Engineering. 59: 99-104; 2002.
- Glouannec, P., Lecharpentier, D. and Noel, H. "Experimental survey on the combination of radiating infrared and microwave sources for the drying of porous material", Applied Thermal Engineering. 22: 1689-1703; 2002.
- Hebber, H.U. and Rastogi, N.K. "Mass transfer during infrared drying of cashew kernel", Journal of Food Engineering. 47: 1-5; 2001.
- Hebber, H.U., Vishwanathan, K.H. and Ramesh, M.N. "Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables", Journal of Food Engineering. 65: 557-563; 2004.
- Ibrahim Doymaz, "Air-drying characteristics of tomatoes", Journal of Food Engineering. 78: 1291 – 1297; 2007.
- Ibrahim Doymaz, "The Kinetics of Forced Convective Air-drying of Pumpkin Slices", Journal of Food Engineering. 79: 243-248; 2007.
- Krokida, M.K., Karathanos, V.T., Maroulis, Z.B. and Marinos-Kouris, D. "Drying kinetics of some vegetables", Journal of Food Engineering. 59: 391-403; 2003.
- Mongpraneet, S., Abe, T. and Tsurusaki, T. "Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions", Journal of Food Engineering. 55: 147-156; 2002.
- Sakai, N. and Hanzawa, T. "Applications and advances in far-infrared heating in Japan", Trends in Food Science & Technology. 5: 357-362; 1994.
- Sandu, C. "Infrared Radiative Drying in Food Engineering: A Process Analysis", Biotechnology Progress. Vol.2, No.3: 109-119; 1986.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

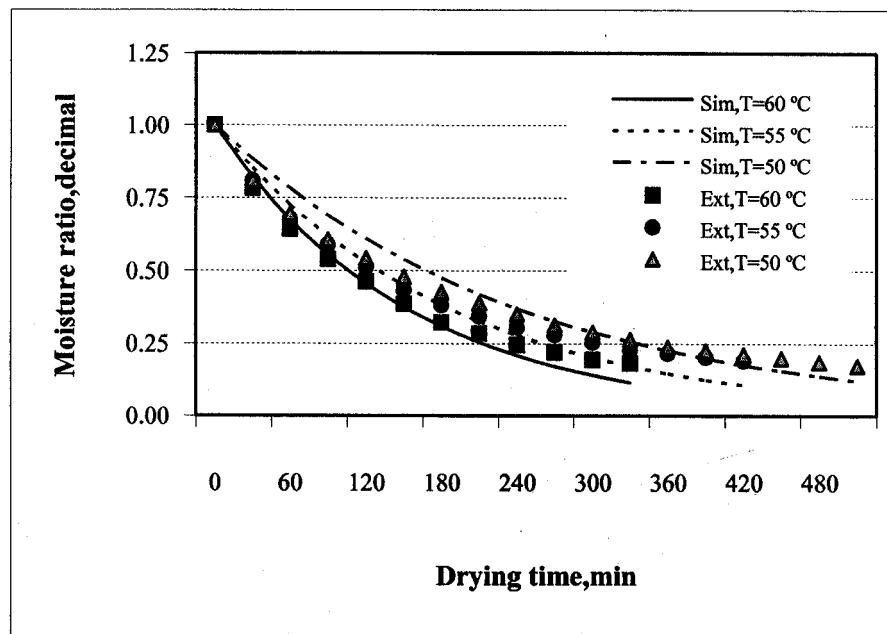
Sheridan, P. and Shilton, N. "Application of for infra-red radiation to cooking of meat products", Journal of Food Engineering. 41: 203-208; 1999.

ภาคผนวก

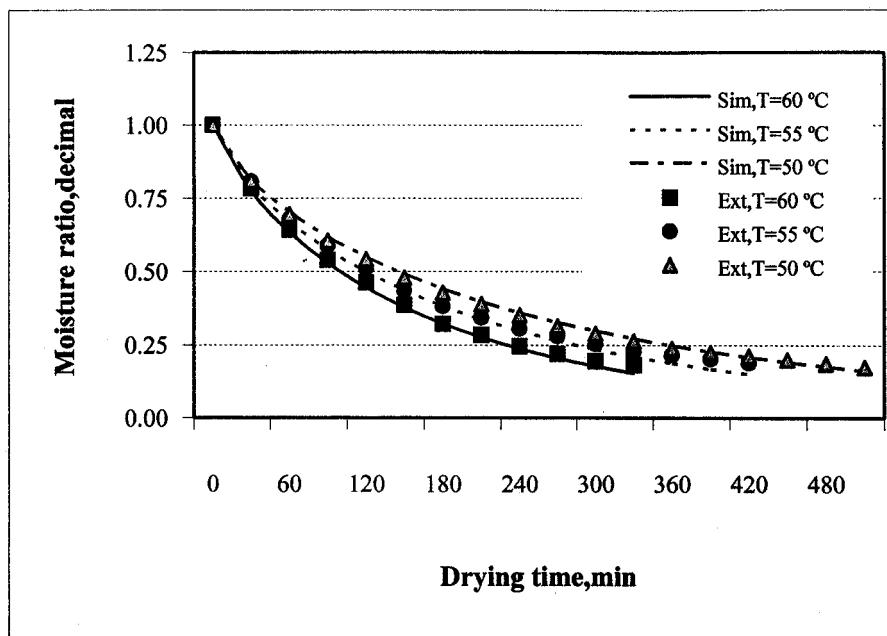
ภาคผนวก ก
ภาพสมการการออบแห้งชั้นบาง

1. การอบแห้งเนื้อด้วยลมร้อน

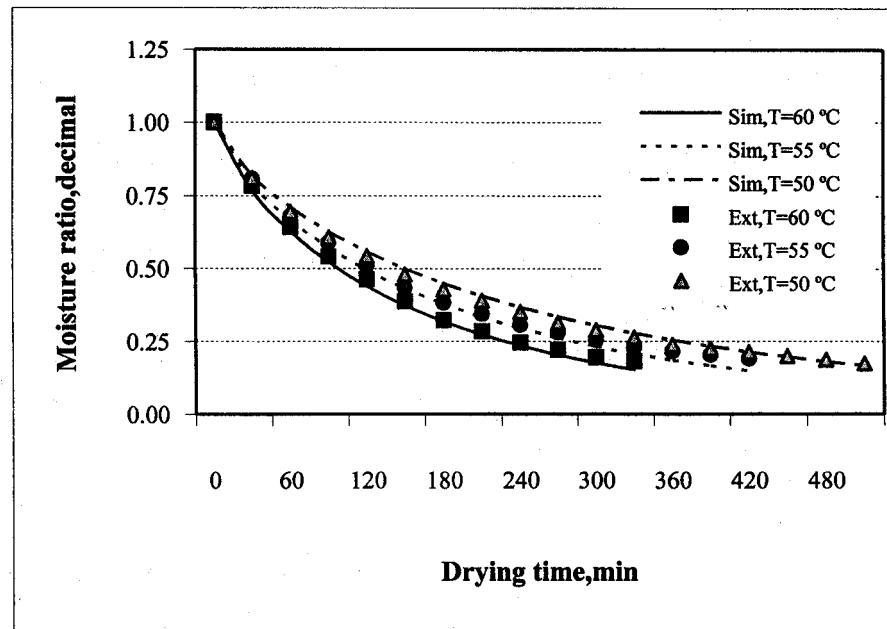
ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง การอบแห้งเนื้อด้วยลมร้อนเพื่อหาสมการอบแห้งขั้นบันงที่เหมาะสมที่สุด สำหรับอธิบายพฤติกรรมการอบแห้ง แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งเนื้อที่กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง และทำนายผลตามรูปแบบสมการต่าง ๆ สามารถสรุปผลได้ดังนี้



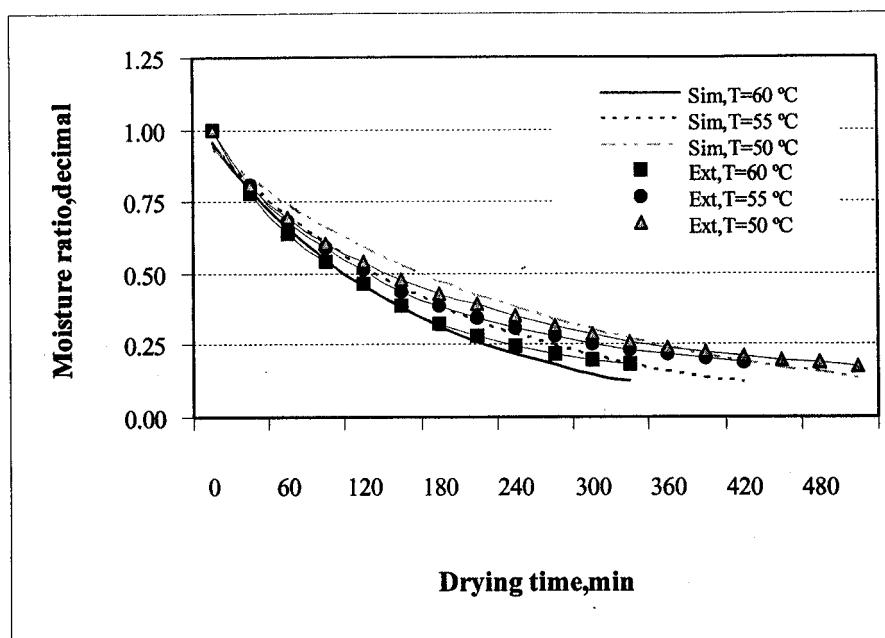
ภาพที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Newton ที่ความเร็วลม 1.0 m/s



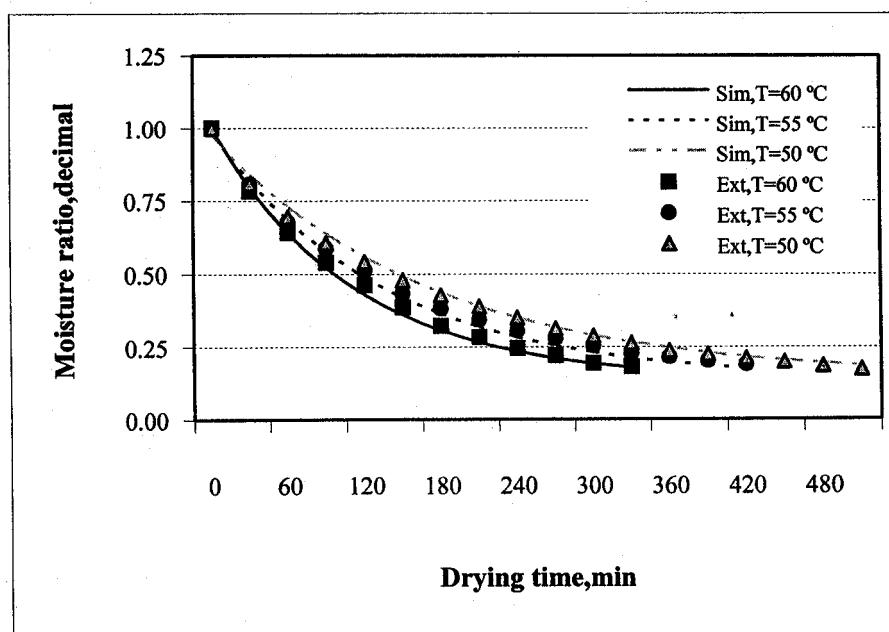
ภาพที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Page ที่ความเร็วลม 1.0 m/s



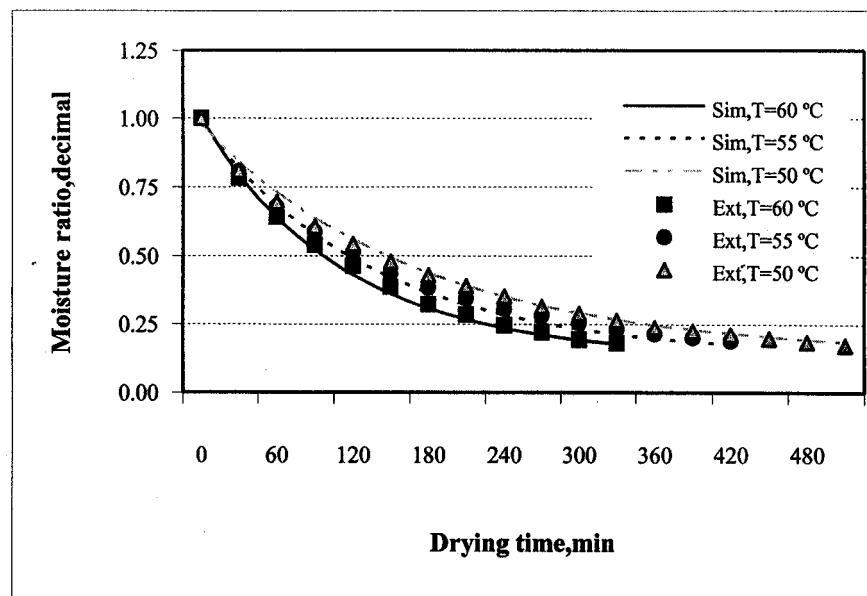
ภาพที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Modified Page ที่ความเร็วลม 1.0 m/s



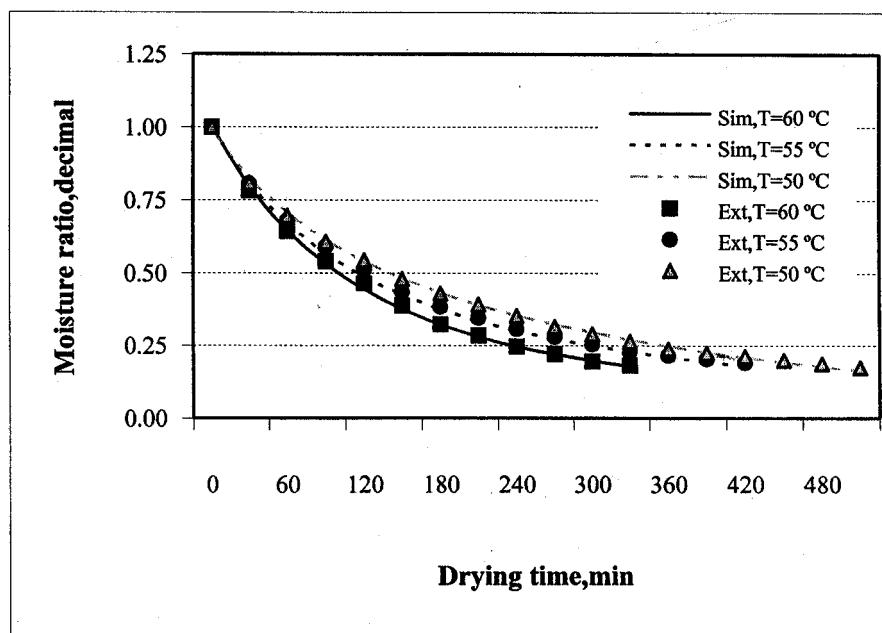
ภาพที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Henderson and Pabis ที่ความเร็วลม 1.0 m/s



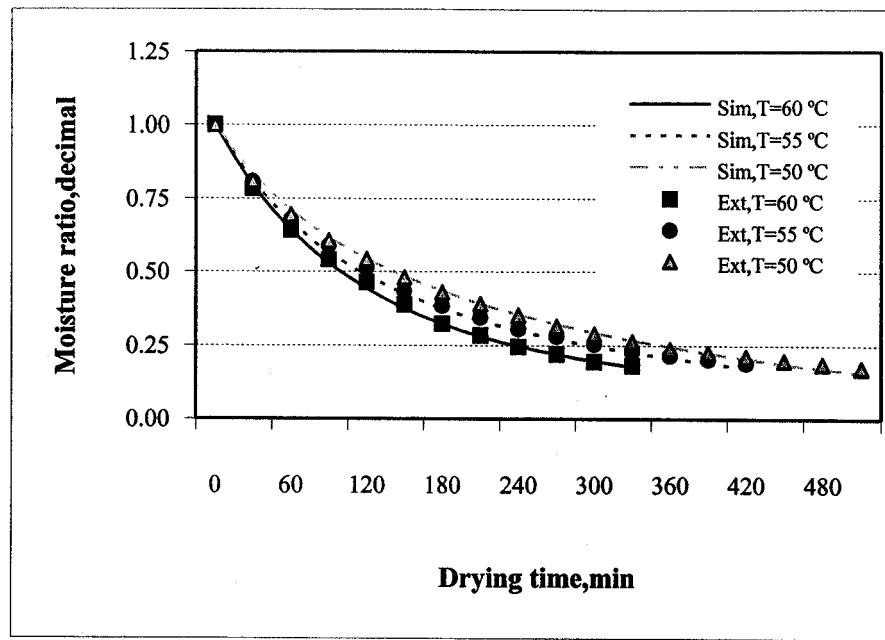
ภาพที่ ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Logarithmic ที่ความเร็วลม 1.0 m/s



ภาพที่ ก.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณตามรูปแบบของสมการ Wang and Singh ที่ความเร็วลม 1.0 m/s



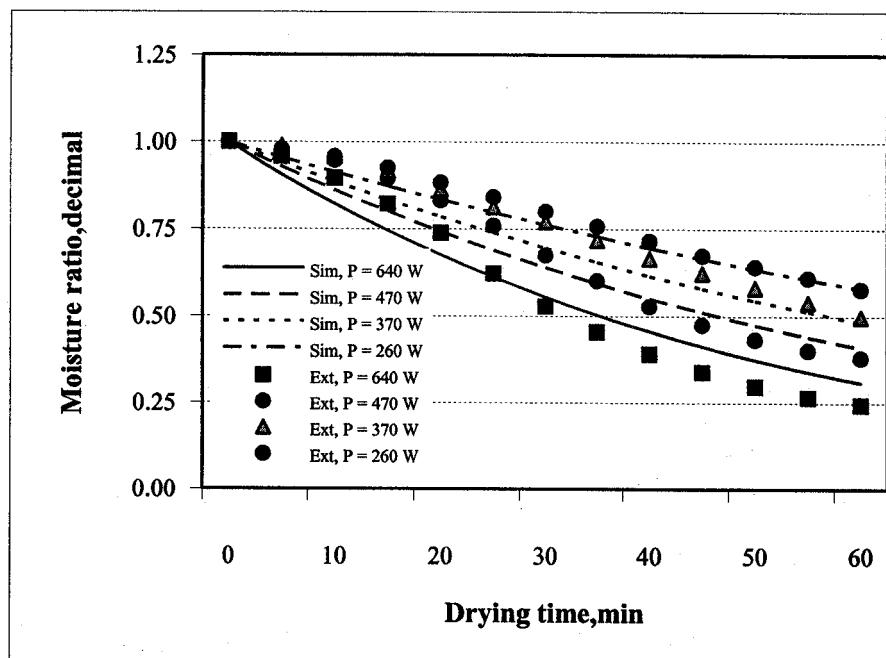
ภาพที่ ก.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณตามรูปแบบของสมการ Two-term ที่ความเร็วลม 1.0 m/s



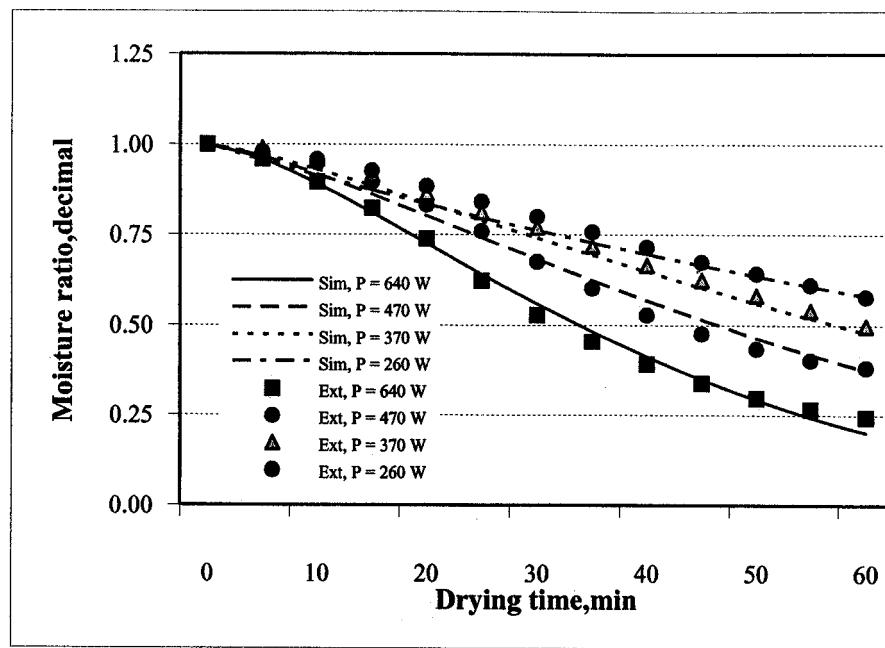
ภาพที่ ก.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Diffusion approach ที่ความเร็วลม 1.0 m/s

2. การอบแห้งเนื้อคั่วylmร้อนร่วมกับอินฟราเรด

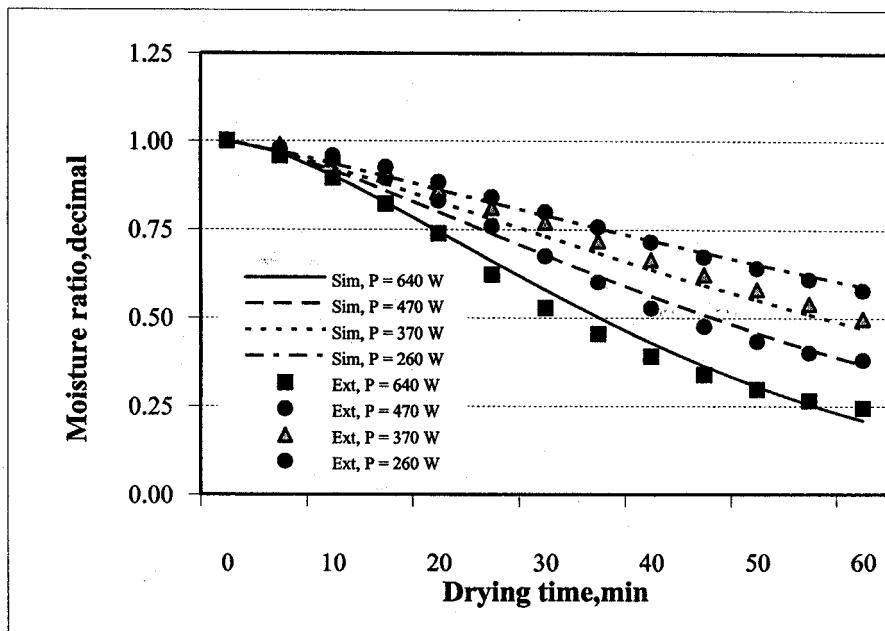
การอบแห้งเนื้อคั่วylmร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด เพื่อความสามารถแห้งชั้นบางที่เหมาะสมที่สุด สำหรับอัตราพุ่ติกรรมการอบแห้ง และความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้น กับเวลาในการอบแห้งเนื้อที่กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง และทำนายผลตามรูปแบบ สมการต่าง ๆ สามารถสรุปผลได้ดังนี้



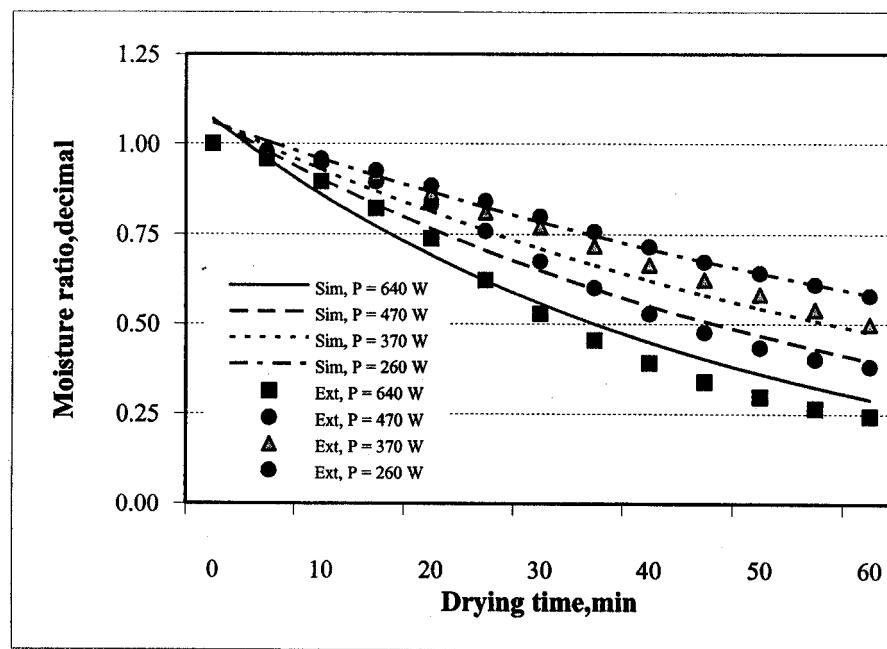
ภาพที่ ก.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Newton ที่ความเร็วลม 0.3 m/s



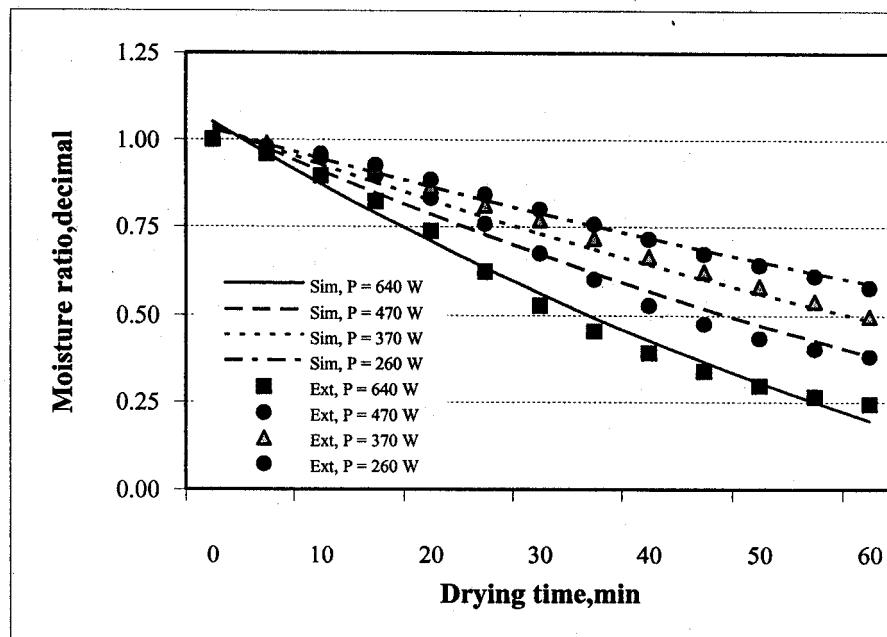
ภาพที่ ก.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Page ที่ความเร็วลม 0.3 m/s



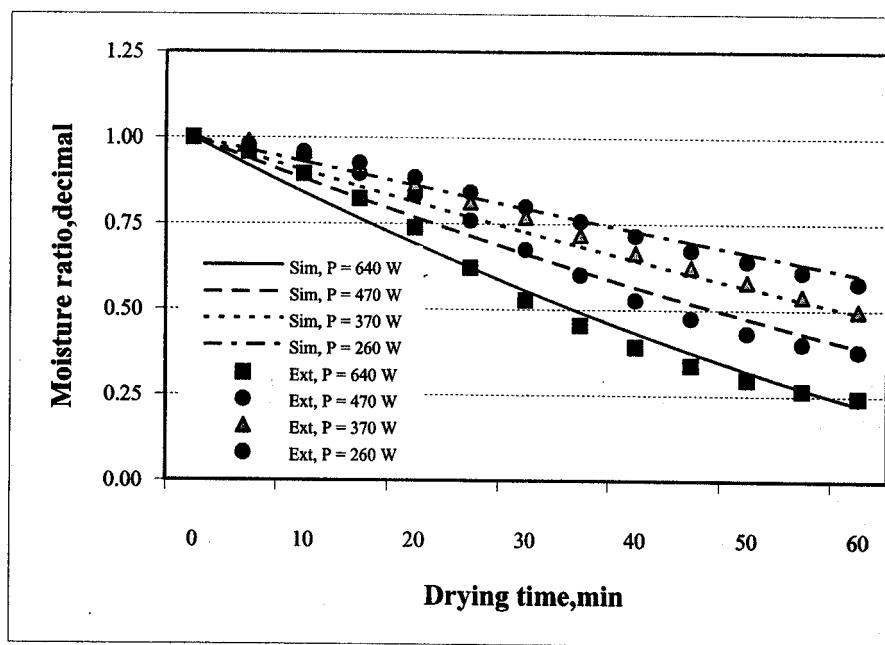
ภาพที่ ก.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Modified Page ที่ความเร็วลม 0.3 m/s



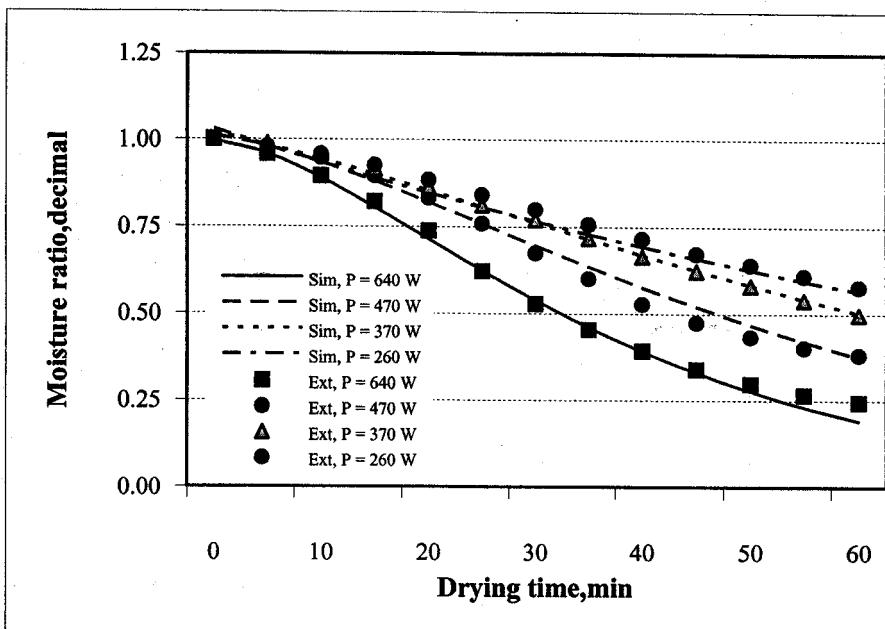
ภาพที่ ก.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Henderson and Pabis ที่ความเร็วลม 0.3 m/s



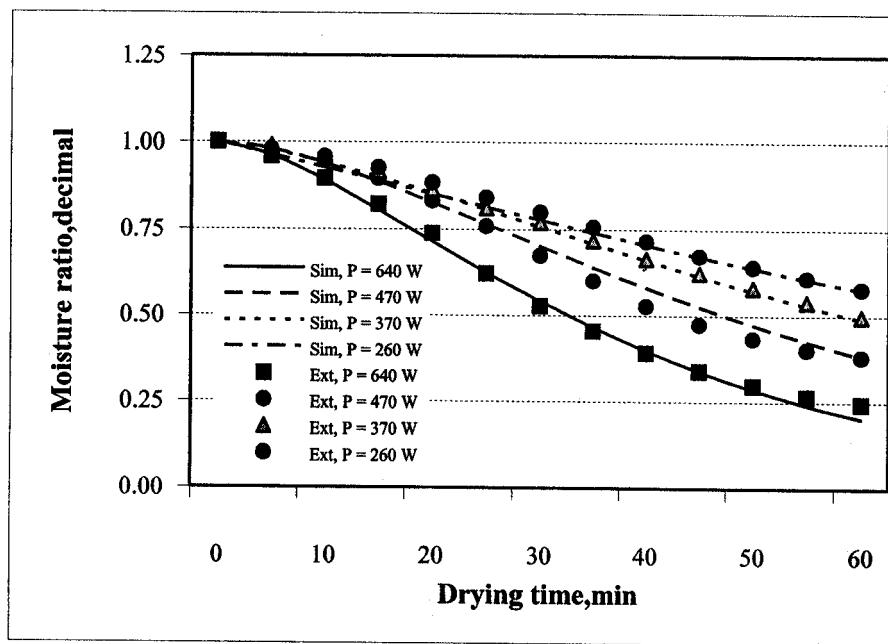
ภาพที่ ก.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Logarithmic ที่ความเร็วลม 0.3 m/s



ภาพที่ ก.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Wang and Singh ที่ความเร็วลม 0.3 m/s



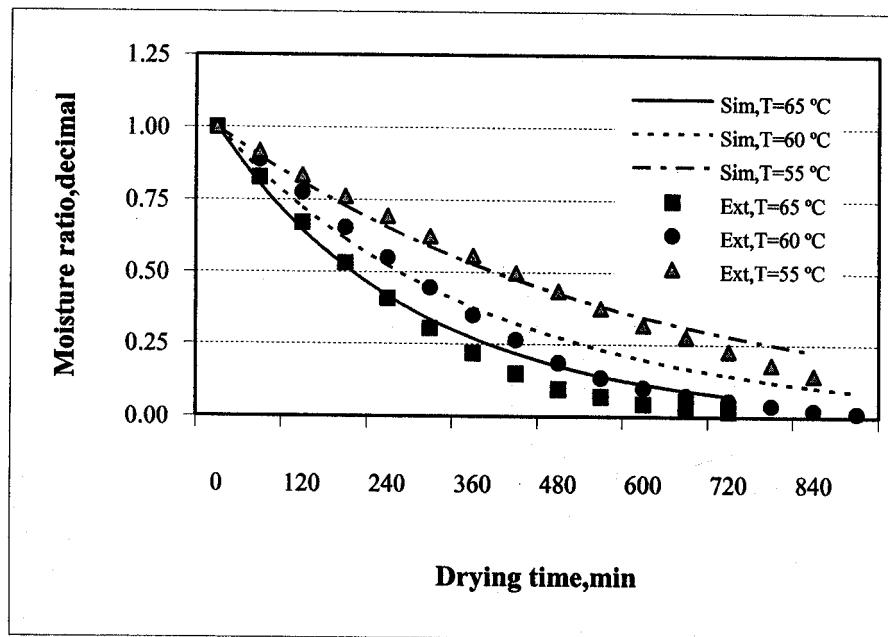
ภาพที่ ก.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Two-term ที่ความเร็วลม 0.3 m/s



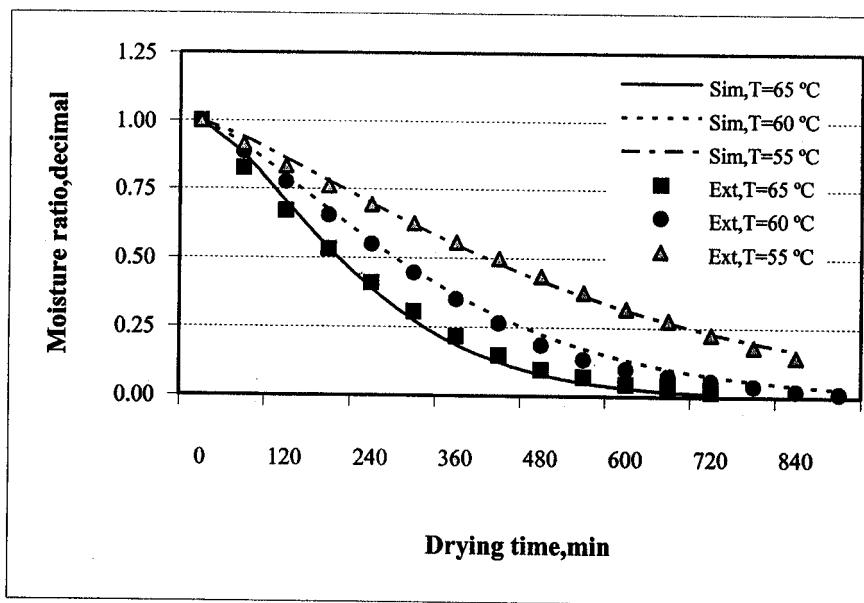
ภาพที่ ก.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณตามรูปแบบของสมการ Diffusion approach ที่ความเร็วลม 0.3 m/s

3. การอบแห้งพริกด้วยลมร้อน

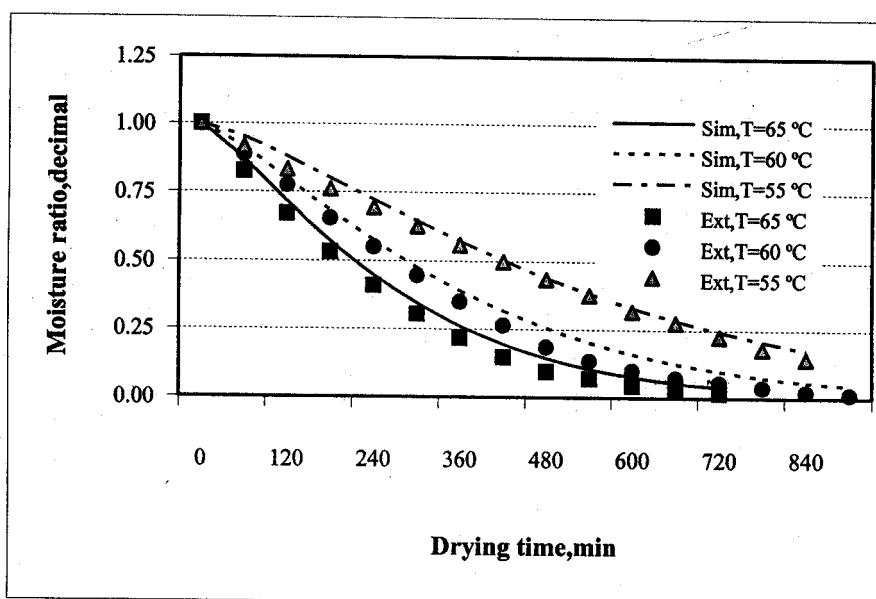
การอบแห้งพริกด้วยลมร้อน เพื่อหาสมการอบแห้งขั้นบางที่เหมาะสมที่สุด สำหรับ อธิบายพฤติกรรมการอบแห้ง แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการ อบแห้ง พริกที่กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง และทำนายผลตามรูปแบบสมการต่าง ๆ สามารถสรุปผลได้ดังนี้



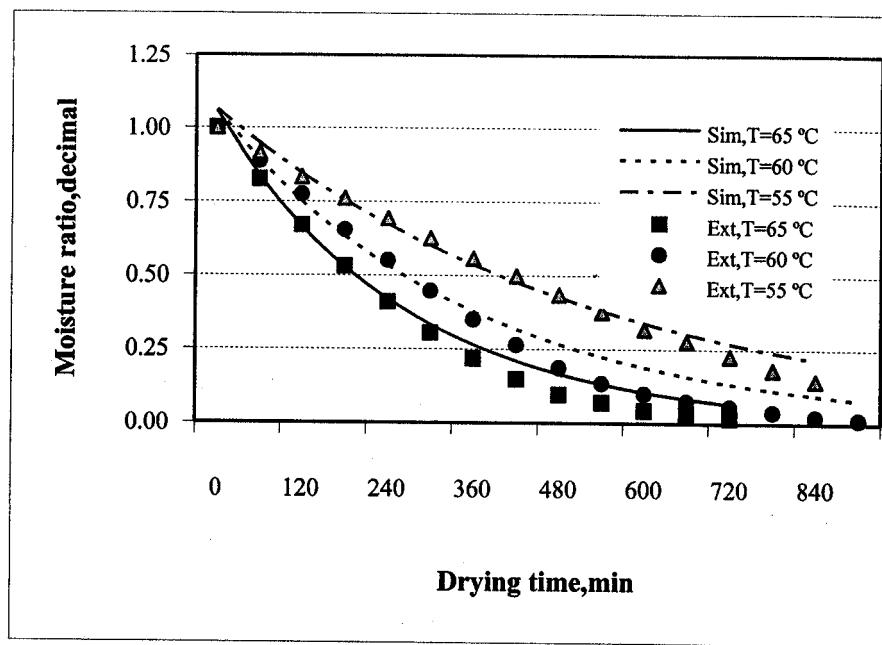
ภาพที่ ก.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลอง กับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Newton ที่ความเร็วลม 1.0 m/s



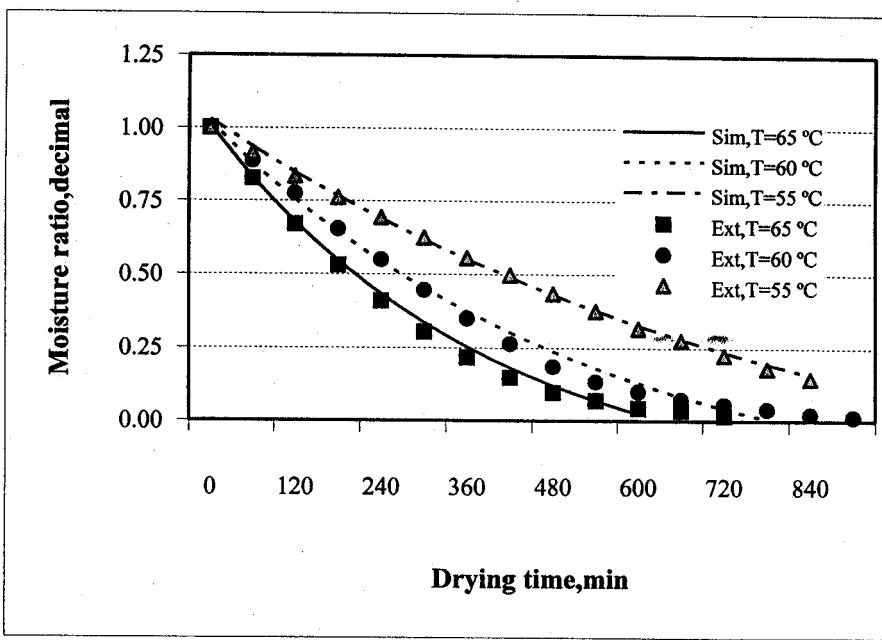
ภาพที่ ก.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Page ที่ความเร็วลม 1.0 m/s



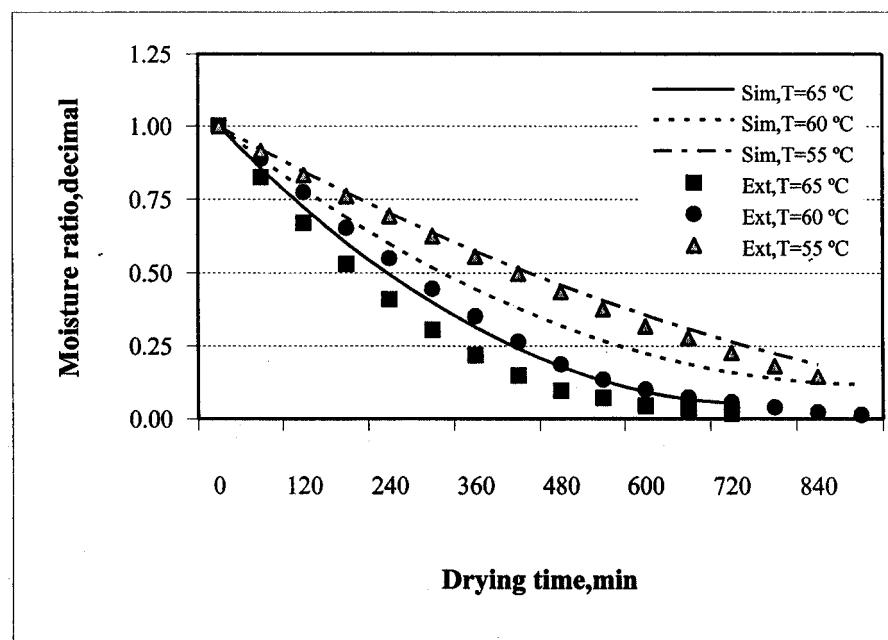
ภาพที่ ก.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Modified Page ที่ความเร็วลม 1.0 m/s



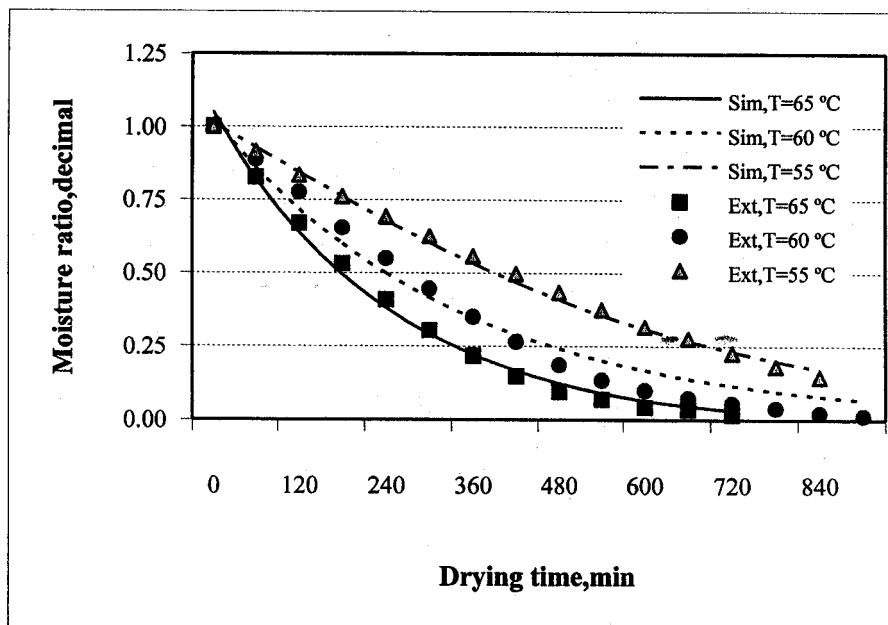
ภาพที่ ก.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Henderson and Pabis ที่ความเร็วลม 1.0 m/s



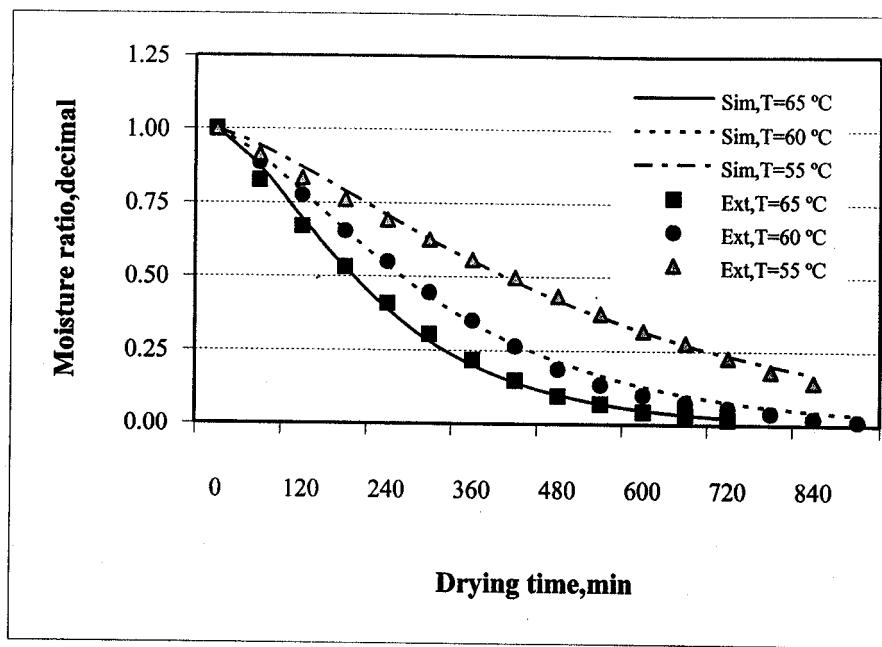
ภาพที่ ก.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Logarithmic ที่ความเร็วลม 1.0 m/s



ภาพที่ ก.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลอง กับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Wang and Singh ที่ความเร็วลม 1.0 m/s



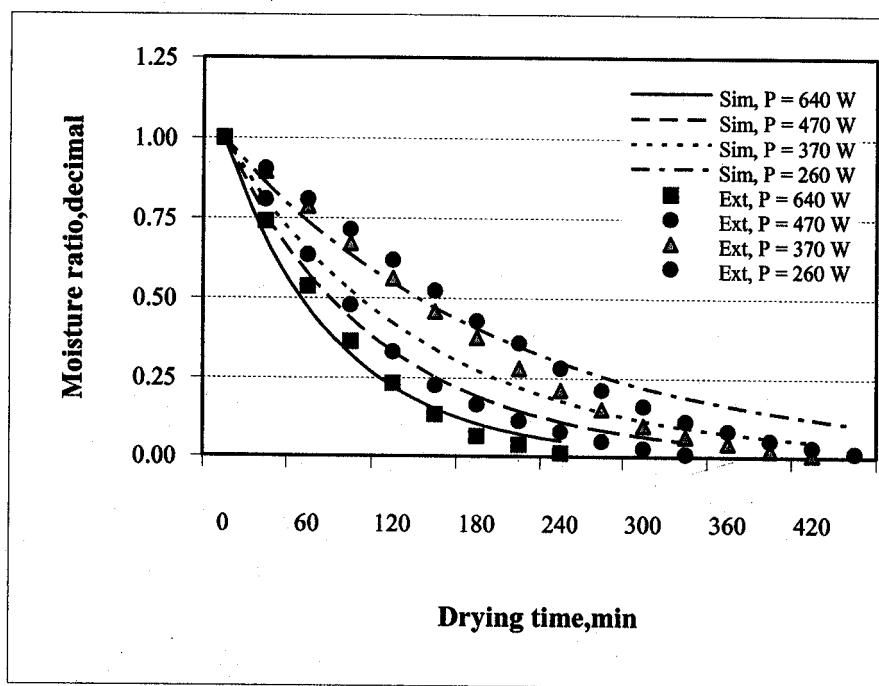
ภาพที่ ก.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลอง กับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Two-term ที่ความเร็วลม 1.0 m/s



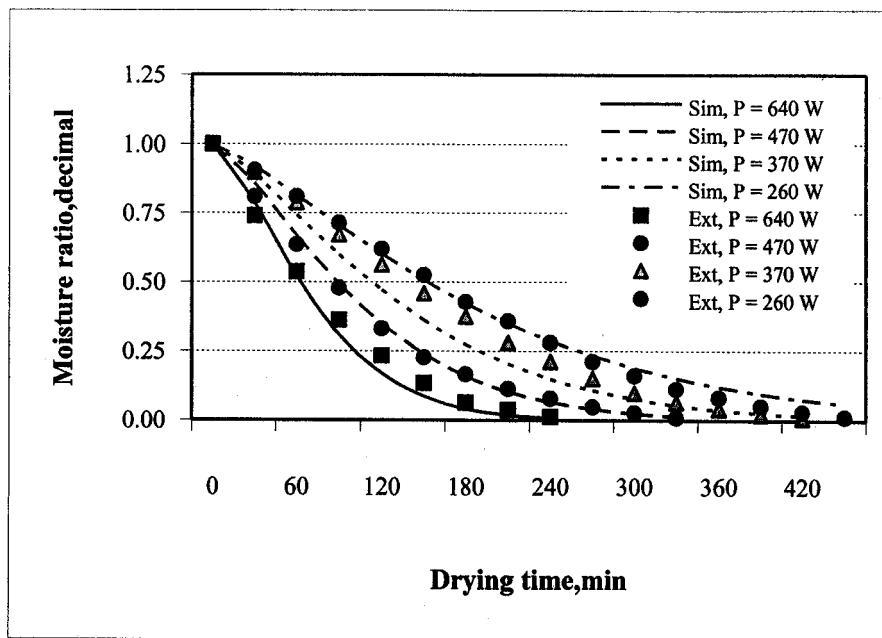
ภาพที่ ก.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Diffusion approach ความเร็วลม 1.0 m/s

4. การอบแห้งพริกด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

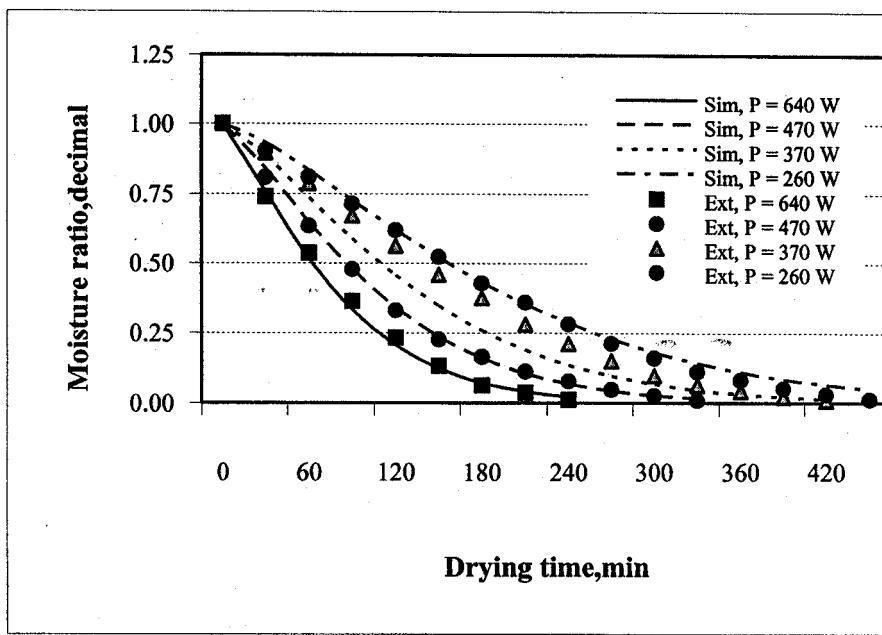
การอบแห้งพริกด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด เพื่อความสามารถแห้งชั้นบางที่เหมาะสมที่สุด สำหรับอธิบายพฤติกรรมการอบแห้ง แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้น กับเวลาในการอบแห้งพริกที่กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง และทำนายผลตามรูปแบบ สมการต่าง ๆ สามารถสรุปผลได้ดังนี้



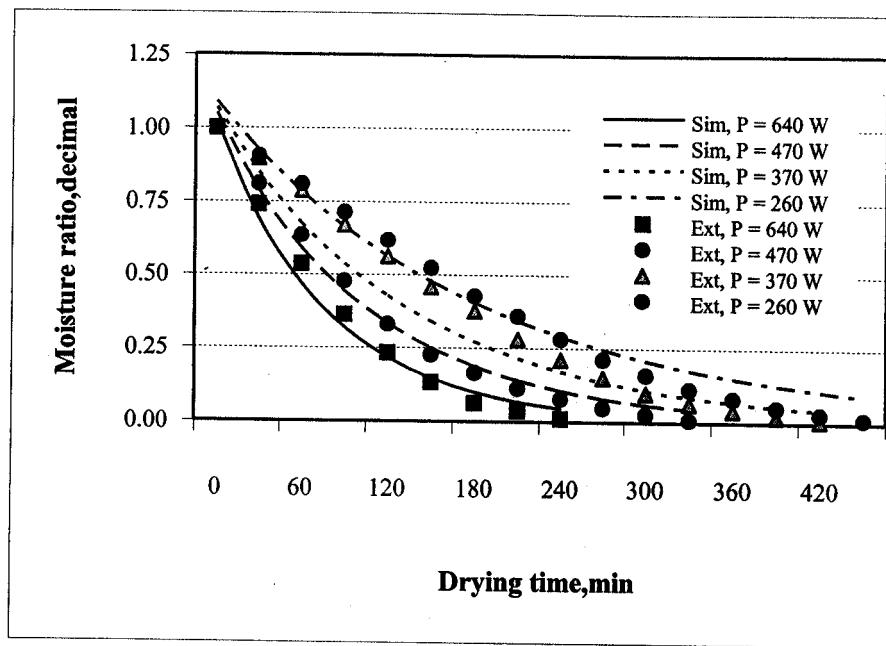
ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลอง กับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Newton ที่ความเร็วลม 0.3 m/s



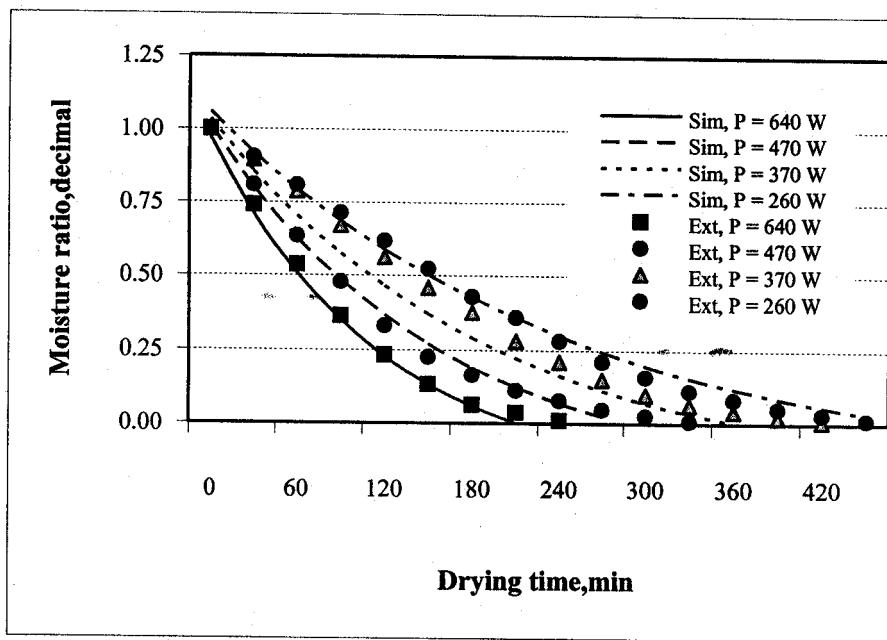
ภาพที่ ก.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณตามรูปแบบของสมการ Page ที่ความเร็วลม 0.3 m/s



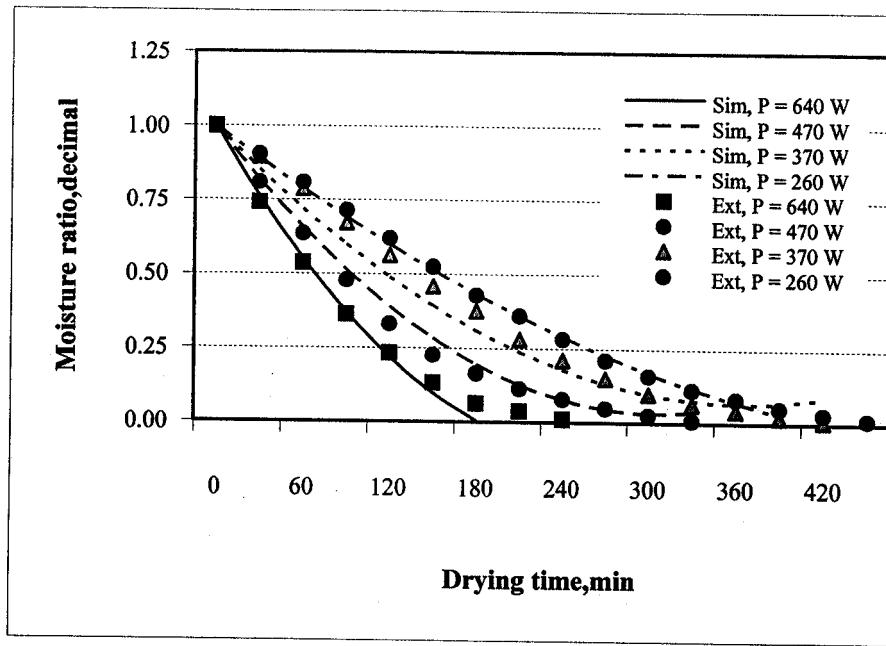
ภาพที่ ก.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณตามรูปแบบของสมการ Modified Page ที่ความเร็วลม 0.3 m/s



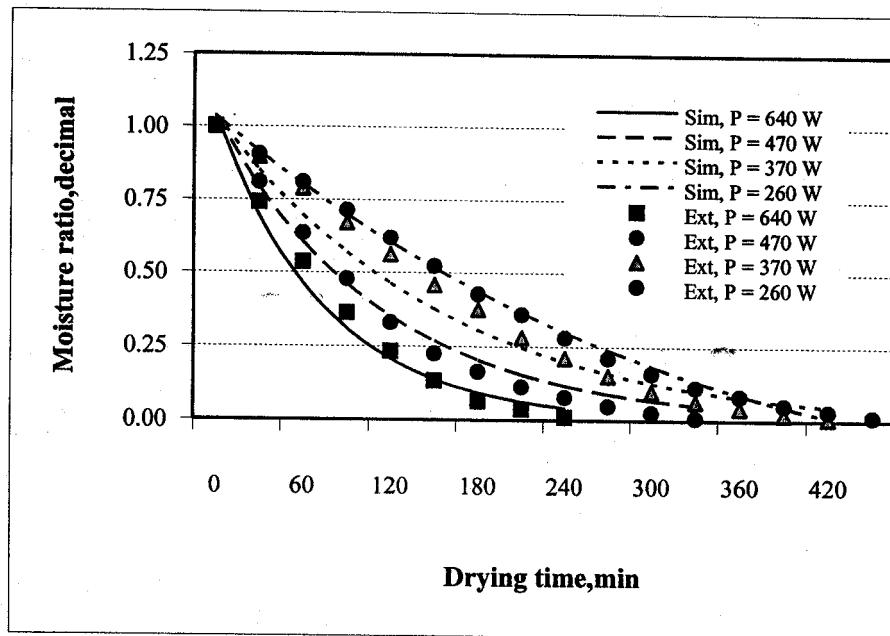
ภาพที่ ก.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณตามรูปแบบของสมการ Henderson and Pabis ที่ความเร็วลม 0.3 m/s



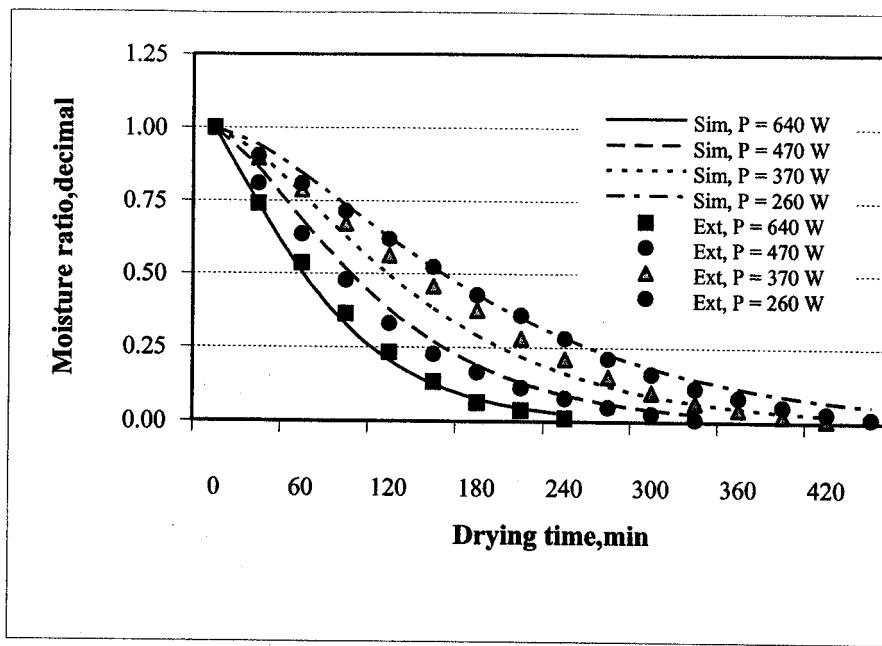
ภาพที่ ก.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณตามรูปแบบของสมการ Logarithmic ที่ความเร็วลม 0.3 m/s



ภาพที่ ก.30 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณตามรูปแบบของสมการ Wang and Singh ที่ความเร็วลม 0.3 m/s



ภาพที่ ก.31 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณตามรูปแบบของสมการ Two-term ที่ความเร็วลม 0.3 m/s



ภาพที่ ก.32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณตามรูปแบบของสมการ Diffusion approach ที่ความเร็วลม 0.3 m/s

ภาคผนวก ข
รายการบทความวิชาการ

รายงานทความวิชาการ

แสดงงบทความความวิชาการฉบับเต็มในภาคผนวก โดยมีชื่อบทความ ดังต่อไปนี้

ชนกัตร สุวรรณภูมิ, จำไพบูลค์ ทีบุญมา, “ผลของความเรื้อรังต่อการอุบแห้งเนื้อคั่ยวรังสี
อินฟราเรด,” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 10, (170) 2548. (National conference)

ชนกัตร สุวรรณภูมิ และ จำไพบูลค์ ทีบุญมา. “สมการการอุบแห้งชั้นบางของเนื้อคั่ยวลนร้อนร่วมกับอินฟราเรด”, การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8. (163) 2550, (National conference)

จำไพบูลค์ ทีบุญมา และ ชนกัตร สุวรรณภูมิ. “การอุบแห้งเนื้อคั่ยวรังสีอินฟราเรด”,
วิศวกรรมสาร มน. ปีที่ 33 ฉบับที่ 2:169 -180; 2549, (National journal)

จำไพบูลค์ ทีบุญมา และ ชนกัตร สุวรรณภูมิ. “การศึกษาปริมาณเทียนการอุบแห้งคั่ยวลนร้อนร่วมกับอินฟราเรด”, วิศวกรรมสาร มน. ปีที่ 34 ฉบับที่ 2:189 -201; 2550, (National journal)

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิชากรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19
19-21 ตุลาคม 2548 จังหวัดเชียงใหม่

ผลของความเร็วลมต่อการอบแห้งเนื้อด้วยรังสีอินฟราเรด

Effect of air velocity on beef drying with infrared radiation

สถานที่รับเรียน " สำนักศิลป์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ และสำนักศิลป์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ชั้น 3 ตึกสหศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ถนนสุขุมวิท 34 แขวงคลองเตย เขตคลองเตย กรุงเทพฯ 10140

*E-mail: tanapatann@hotmail.com

Tanapat Suwanakoot¹, Umphisak Teeboonma¹ and Somchart Soponronnarit¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, 34190

²School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140

*E-mail: tanapatann@hotmail.com

ນາທຄົມຢ່ອ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเรียนรู้ที่มีผลต่อ
ผลแห่งการเรียนรู้ด้วยสื่อสื่อสารมวลชน สำหรับเยาวชนไทย การทดลองมีตัวแปร
อุดมทรัพยากรที่ทางเข้าห้องเรียนแบบเท่ากัน 40 องศาเซลเซียส ความ
ความเร้ามือไฟฟ้า 0.1 บีต 1.0 เมตรกรานิต และเกลิงค์งานที่เข้ามา
ให้กับแหล่งพลังงานทางประวัติ 260 บีต 84 วัตต์ โดยการเดินให้
ระยะทางระหว่างห้องเรียนและห้องเรียนเดียวกันที่ตั้งแต่ห้องของเด็กกับห้อง
คงที่ ผลของการทดสอบพบว่า การเพิ่มความเร็วของอาการในการ
เดินแห่งเด็กทำให้ระยะเวลาในการตอบแห่งเด็กน้อย และภายในได้เรียนรู้ในการ
ตอบแห่งเด็กกับระยะเวลาในการอบรมแห่งเด็กน้อยเมื่อทดสอบกับเด็ก
ที่เข้ามาให้กับแหล่งพลังงานที่ตั้งแต่ห้องของเด็กกับห้องคงที่
ความเร้ามือไฟฟ้า ความเร็วของเด็ก ความเร้ามือไฟฟ้า

คำสำคัญ: การอบแห้ง/รังสีอินฟราเรด

Abstract

The objective of this research is to study the effect of air velocity on beef drying using far-infrared radiation. The experiments are conducted at the following conditions: air temperature entering drying chamber of 40°C, air velocity ranging from 0.1-1.0 m/s and input power of infrared heater ranging from 260-640 W. Whereas, distance between infrared source and the product and the product size are fixed. Experimental results can be summarized as the followings: the drying time was increased with increasing air velocity and it was also increased with decreasing input power of infrared heater. Additionally, it is important to note that air velocity considerably affects drying time.

Keywords: Drying / Infrared radiation

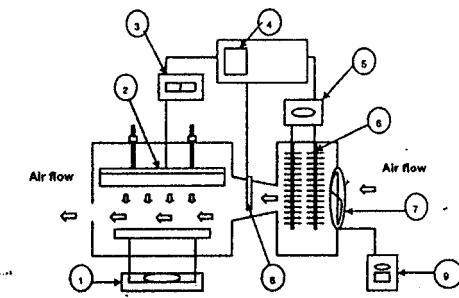
1. ຂາຍຸ

การผลิตภัณฑ์สามารถทำให้เกิดความวิธีด้วยกัน เช่น การอบรมผู้ดูแลโดยให้รับอนุญาต ประเมินภัยแล้วดูแลในไม่เวลาก การอบรมผู้ดูแลด้วยสัญญาภัย การอบรมผังด้วยบันทึกความร้อน การอบรมผังด้วยบันทึกเรื่องและก่อการบุ่มเพื่อบรรทัดสิ่งแวดล้อม การอบรมผังให้แก่ผู้ดูแลด้วยบันทึกเรื่องฟาร์มาцевติกา เครื่องของที่ต้องห้ามซื้อได้เพิ่มบันทึกเรื่อง [1] ที่สำคัญ เครื่องของที่ห้ามซื้อได้เพิ่มความร้อนให้ขาดสภาพแพร่งที่ทำได้ร้าย เช่น จากชุดควบคุมความร้อน น้ำมันเชื้อเพลิง และพิษ(LPG) พลังงานแสงอาทิตย์ หรือความร้อนที่จะกระทบความต่างๆ ในโรงงาน แหล่งพลังงานที่ถูกห้ามด้วย ได้นัก พลังงานแสงอาทิตย์ และก็มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถทำให้เกิดสภาพอากาศที่ไม่เอื้ออำนวย ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความชอบ และด้วยได้รับพื้นที่มาก [2] ส่งผลให้ลดความสามารถผลิตต่ำ นอกจากนี้จาก การอบรมผังด้วยบันทึกเรื่องและบันทึกเรื่องที่มีส่วนทุนก์ [1,3] คือ การอบรมผังด้วยบันทึกเรื่องฟาร์มาцевติกา ซึ่งจุดเด่นที่ปัจจุบันใช้ในเรื่องของการบริการ แรกทั้งโรงงานทางการสัมภาระและอุตสาหกรรม ขณะนี้ได้รับความนิยมในการใช้ในวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิต ของผู้ผลิตในประเทศไทย และเกิดความร้อนขึ้นซึ่งจะทำให้กลุ่มหมู่มิภัยภายใน วัสดุถูกกว่าอุณหภูมิที่ต้องการ [4,5] จุดเด่นคือเมื่อต้องที่ทำให้ได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่อง ไม่เท่านั้น ซึ่งจะช่วยให้มีอัตราการอบรมผังที่สูง ลดระยะเวลา การอบรมผังและพัฒนาที่ซับซ้อน ประการที่สองของผลิตภัณฑ์ฟาร์มาцевติกาให้ heat กัน ที่ส่งให้ห้องดู [6,7,8] ดังนั้นจึงมีขนาดอยู่ปีกกว้างที่เล็ก ทำให้สามารถออกบันทึกเครื่องของแต่งห้องที่มีขนาดแคบทั้งรั้ว ซึ่งจะช่วยลดเงินลงทุนเบื้องต้นในการผลิตเครื่องของแต่งห้อง ประการที่สามการให้ความร้อนโดยการผ่านรั้วจึงทำให้เกิดอุณหภูมิภาระจะต้องหันเข้าสู่เตาเผา [9] ดังนั้นจึงไม่มีปัญหาในเรื่องความชื้นในปั๊มน้ำเส่านอ อีกด้วยที่บังต้องการอาหารคบหมุนเวียนเพื่อยกเลิกของห้องให้ไม่ต้องใช้พัดลมดูดควันด้วยใหญ่ ซึ่งเป็นการลดต้นทุนของปั๊มน้ำ และค่าใช้จ่าย และประการที่สุดท้าย คือ รั้วสัมภาระฟาร์มาเซติกา

ตามการณ์นี้ไปใช้ควบคู่กับระบบอื่นได้ด้วยเนื่องจากใช้เทคโนโลยีในการผลิตตั้งแต่ต้นจนไปมีความซับซ้อนของระบบ รวมทั้งบ ஸในส่วนของการควบคุมให้เราเริ่ง [1] จากข้อสรุปเมื่อตัดสินใจว่าใช้เครื่องมือแนวตั้งที่จะศึกษาการอ่อนแพ้งั้นเนื่องด้วยรัฐสิลิโคนฟาราเดจ และจากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ความเร็วลมเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการอ่อนแพ้งั้น รัฐสิลิโคนฟาราเดจ [10] ลงสัมภานวิจัยนี้เริ่งทุบเมื่อที่จะศึกษาปรับเปลี่ยน ความเร็วลมว่าส่งผลต่อการอ่อนแพ้งั้นรัฐสิลิโคนฟาราเดจอย่างไร โดย ความเร็วลมที่ใช้ในการศึกษาอยู่ระหว่าง $0.1 - 1.0 \text{ m/s}$ เนื่องจาก ความเร็วลมที่เหมาะสมในการอ่อนแพ้งั้นจะมีผลต่อความเร็วลมเพื่อความเหมาะสม แสงและเพื่อต่อการสัมผัสถึงหลังงาน สำหรับแม่ติดภัยตัว เมื่อถูกตันจะง่ายมากทดสอบ คือ เมื่อเรียก เนื่องจากงานอาหารส่วนใหญ่จะ มีรายการอาหารเนื้อแห้ง หรือเนื้อแฉดเกี่ยว การผลิตในปัจจุบันได้วิธี คาดเดา ซึ่งจะมีปัญหาเรื่องความสะอาด เช่น ฝุ่น และแบคทีเรีย การ นำเข้าเนื้อวัวมาอบในตู้อบอินฟาร่าเดจจะเป็นช่วยแก้ปัญหาเรื่องความ สะอาด และช่วยขับเคี่ยมประสาทในกระบวนการ

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

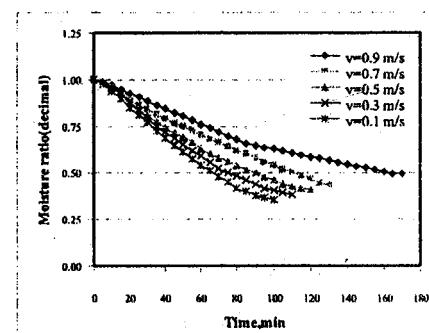
เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการศึกษาทดลองในงานเรียนนี้มีขนาดของ
อบแห้งแบบอินฟราเรด ไก่ครัววัยกันหล่อน อันดับแรกน้ำหนักที่ 1
รายละเอียดมีดังนี้ ขนาดของห้อง存ขนาดเท่ากับ $35 \times 50 \times 25$ cm (กว้าง x ยาว x สูง) อุปกรณ์ที่ทำการอยู่ในแบบทั่วไปคืออินฟราเรด 1
แห่งชนิด 650 W ระยะห่างระหว่างรั้งสักอินฟราเรดกับติดกับผ้า
เท่านั้น 15 cm ในแนวดิ่งจาก และขดลวดความร้อนขนาด 300 W สามารถปรับ
ความเร็วตามได้ อุณหภูมิอากาศที่ต้องการที่ต้องการตั้งไว้ 90 °C โดยใช้เตอร์
โน้มตัวเป็นเซนิต K ต่อเข้ากับ data logger ความเร็วของอากาศ
อบแห้ง วัดโดยใช้ hot wire anemometer การเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก
ของผลิตภัณฑ์ที่ต่างๆจากเครื่องซึ่งแบบติดต่อและตัวน้ำที่ได้อธิบาย
0.1 กรัม ในการทดสอบอบแห้งเนื้อรักษาความถ้วนอุณหภูมิรักษาตัวห้อง
อบแห้งที่ 40 องศาเซลเซียส ตัวแห้งที่รักษาอุณหภูมิรักษาตัวห้อง
ในช่วง 280 - 640 วัตต์ และเปลี่ยนแปลงความเร็วลมอยู่ระหว่าง 0.1
- 1.0 m/s ในการทดสอบและตัวตั้งจะใช้เนื้อรักษาความร้อน 127 กรัม
โดยมีขนาดและความหนาเป็น $3 \times 5 \times 1$ cm. (กว้าง x ยาว x หนา)
และจากการสูตรตัวอย่างนี้แสดงถึงในห้องต้นนี้มาหาความร้อน
สุดท้ายพบว่ามีค่าความชื้นโดยเฉลี่ยประมาณ 140 เมตริกซ์นิล
มาตรฐานแห้ง ตัวรักษาเนื้อรักษาที่มีความชื้นเท่าเดียวกับค่าความชื้นเริ่มต้น
โดยเฉลี่ยประมาณ 300 เมตริกซ์นิลมาตรฐานแห้ง เมื่อคำนวณหาค่า
อัตราส่วนความชื้นแห้งร้อยละในช่วง 0.45 - 0.5



รุ่นที่ 1 เครื่องอบแห้งแบบมีหม้อนรุ่มเก็บรังสีอินฟราเรด โดย
ประกอบด้วย 1) เครื่องซั่งน้ำมัน, 2) หม้อต้มรังสีอินฟราเรด, 3) ชุดปรับ
กำลังงานไฟฟ้า, 4) ชุดควบคุมอุณหภูมิ, 5) กีวิสวัตเตอร์-มิครอฟ, 6) ชุด
จัดการความร้อน, 7) พัดลม, 8) ชุดจัดอุณหภูมิ, 9) ชุดปั๊มน้ำความร้อน.

3. ຜຸນະວິຈາຮົມ

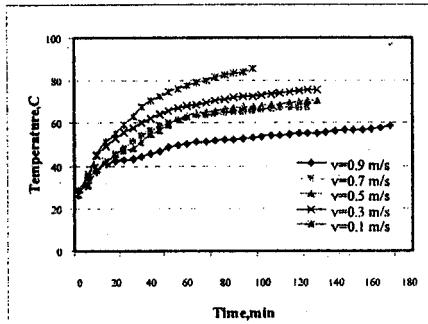
ในรุ่นที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรส่วนความชื้นกับเวลาในการอุ่นฟันเบอร์วัตถุความเร็วคงต่อ ๆ กัน การหดของอบพังผืดที่ Power เท่ากับ 280 W ก็慢ที่ห้องรักษาพยาบาล จากการทดสอบพบว่า อัตราการหดความชื้นจะลดลงตามระยะเวลา และต่อความเร็วอยู่ 0.1 ปี/วัน มีอิทธิพลต่อความชื้นคงเดิมที่สุด เมื่อเทียบกับความเร็วคงต่อ ๆ กัน



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราต่อวันความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) = 260 W

เมื่อการทดลองให้อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 เป็นเกณฑ์ในการเบริ่งที่ดีที่สุด ให้ความเร็วต่อที่ 0.1 m/s เป็นต่ำสุดเมื่อเรียบเทียบกับความเร็วต่อ 0.3 m/s พบว่าเวลาในการกรองแห้งจะเพิ่มขึ้น 15.38 % และเมื่อเบริ่งที่ดีที่สุดที่ความเร็วต่อ 0.5 m/s, 0.7 m/s และ 0.9 m/s พบว่าเวลาต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นเป็น 38 %, 69 % และ 146 %

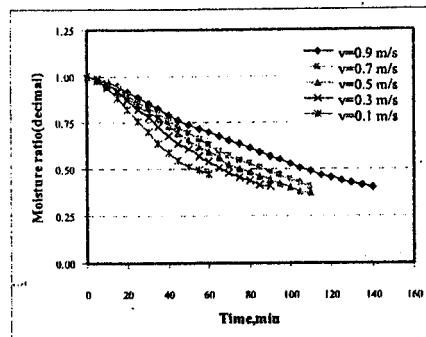
ตามลักษณะ จึงสรุปผลการทดลองได้ว่าที่อัตราการให้ความชื้นของอาหารค้า จะมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าก็อัตราการให้ความชื้นของอาหารสูง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าอัตราการให้ความชื้นของอาหารที่สูงส่งผลทำให้อุณหภูมิที่ด้านและภายในไฟฟ้าตัดกันหรือลดลงส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลงด้วย ดังจะเห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ได้จากภาพที่ 3



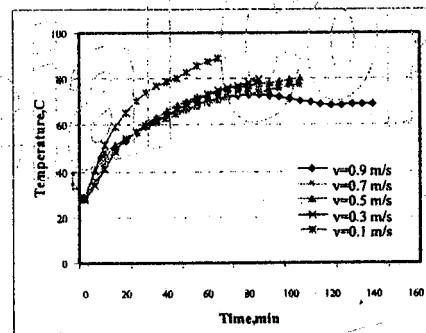
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผลิตภัณฑ์กับเวลาเมื่อใช้
Power (IR) = 260 W

ในรูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์กับเวลาในกรณีที่ไม่มีการยกเว้นในการอบแห้ง ที่ความเร็วลม 0.1 พบร้า อุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์ต่ำกว่าการอบแห้งอ่อนเป็นสองเท่า โดยในช่วงแรกอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดคงที่ในอุณหภูมิผลิตภัณฑ์จะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย หากเปรียบเทียบกับความเร็วลมต่าง ๆ ที่ความเร็วลม 0.1 m/s จะมีความสัมพันธ์กับความเร็วลมที่ 0.9 และอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์จะสูงกว่า ที่ความเร็วลมอื่นๆ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วลม ความเร็วลมที่มากที่สุดได้ก่อให้การติดต่อความร้อนและลมเร็ว ๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าความเร็วลมที่ต้องก่อให้อุณหภูมิภายในเพิ่มขึ้นตัวเดียว เนื่องจากอาหารจะมีพาเข้าสู่ความร้อนจากบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์โดยไปเร็วขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์ลดลง

ในรูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อการทดสอบอบแห้งโดยใช้ปืน Power เทากัน 370 W ให้กับแต่ละตัวอย่าง ได้มาได้อัตราส่วนความชื้นที่ต่อกัน 0.5 เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ และกำหนดให้ที่ความเร็วลม 0.1 m/s เป็นตัวอ้างอิง เปรียบเทียบกับที่ความเร็วลม 0.3 m/s พบร้าเวลาในการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น 30 % และเมื่อเปรียบเทียบกับที่ความเร็วลม 0.5 m/s, 0.7 m/s และ 0.9 m/s พบร้าจะต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นเป็น 50 %, 70 % และ 110 % ตามลักษณะ



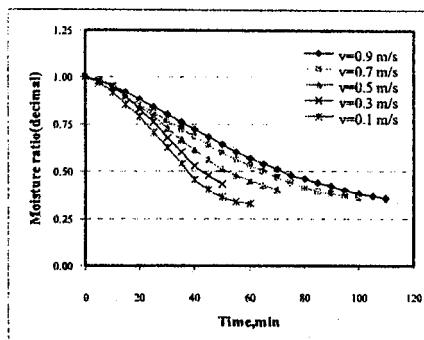
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้
Power (IR) = 370 W



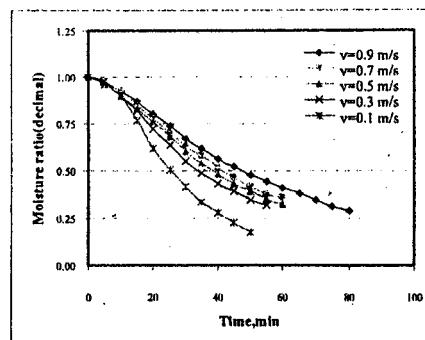
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผลิตภัณฑ์กับเวลาเมื่อใช้
Power (IR) = 370 W

ในรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาในการอบแห้งพบร้า แนวโน้มของการฟื้นฟูแบบกับรูปที่ 3 โดยเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์จะลดลง

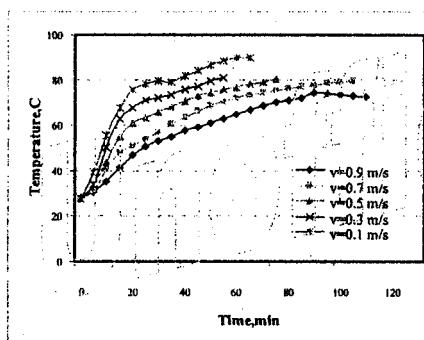
ในรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อการทดสอบอบแห้งโดยใช้ปืน Power เทากัน 470 W ให้กับแต่ละตัวอย่าง โดยให้อัตราส่วนความชื้นที่ต่อกัน 0.5 เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ พบร้าที่ความเร็วลม 0.1 m/s ความชื้นภายในจะลดลงเร็วที่สุด ที่ความเร็วลม 0.3 m/s อยู่ 14.29 % และเมื่อเปรียบเทียบกับที่ความเร็วลม 0.5 m/s, 0.7 m/s และ 0.9 m/s พบร้าจะต้องใช้เวลาในการทำความชื้นออกจากราบภายในเพิ่มเป็น 43 %, 71 % และ 100 % ตามลักษณะ



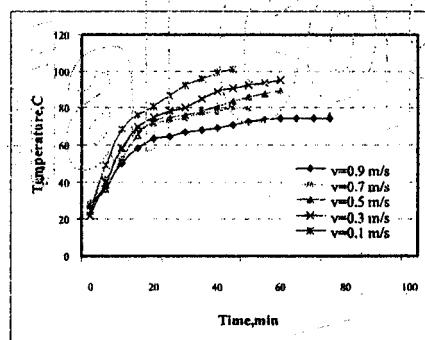
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้
Power (IR) = 470 W



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้
Power (IR) = 640 W



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผลิตภัณฑ์กับเวลา เมื่อใช้
Power (IR) = 470 W



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผลิตภัณฑ์กับเวลา เมื่อใช้
Power (IR) = 640 W

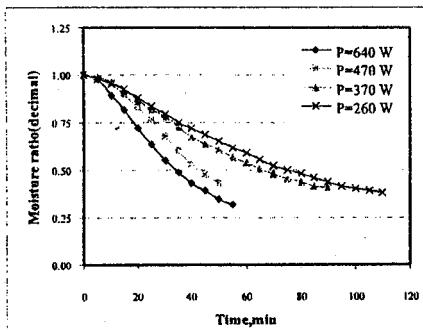
ในรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในในผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาในการอบแห้งโดยไม่ใช้ ไฟฟ้าให้มีของกินหลักด้วย กับรูปที่ 3 โดยเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นอุณหภูมิภายในในผลิตภัณฑ์จะลดลง

ในรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาเป็นการทดสอบแบบโดยป้อน Power เท่ากับ 470 W ให้กับ แท่งรังสีอ่อนฟาราเดค โดยให้อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ หน่วยที่ความเร็วลม 0.1 m/s ความชื้นภายในเพื่อจะลดลงเร็วกว่าที่ความเร็วลม 0.3 m/s อยู่ 40 % และเมื่อเปรียบเทียบกับที่ความเร็วลม 0.5 m/s, 0.7 m/s และ 0.9 m/s หน่วยจะต้องใช้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 52 %, 60 % และ 80 % ตามลำดับ

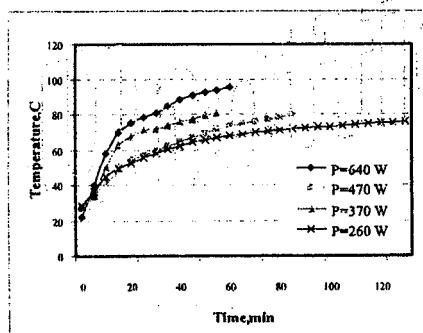
ในรูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาในการอบแห้งโดยไฟฟ้า แนะนำเมื่อของการพัสดุถ้ากับรูปที่ 3 โดยเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นอุณหภูมิภายในในผลิตภัณฑ์จะลดลง

ในรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเลือกวิเคราะห์ที่ความเร็วลม เท่ากับ 0.3 m/s เนื่องจากที่ ความเร็วนี้ สังเกตสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์จะทำให้การทดสอบ ในตัวการทดสอบ และการเปลี่ยนแปลงของตัวว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมี คุณภาพที่ดีที่สุด จากการหาไฟฟ้าป้อน Power เท่ากับ 640 W จะมี อัตราส่วนความชื้นลดลงเร็วกว่าสุด เมื่อเปรียบเทียบกับที่ power 0.1 หากเก็บหน้างานให้อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 เมื่อเก็บหน้างาน การเปรียบเทียบ หน่วยที่ power เท่ากับ 640 W จะใช้เวลาในการอบแห้ง ต้นกว่าที่ power เท่ากับ 470 W, 370 W และ 280 W เท่ากับ 14, 86, และ 114 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการแห้งอินฟาร่าเดค ปล่อยพลังงานให้กับผลิตภัณฑ์มากขึ้น ตามกำหนดที่ป้อนให้ ทำให้

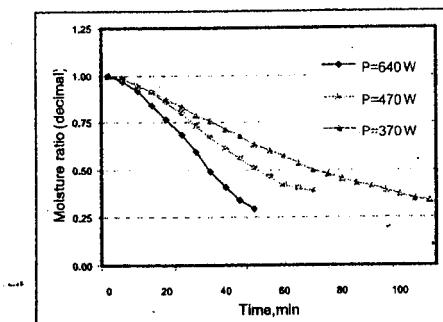
อุณหภูมิผลักดันฯเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ตั้งจะเห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ในรูปที่ 11



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่กำลังวัดต์ต่างๆ เมื่อใช้ ความเร็วสูง เท่ากับ 0.3 m/s



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวติดกันที่กับเวลาที่กำลังวัดที่ต่างๆ เมื่อใช้ ความเร็วเท่ากับ 0.3 m/s



รูปที่ 12 ความต้นพันธุ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่กำลังวัด
ต่าง ๆ ที่ความเร็ว慢เป็นหน่วย

ในรูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเร็วกับเวลา เมื่อเป็นการทดลองของไฟฟ้าโดยใช้เดไฟฟาร์ทอิเล็กทรอนิกส์ให้กับความร้อนกับผลิตภัณฑ์ นั่นคือการทดสอบความเร็วของปืนถูกยิง ที่การศึกษาเมื่อยังไม่มี ทางการที่เมื่อยังไม่มีปืน Power เท่ากับ 840 W จะมีอัตราส่วนความเร็วของไฟฟ้าที่เร็วที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับที่ power นี้ ดังนั้น หากการให้ไฟฟ้าต่ำกว่า 840 W ก็จะทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้นหากให้กับ 0.5 เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ พบร้าที่ power เท่ากับ 840 W จะใช้เวลาในการยอมแพ้ถังแก๊สไว้ที่ power เท่ากับ 470 W และ 370 W เท่ากับ 43 และ 100 เมื่อเทียบช่วงความต้านทาน ซึ่งเป็นผลของการแพ้ของไฟฟาร์ทด้วยอุบัติเหตุ ให้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความเร็วมากขึ้นตามที่กล่าวที่ข้างต้นให้ ทำให้อุบัติเหตุมีผลกับภัยพิบัติเพิ่มขึ้นตามที่คาดการณ์ไว้ แต่เมื่อเทียบกับความเร็วของไฟฟ้าที่ได้มาเป็นเมื่อยังไม่มีปืนที่ power ต่าง ๆ แล้ว พบว่าที่ความเร็วจะเป็นปืนที่มีอัตราส่วนความเร็วที่กับเวลาจะมีมูลค่าใกล้เคียงกับที่ความเร็วของ 0.3 และ 0.5 นั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบกับไฟฟาร์ทอิเล็กทรอนิกส์กับปืนมาทั้งที่ให้ด้วยอุบัติเหตุกับภัยพิบัติของการแพ้เดไฟฟาร์ท จึงปัจจุบันแสดงให้ในรูปที่ 12 และจากผลการทดลองนี้เมื่อว่าอัตราการไฟฟ้าของไฟฟาร์ทมีส่วนช่วยในการลดความเสี่ยงของภัยพิบัติที่เกิดขึ้น

ก.ร.บ.ก.ส.ก.ก.ก.ก.ก.ก.ก.ก.

งานวิจัยนี้ได้ทิการทดลอง และศึกษาการอบรมแห่งนี้อีกด้วย
อินฟาร่าเด เมื่อ併ดันพบว่าได้ใช้ความเร็วและเพิ่มขึ้น จะทำให้ระยะเวลา
ในการอบรมแห่งนี้ลดลงมากติดกับชั้นเรียนที่ทำการ
ทดลองพบว่าความเร็วของผู้สอนจะดีมากกว่าของผู้สอนที่ต้องคุยคุยกับ
ผู้เรียน และการสอนด้วย

กิจกรรมประจำ

งานวิจัยที่ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกอ.) และสำนักงานคณะกรรมการ
การอุดมศึกษา (สกอ.)

ເອກສາຮ່ວມເອົງ

- [1] K.J. Chu, and S.K. Chou, " Low-cost drying methods for developing countries," Trends in Food Science & Technology, Vol. 14, 2003, pp. 519-528.
- [2] S. Soponronnarit, D. Nattawut, J. Hirunlabh, P. Namprakai, and S. Thepa, " Computer Simulation of Solar Energy Assisted Fruit Drying," RERIC International Energy Journal, Vol. 14, 1992b, pp. 59-70.
- [3] H.D. Isengard, "Rapid water determination in foodstuffs," Trends in Food Science & Technology, Vol. 6, 1995, pp. 155-162.
- [4] P. Glouannec, D. Lecharpentier, and H. Noel, "Experimental survey on the combination of radiating infrared and microwave sources for the drying of porous material," Applied Thermal Engineering, Vol. 22, 2002, pp. 1689-1703.
- [5] N. Sakai, and T. Hanzawa, "Applications and advances in far-infrared heating in Japan," Trends in Food Science & Technology, Vol. 5, 1994, pp. 357-362.
- [6] T.M. Afzal, and T. Abe, "Diffusion in potato during far infrared radiation drying," Journal of Food Engineering, Vol. 37, 1998, pp. 353-365.
- [7] P. Sheldén, and N. Shilton, "Application of far infrared radiation to cooking of meat products," Journal of Food Engineering, Vol. 41, 1999, pp. 203-208.
- [8] A. Hashimoto, and T. Kameoka, "Effect of infrared irradiation on drying characteristics of wet porous materials," Drying Technology-An International Journal, Vol. 17, 1999, pp. 1613-1626.
- [9] T.M. Afzal, and T. Abe, "Simulation of moisture changes in barley during far infrared radiation drying," Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 26, 2000, pp. 137-145.
- [10] T.M. Afzal, T. Abe, and Y. Hikida, "Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley," Journal of Food Engineering, Vol. 42, 1999, pp. 177-182.

Faculty of Engineering
Khon Kaen UniversityThai Society of
Agricultural EngineeringAmerican Society of
Agricultural and Biological Engineers

สมการการอบแห้งชั้นบางของเนื้อคั่ยลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด

Thin Layer Equation of Beef Drying Using Hot Air Combined with Infrared Radiation

ถนนก้าว ศุวรรณฤทธิ และ อร่าไพศาล พิมุขมา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จ.อุบลราชธานี 34190

Tanapat Suwannakoot and Umphisak Teeboonma

Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Warinchumrab, Ubon Ratchathani 34190

E-mail: tanapatann@hotmail.com

ABSTRACT

The objective of this work was to study thin layer equations of beef drying using hot air and infrared radiation. The experiments were conducted with the following: air velocities of 0.1-1.0 m/s, drying air temperature entering drying chamber of 40°C and infrared power of 260-640 W. Thin layer equations used for the study were Newton, Page, Modified Page, Henderson and Pabis, Logarithmic, Wang and Singh, Two-term exponential and Diffusion approach. The analysis result revealed that Two-term exponential equation has the highest coefficient of determination (R^2) and the lowest root mean square error (RMSE).

Keywords: Drying, Thin layer equation, Infrared radiation

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาสมการการอบแห้งชั้นบางของการอบแห้งเนื้อคั่ยลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด โดยมีเงื่อนไขการทดลอง คือ ความเร็วลม 0.1 – 1.0 m/s อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 40°C และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แท่งอินฟราเรดอยู่ระหว่าง 260 – 640 W สมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยสมการของ Newton, Page, Modified Page, Henderson and Pabis, Logarithmic, Wang and Singh, Two-term exponential และ Diffusion approach จากการวิเคราะห์พบว่าสมการ Two-term exponential สามารถคำนวณผลการอบแห้งเนื้อคั่ยลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 มากที่สุด และค่า RMSE น้อยที่สุด

คำสำคัญ : การอบแห้ง, สมการอบแห้งชั้นบาง, อินฟราเรด

สมการการอบแห้งชั้นบางของเนื้อตัวยลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด

Thin layer equation of beef drying using hot air combined with infrared radiation

ธนาพัท ศุวรรณภูญ นิรันดร์ หันไชยงวะ และ อร่าไพศาล์ ทีบุญมา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จ.อุบลราชธานี 34190

Tanapat Suwannakoot, Nirun Hunchaiyungwa and Umphisak Teeboonma
Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Warinchumrab, Ubon Ratchathani 34190
E-mail: tanapatann@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาสมการการอบแห้งชั้นบางของเนื้อตัวยลมร้อนร่วมกับ อินฟราเรด โดยใช้เงื่อนไขการทดลอง คือ ความเร็วลม 0.1 - 1.0 m/s อุ หน่วยของอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง เท่ากับ 40 °C และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แห้งอินฟราเรดอยู่ระหว่าง 260 - 640 W สมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ใน งานวิจัยนี้ประกอบด้วยสมการของ Newton, Page, Modified Page, Henderson and Pabis, Logarithmic, Wang and Singh, Two-term exponential และ Diffusion approach จากการวิเคราะห์พบว่าสมการ Two-term exponential สามารถทำนายผลการอบแห้งเนื้อตัวยลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 มาก ที่สุด และค่า RMSE น้อยที่สุด

คำสำคัญ : การอบแห้ง, ลมร้อน, สมการอบแห้งชั้นบาง, อินฟราเรด

Abstract

The objective of this work was to study thin layer equations of beef drying using hot air combined with infrared radiation. The experiments were conducted as the followings: air velocities of 0.1-1.0 m/s, drying air temperature entering drying chamber of 40°C and infrared power of 260-640 W. Thin layer equations used to study were Newton, Page, Modified Page, Henderson and Pabis, Logarithmic, Wang and Singh, Two-term exponential and Diffusion approach. The analysis result revealed that Two-term exponential equation has the highest coefficient of determination (R^2) and the lowest root mean square error (RMSE).

Keywords: Drying, Hot air, Thin layer equation, Infrared radiation

บทนำ

การประยุกต์ผลิตทางการเกษตรส่วนใหญ่จะทำโดยการลดความชื้นซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี วิธี หนึ่งที่มีต้นทุนต่ำ คือ การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ซึ่งจุดเด่นที่น่าสนใจ คือ ประการแรกพัฒนาจากวัสดุ อินฟราเรดจะถูกแปลงเป็นรังสีที่จะทำให้มีเลดักของน้ำภายในวัสดุสูง และเกิดความร้อนชื้นซึ่งจะทำให้อุณหภูมิภายในวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว ทำให้มีภาวะอกรดคุณไม่เที่ยวยัน ซึ่งจะช่วยให้มีอัตราการอบแห้งที่สูง ลด ระยะเวลาการอบแห้ง และพลังงานที่ใช้ ประการที่สองหลอดรังสีอินฟราเรดให้ heat flux ที่ค่อนข้างสูง ดังนั้น

จึงมีนาคอกอุปกรณ์ที่เลือก ทำให้สามารถออกแบบเครื่องอบแห้งที่มีขนาดกะทัดรัด ซึ่งจะช่วยลดเงินลงทุนเบื้องต้นในการผลิตเครื่องอบแห้ง ประการสำคัญ การให้ความร้อนโดยการແรังสีจะทำให้อุณหภูมิภายนอกส่วนในตัว ดังนั้นจึงไม่มีปัญหาในเรื่องความร้อนไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งยังต้องการอาหารคนมุนเวียนเพียงเล็กน้อยทำให้ไม่ต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นการลดต้นทุนอุปกรณ์ และค่าพลังงาน และประการสุดท้าย คือ รังสีอินฟราเรด สามารถนำไปใช้ควบคู่กับระบบอื่นได้ง่าย เนื่องจากใช้พื้นที่ในการติดตั้งที่น้อย ไม่มีความซับซ้อนของระบบ รวมทั้งตอบสนองต่อการควบคุมได้รวดเร็ว จากข้อสรุปเบื้องต้นงานนี้มีแนวคิดที่จะศึกษาการอบแห้งน้ำอ้วน สมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด เพื่อศึกษาการทำงาน และสร้างสมการจำลองการอบแห้งร้อน บาง เพื่อใช้อินบายพุทธิกรรมการอบแห้ง

อุปกรณ์และวิธีการ

วิธีทดลองการอบแห้งข้าวบาง โดยการนำเนื้อวัน้าหนักประมาณ 300 กรัม ทำการทดสอบอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ควบคุมอุณหภูมิข้าวห้องอบแห้งที่ 40 องศาเซลเซียส ผ่านแท่นรังสีอินฟราเรดจะให้พัดลมในช่วง 260 - 640 วัตต์ และเปลี่ยนแปลงความเร็วลมอยู่ระหว่าง 0.1 - 1.0 m/s อุณหภูมิอากาศที่ต่ำแห่งต่าง ๆ วัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชานติ K ต่อเข้ากับ data logger ความเร็วของอากาศ อบแห้ง วัดโดยใช้ hot wire anemometer การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผลิตภัณฑ์อ่านค่าจากเครื่องขึ้นแบบดิจิตอล และอ่านค่าได้ละเอียด 0.1 กรัม ในส่วนของเงื่อนไขที่เลือกไว้ในการวิเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ เป็นช่วงที่เนื้อมีคุณสมบัติสอดคล้องกับคุณสมบัติเนื้อแตดเดียวที่ทางขยายตัวห้องคลอด คือ ความชื้นสูตร้อยละ 140 เมอร์เร็นต์มาตรฐาน หรืออัตราส่วนความชื้นประมาณ 0.5 โดยที่อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) คำนวนจาก

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

เมื่อ M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น, เมอร์เร็นต์มาตรฐานแห้ง

M_i คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ, เมอร์เร็นต์มาตรฐานแห้ง

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล, เมอร์เร็นต์มาตรฐานแห้ง

การคำนวนขัติศาสตร์ความชื้นในงานวิจัยนี้ เป็นการคำนวนโดยประมาณค่า คือ ไม่คำนึงถึงความชื้นสมดุล โดยตั้งสมมุติฐานว่ามีค่าน้อย เมื่อเทียบกับความชื้นเริ่มต้นและความชื้นที่เวลาใด ๆ

เมื่อตัดผลการทดลองแล้ว นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับสมการการอบแห้งข้าวบางที่ใช้สำหรับท่านายค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ โดยได้สำหรับงานวิจัยต่าง ๆ พนวจสมการพื้นฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อท่านายการอบแห้งข้าวบางมีตั้งที่สูงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รูปแบบสมการการอบแห้งข้าวบาง

Model equation	Name of model	References
$MR = \exp(-kt)$	Newton	Liu and Bakker – Arkema(1997)
$MR = \exp(-kt^n)$	Page	Sharma and Prasad (2001)
$MR = \exp[-(kt)^n]$	Modified Page	Diamante and Munro (1993)
$MR = a\exp(-kt)$	Henderson and Pabis	Doymaz (2004)
$MR = a \exp(-kt) + c$	Logarithmic	Temple and Van Boxtel (1999)
$MR = 1 + at + bt^2$	Wang and Singh	Ozdemir and Devres (1999)
$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	Two-term	Rahman et al. (1998)
$MR = a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-kt)$	Diffusion approach	Kassem (1998)

เมื่อ a, b และ k คือ ค่าคงที่ และ t คือ ระยะเวลาอบแห้ง

การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสมการการอบแห้งข้าวบางใช้เทคนิคการวิเคราะห์ผิดถอยแบบไม่เป็นเรียงเส้น (Nonlinear Regression) นอกจากนี้ยังใช้ค่า (root mean square error, RMSE) เป็นตัวบ่งชี้ ที่แสดงความสามารถในการคำนวณของสมการ ซึ่งนิยามของ RMSE มีดังนี้

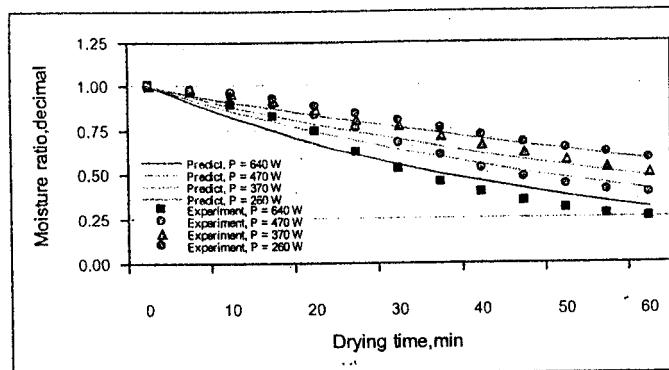
$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{Prediction}} - MR_{\text{Experiment}})^2}{N} \right]^{1/2} \quad (2)$$

เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

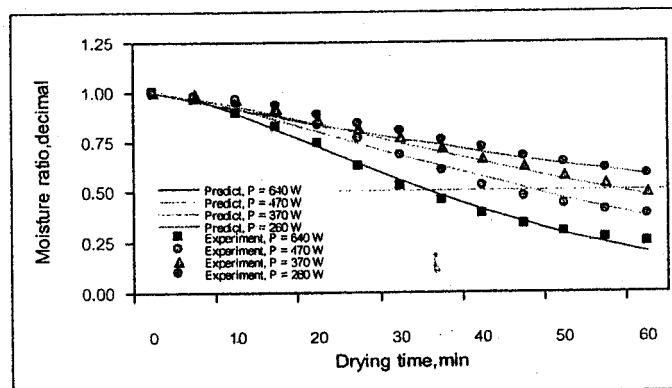
ผลการทดสอบและวิจารณ์

ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ การอบแห้งเนื้อตัวยกลับขึ้นกับรังสีอินฟราเรด เพื่อหาสมการการอบแห้งข้าวบางที่เหมาะสมที่สุด สำหรับอินไซด์ดิกรัมการอบแห้ง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

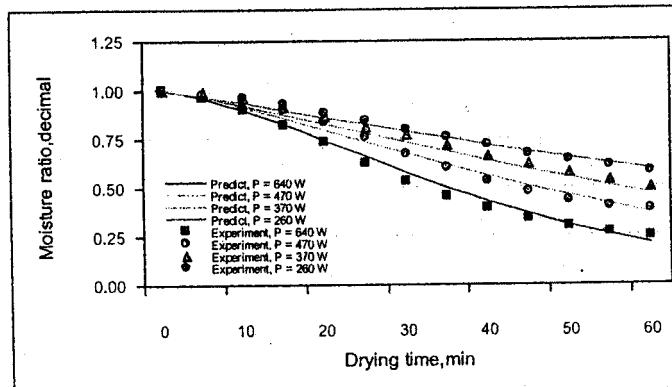
จาก群ที่ 1 – 8 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งเนื้อที่กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ และทำนายผลตามรูปแบบสมการต่าง ๆ



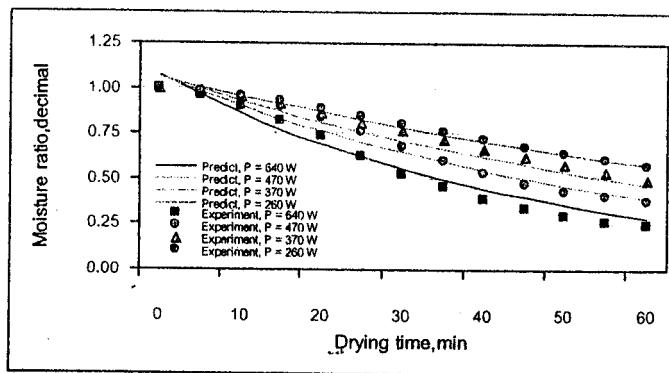
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Newton ที่ความเร็วลม 0.3 m/s .



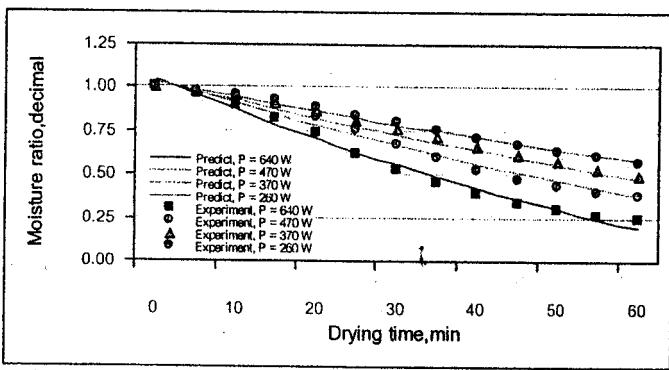
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Page ที่ความเร็วลม 0.3 m/s .



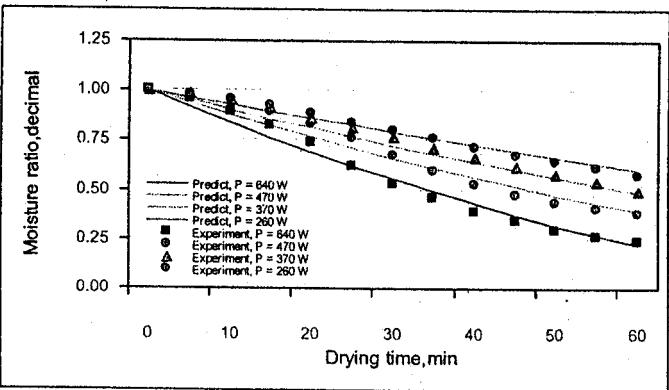
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Modified Page ที่ความเร็วลม 0.3 m/s .



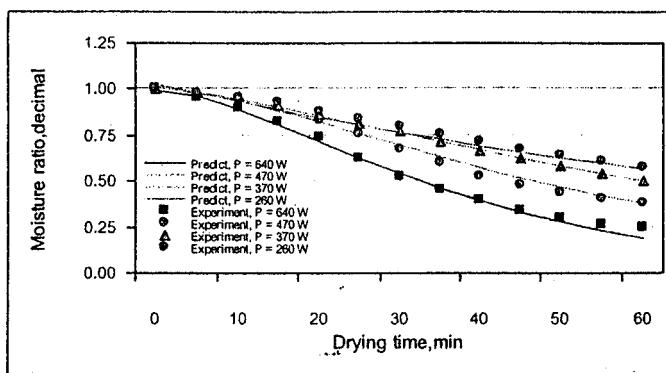
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Henderson and Pabis ที่ความเร็วลม 0.3 m/s.



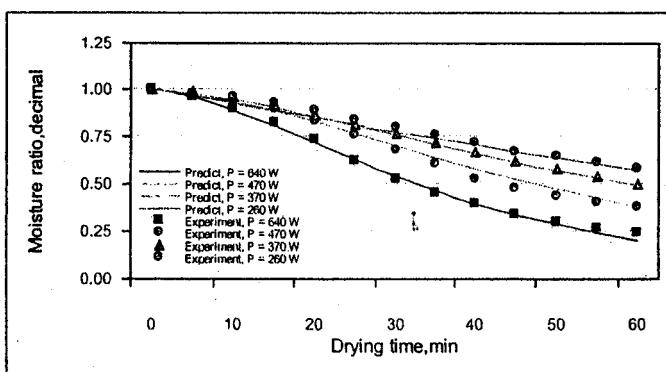
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Logarithmic ที่ความเร็วลม 0.3 m/s.



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Wang and Singh ที่ความเร็วลม 0.3 m/s.



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Two-term ที่ความเร็วลม 0.3 m/s.



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบของสมการ Diffusion approach ที่ความเร็วลม 0.3 m/s.

จากการทดลองหาอัตราการอบแห้งขั้นบางของเนื้อ โดยได้ทำการศึกษาที่ความเร็วลม 0.1 – 1.0 m/s กำลังงาน 260 – 640 W ได้ทำการเปรียบเทียบสมการทางคณิตศาสตร์ตามสมการอบแห้งขั้นบางที่สรุปไว้ในตารางที่ 1 และผลการวิเคราะห์ค่าคงที่ต่างๆ นักค้างคาวที่ได้ไปพิจารณาในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์โดยพิจารณาถึงอิทธิพลของกำลังไฟฟ้าและความเร็วลมซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$a, b, c, k_0 \text{ และ } k_i = x_0 + x_1 P + x_2 V + x_3 PV \quad (3)$$

เมื่อ a, b, c, k_0 และ k_i คือ ค่าคงที่ของสมการการอบแห้ง

P คือ ค่ากำลังไฟฟ้า, วัตต์

V	คือ	ค่าความเร็วคง, m/s
x_i	คือ	ค่าคงที่ของสมการ (3)

ตารางที่ 2 แสดงค่าคงที่ของสมการการอบแห้งขั้นบัง

Model	Parameter	x_0	x_1	x_2	x_3	R^2	RMSE
Newton	k	0.004143	2.88E-05	-0.00759	-3.9E-06	0.98276	0.039416
Page	k	0.001365	3.79E-06	0.006492	-9E-06	0.99379	0.023726
	n	1.256752	0.000447	-0.6731	0.000638		
Modified Page	k	0.003092	3.61E-05	-0.00742	-8.6E-06	0.99206	0.026808
	n	0.986055	0.001033	-0.22899	-0.00032		
Henderson and Pabis	k	0.004655	3.23E-05	-0.00888	-4.8E-06	0.98807	0.032834
	a	1.091371	-2.3E-05	-0.13153	0.000166		
Logarithmic	k	0.002782	1.15E-05	0.004334	-9E-06	0.99255	0.025974
	a	1.454142	0.001086	-1.48217	0.001208		
	c	-0.44039	-0.00101	1.488648	-0.00126		
Wang and Singh	a	-0.00101	-2.9E-05	0.001633	1.15E-05	0.99003	0.030033
	b	-4.3E-05	1.9E-07	4.42E-05	-1.6E-07		
Two-term exponential	k_0	0.01364	-1.4E-05	-0.01318	2.55E-05	0.99625	0.018438
	k_1	-0.01563	2.47E-05	0.016817	-3.6E-05		
	a	4.045511	0.000356	-6.00538	0.009311		
	b	-2.96449	-0.00041	5.888921	-0.00913		
Diffusion approach	k	0.037812	6.23E-05	-0.05353	2.76E-05	0.99580	0.019508
	a	0.588008	-0.00326	-0.00133	0.001484		
	b	0.046051	0.000883	0.095618	-0.00037		

จากตารางที่ 2 แสดงค่าคงที่ของสมการการอบแห้งขั้นบัง , R^2 และ RMSE โดยสมการการอบแห้งขั้นบังทั้ง 8 สมการซึ่ง พบว่าสมการ Two-term exponential สามารถทำนายผลการอบแห้งเนื้อตัวย้อมร้อนร่วมกับอินฟราเรดได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 มากที่สุด(0.99625) และค่า RMSE น้อยที่สุด(0.018438) นอกจากนี้ หากจัดเรียงความสามารถในการทำนายผลการอบแห้ง จากรากไปหัวน้อยจะได้ดังนี้ Two-term exponential, Diffusion approach, Page, Logarithmic, Modified Page, Wang and Singh, Henderson and Pabis และ Newton ตามลำดับ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลอง และศึกษาการอบแห้งเนื้อวัวยลร้อนร่วมกับอินฟราเรด โดยนำผลการทดลองมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับสมการคณิตศาสตร์ทั้ง 8 สมการ พบร่วมกัน Two-term exponential สามารถทำนายผลการอบแห้งเนื้อวัวยลร้อนร่วมกับอินฟราเรดได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 มากที่สุด และค่า RMSE น้อยที่สุด

กิตติกรรมประการ

งานวิจัยนี้ได้การสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกอ.) และสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.)

เอกสารอ้างอิง

- Diamante, L.M and Munro, P. A . 1993. Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*. 51. 271-276.
- Doymaz, I . 2004. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*. 61. 359-364.
- Kassem, A. S. 1998. Comparative studies on thin layer drying model for wheat. In 13 th international congress agricultural engineering . 2-6 February. Morocco vol.6
- Lui Q and Bakker – Arkema F W . 1997. Stochastic modeling of grain drying , part 2 ; model development. *Journal of Agricultural Research*. 66. 275 – 289.
- Ozdemir, M and Devres, Y. O. 1999. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering* . 42. 225-233.
- Rahman, M. S and Perera, C. O. 1998. Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas. *Food Research International*. 30. 485-491.
- Sharma,G. P and Prasad, S. 2001. Drying of garlic cloves by microwave-hot air combination. *Journal of Food Engineering*. 50. 99-105.
- Temple,S. J and Boxtel,A . J. B . 1999. Van Thin layer drying of black tea. *Journal of Agricultural and Engineering Research*. 74. 167-176.

วิศวกรรมศาสตร์ มข. ปีที่ 33 ฉบับที่ 2 (169-180) มีนาคม - เมษายน 2549
 KKU Engineering Journal Vol. 33 No. 2 (169-180) March – April 2006

การอุบแห้งเนื้อด้วยรังสีอินฟราเรด *

จำพงษ์ กีบุญมา¹ ธนกฤต สุวรรณภูมิ² และ สมชาติ โสกันต์ฤทธิ์²

¹⁾ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินช้าราน จ.อุบลราชธานี 34190

²⁾ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

Email: enauumpte@ubu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอุบแห้งเนื้อด้วยรังสีอินฟราเรด ซึ่งมีเงื่อนไขในการทดลอง คือ อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส ความเร็วลมที่ไหลผ่าน ตัวอย่างอยู่ในช่วง 0.1-1.0 เมตร/วินาที และกำลังงานที่จำเป็นให้กับแห้งอินฟราเรดอยู่ระหว่าง 260 ถึง 640 วัตต์ โดยกำหนดให้ระห่ำห่างระหว่างรังสีอินฟราเรดกับผิวภัณฑ์และขนาดผิวภัณฑ์คงที่ ผลจาก การทดลองพบว่าจะสามารถลดเวลาการอุบแห้งลงได้เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลมและลดกำลังไฟฟ้าที่จำเป็นให้กับแห้งรังสีอินฟราเรด นอกเหนือนั้นยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อเพิ่มมากขึ้น เมื่อตัดความเร็วลมและเพิ่ม กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแห้งรังสีอินฟราเรด

คำสำคัญ : การอุบแห้ง / การแห้งรังสีอินฟราเรด / เนื้อด้วยรังสี

* รับต้นฉบับเมื่อวันที่ 11 มกราคม 2549 และได้รับบทความคิดเห็นแก้ไขเมื่อวันที่ 28 มีนาคม 2549

170

อ่าไฟศักดิ์ ทีบูญมา ธนากร สุวรรณภูมิ และ สมชาติ ไสกนรนกุล*

Beef drying using infrared radiation *

Umphisak Teeboonma¹⁾ Tanapat Suwanakoot¹⁾ and Somchart Soponronnarit²⁾

¹⁾ Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani 34190

²⁾ School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

Email: enaumpte@ubu.ac.th

ABSTRACT

The objective of this research is to study beef drying using far-infrared radiation. Experiments were conducted under the following conditions: air temperature entering drying chamber of 40°C, air velocity ranging from 0.1-1.0 m/s and input power of infrared heater ranging from 260-640 W, whereas, distance between the infrared source and the product as well as the product size are fixed. Experimental results can be summarized as the followings: Firstly, the drying time was increased with increasing air velocity and it was also increased with decreasing input power of infrared heater. Finally, it was revealed that a change of beef colour was increased with decreasing air velocity and increasing infrared heater power.

Keywords : Drying / infrared radiation / Beef drying

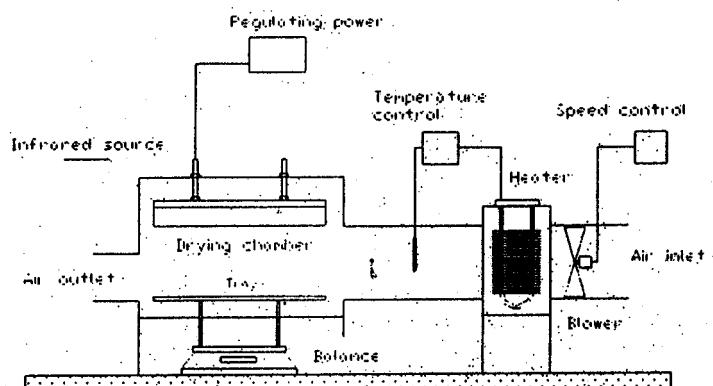
* Original manuscript submitted: January 11, 2006 and Final manuscript received: March 28, 2006

บทนำ

การอบแห้ง หรือการลดความชื้นสามารถทำได้หลากหลายวิธีด้วยกัน เช่น การอบแห้งด้วยไฟน้ำร้อนนယดยิ่ง การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ การอบแห้งด้วยสูญญากาศ การอบแห้งด้วยบีบความร้อน การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด การอบแห้งในแต่ละวิธีก็จะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป ด้วยปัจจัย เช่น การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากมีต้นทุนในการสร้างเครื่องที่ต้องซื้อตัวมาเพื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ ที่ได้รับการพัฒนา (Chu *et al.*, 2003) เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนสามารถใช้แหล่งความร้อนได้จากหลายแหล่งที่หาได้ง่าย เช่น จากขุดลอกความร้อน น้ำมันเชื้อเพลิง แก๊สหุงต้ม (LPG) พลังงานแสงอาทิตย์ หรือความร้อนทิ้งจากการบวนต่างๆ ในโรงงาน สำหรับแหล่งพลังงานความร้อนที่ถูกทิ้งสูญ คือ พลังงานแสงอาทิตย์ แต่ก็มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถทำได้หากสภาพอากาศไม่เอื้ออำนวย และต้องใช้พื้นที่มาก (Soponronnarit *et al.*, 1992) ส่วนใหญ่ของการผลิตต่างๆ นอกเหนือจากการอบแห้งด้วยลมร้อนแล้วยังมีอีกวิธีหนึ่งที่มีต้นทุนต่ำ (Chu *et al.*, 2003, Isengard 1995) คือ การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด รังสีอินฟราเรดมีการแบ่งย่อยออกได้ 3 ระดับ คือ รังสีอินฟราเรดใกล้ (Near infrared, NIR) ช่วงความยาวคลื่น 0.75 - 3 μm รังสีอินฟราเรดกลาง (Middle infrared, mid-IR) ช่วงความยาวคลื่น 3 - 25 μm และรังสีอินฟราเรดไกล (Far infrared, FIR) ช่วงความยาวคลื่น 25 - 100 μm รังสีอินฟราเรดมีจุดเด่นที่น่าสนใจ คือ ประการแรก พลังงานจากรังสีอินฟราเรดจะถูกแผ่ไปยังวัสดุซึ่งจะทำให้ไม่เกลอกของน้ำภายในวัสดุสั่น และเกิดความร้อนขึ้นซึ่งจะทำให้อุณหภูมิภายในวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว (Sakai *et al.*, 1994, Glouanneec *et al.*, 2002) จุดเด่นของรังสีอินฟราเรดคือไม่ต้องใช้ตัวรับความร้อนแห้งที่สูง ลดระยะเวลาการอบแห้งและพลังงานที่ใช้ด้วย ประการที่สองหลอดรังสีอินฟราเรดให้ heat flux ที่ต่อน้ำหนักสูง (Afzal *et al.*, 1998, Sheridan *et al.*, 1999, Hashimoto *et al.*, 1999) ดังนั้นอุปกรณ์จึงมีขนาดเล็ก ทำให้สามารถออกแบบเครื่องอบแห้งที่มีขนาดกะทัดรัด ช่วยลดเงินลงทุนในการสร้างเครื่องอบแห้ง ประการที่สามการให้ความร้อนโดยการแผ่รังสีจะทำให้อุณหภูมิภายนอกต่อต้านชั้น表皮 ไม่ส่งผลกระทบต่อตัวรับความร้อน จึงมีอุณหภูมิภายนอกต่อต้านชั้น表皮 ไม่สูง จึงไม่ต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นการลดต้นทุนอุปกรณ์พร้อมทั้งค่าพลังงาน และประการสุดท้าย คือ รังสีอินฟราเรดสามารถนำไปใช้ควบคู่กับระบบอินได้รับความนิยมเนื่องจากใช้พื้นที่ในการติดตั้งที่น้อย ไม่มีความซับซ้อนของระบบ และตอบสนองต่อการควบคุมได้รวดเร็ว (Chu *et al.*, 2003) จากข้อสรุปเบื้องต้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการอบแห้งเนื้อตัวยรังสีอินฟราเรด เนื่องจากร้านอาหารส่วนใหญ่จะมีรายการอาหารเนื้อแห้ง หรือเนื้อแฉดเดียว และการผลิตในปัจจุบันใช้วิธีดักแด้ด ซึ่งจะมีปัญหาระบบความสะอาด เช่น ฝุ่น และแมลงต่างๆ ดังนั้นหากสามารถนำเนื้ออ้วกมาอบในตู้อบอินฟราเรดจะเป็นช่วยแก้ปัญหาระบบความสะอาด และยังช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้ง

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้เป็นเครื่องอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไกส์ร่วมกับลมร้อนดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกส์

ขนาดของห้องอบแห้งเท่ากับ $30 \times 50 \times 25$ cm (กว้าง x ยาว x สูง) อุปกรณ์ให้ความร้อนเป็นแห้งรังสีอินฟราเรดขนาด 650 W ระยะห่างระหว่างแห้งรังสีอินฟราเรดกับผิวตัวอย่างเท่ากับ 15 cm ในแนวตั้งจาก และทดสอบความร้อนขนาด 800 W พัดลมที่ใช้เป็นแบบไอลดามแนวแกนสามารถปรับเปลี่ยนความเร็วอบได้ อุณหภูมิอากาศที่ต่ำแห้งคงค่าวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปลี่ยนชนิด K ต่อเข้ากับ data logger โดยในส่วนของการวัดอุณหภูมิผลิตภัณฑ์จะตั้งที่ต่ำแห้งกึ่งกลางของความหนาผลิตภัณฑ์ ซึ่งทำการวัดจำนวน 3 ชั้น โดยในแต่ละชั้นทำการวัดจำนวน 3 จุด ซึ่งข้อมูลที่ได้จะนำมาคำนวณโดยใช้ hot wire anemometer การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผลิตภัณฑ์อ่านค่าจากเครื่องชั่งแบบดิจิตอล ในการทดลองอบแห้งนี้อ้วนจะควบคุมอุณหภูมิขาเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส ส่วนแห้งรังสีอินฟราเรดป้อนพลังงานในช่วง 260 - 640 วัตต์ และเปลี่ยนแปลงความเร็วลมอยู่ระหว่าง 0.1 - 1.0 m/s เมื่อที่ใช้ทดลองมีขนาดเท่ากับ $3 \times 5 \times 1$ cm. (กว้าง x ยาว x สูง) จากการสุ่มตัวอย่างเนื้อแ砧เดียวในห้องตู้มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 20°C มีความชื้นโดยเฉลี่ยประมาณ 140 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง สำหรับเนื้อที่นำมาทำเนื้อแ砧เดียวมีค่าความชื้นเริ่มต้นโดยเฉลี่ยประมาณ 300 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง เมื่อคำนวณหาค่าอัตราส่วนความชื้นพบว่าอยู่ในช่วง 0.45 - 0.5 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาและวิเคราะห์ผลในช่วงที่อัตราส่วนความชื้นสอดคล้องกับเนื้อแ砧เดียวที่วางแผนท้องตลาด

สำหรับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อนั้นวัดโดยใช้เครื่องวัดสี และคำนวณหาการเปลี่ยนของสีจากสมการที่ (1)

การอบแห้งเนื้อคั่วยังสีอินฟราเรด

173

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (1)$$

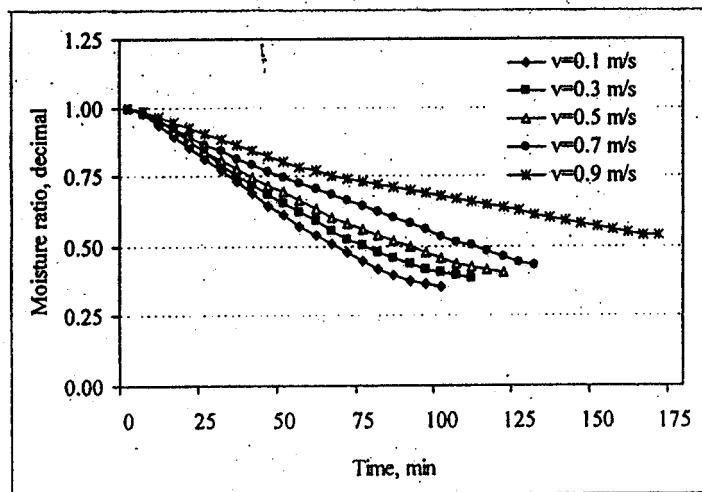
เมื่อ

- ΔE = ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี
 ΔL = ค่าผลต่างของความสว่างของผลิตภัณฑ์
 Δa = ค่าผลต่างของสีแดงกับสีขาวของผลิตภัณฑ์
 Δb = ค่าผลต่างของสีเหลืองกับสีเขียวของผลิตภัณฑ์

ผลและวิจารณ์

ผลของความเร็วลมและกำลังวัตต์ต่อระยะเวลาบนแห้งและอุณหภูมิ

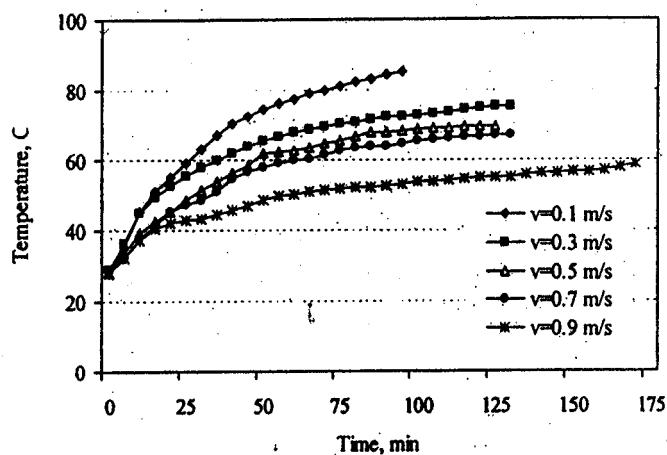
รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งเนื้อวัวที่ความเร็วลมต่าง ๆ การทดสอบอยู่แห้งหน้าไฟ Power เท่ากับ 260 W กับแห้งรังสีอินฟราเรด จากการทดสอบพบว่า อัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลา และที่ความเร็วลม 0.1 m/s จะมีอัตราส่วนความชื้นลดลงเร็วที่สุด เมื่อเทียบกับความเร็วลมต่าง ๆ



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR)เท่ากับ 260 W

เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 เป็นเกณฑ์ในการเบริญเทียน ให้ความเร็วลมที่ 0.1 m/s เป็นค่าอ้างอิงเบริญเทียนกับความเร็วลม 0.3 m/s พบว่าเวลาในการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น 15 เปลอร์เซ็นต์ และเมื่อเบริญเทียนกับที่ความเร็วลม 0.5 m/s, 0.7 m/s และ 0.9 m/s พบว่าจะต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นเป็น 38, 69 และ 146 เปลอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าที่อัตราการไหลของอากาศต่ำ จะมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าที่อัตราการไหลของอากาศสูง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าอัตราการ

ให้เหลืองอากาศที่สูงส่งผลทำให้อุณหภูมิที่ผิวและภายในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นน้อยกว่าในกรณีอัตราการไหลต่ำ จึงส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลงด้วย ดังจะเห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ได้จากรูปที่ 3



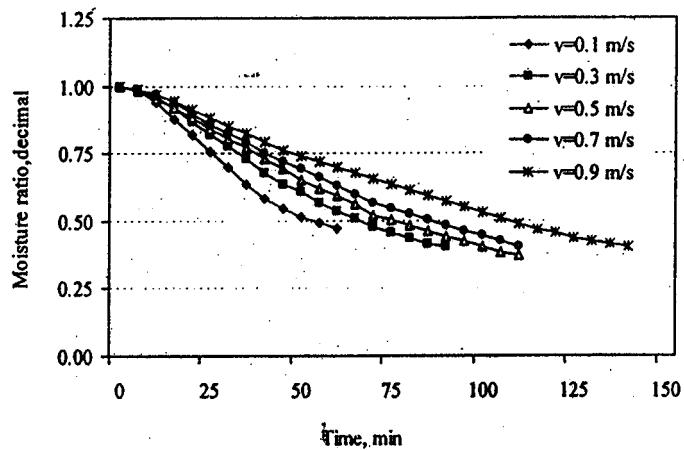
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผลิตภัณฑ์กับเวลาเมื่อใช้ Power (IR) เท่ากับ 260 W

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาในการอบแห้ง ที่ความเร็วลมต่าง ๆ พนวนาอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดจุดหนึ่งอุณหภูมิผลิตภัณฑ์จะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย เนื่องจากผลิตภัณฑ์เริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล พลังงาน หากเบรย์นเทียบที่ความเร็วลมต่าง ๆ จะเห็นว่าที่ความเร็วลม 0.1 m/s จะมีความชันของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากที่สุด และอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ก็จะสูงกว่าที่ความเร็วลมอื่นตัวอย่าง นอกจากนี้เมื่อเบรย์นเทียบกับทุกความเร็วลม ความเร็วลมที่มากขึ้นจะได้กราฟที่มีความชันลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าความเร็วลมมากทำให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเนื้อวันน้อยลง เนื่องจากอากาศนอกจจะนำพาเอาความชื้นของผลิตภัณฑ์ออกไปแล้ว ยังนำพาเอาความร้อนจากบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ออกไปด้วย ดังนั้นเมื่อความเร็วลมเพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลให้อุณหภูมิผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นน้อยลง

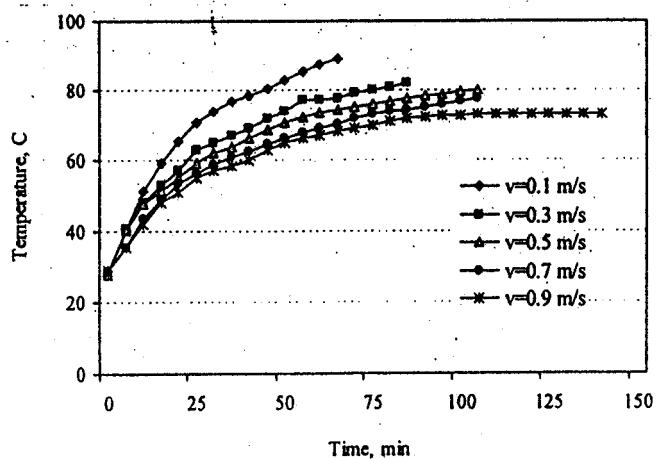
รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เป็นการทดลองอบแห้งโดยป้อน Power เท่ากับ 370 W ให้กับแห้งรังสีอินฟราเรด เมื่อใช้อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 เป็นเกณฑ์ในการเบรย์นเทียบ และกำหนดให้ที่ความเร็วลม 0.1 m/s เป็นค่าอ้างอิงเบรย์นเทียบกับที่ความเร็วลม 0.3 m/s พนวนาเวลาในการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น 30 เบอร์เซนต์ และเมื่อเบรย์นเทียบกับที่ความเร็วลม 0.5 m/s, 0.7 m/s และ 0.9 m/s พนวนาเวลาจะต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นเป็น 50, 70 และ 110 เบอร์เซนต์ ตามลำดับ สำหรับเหตุผลที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้ในท่านองเดียวกับกรณีที่ผ่านมาในส่วนของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสำหรับกรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5

การอบแห้งเนื้อคิวบ์รังสีอินฟราเรด

175



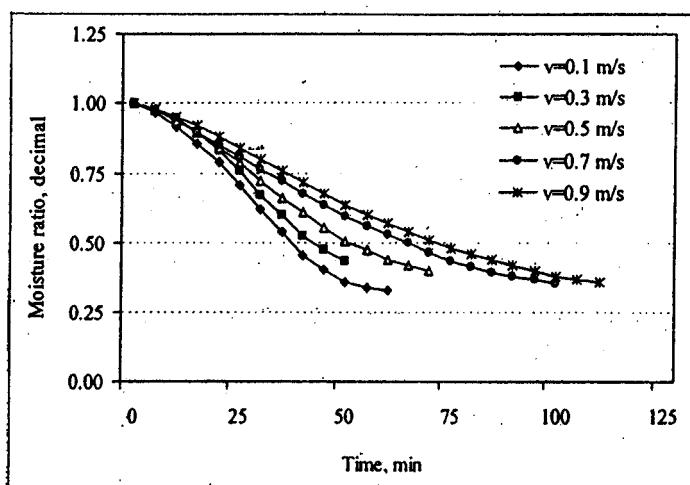
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) เท่ากับ 370 W



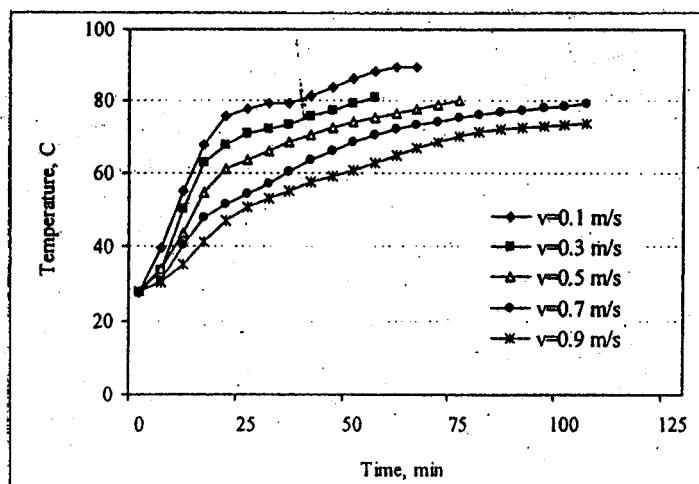
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผลิตภัณฑ์กับเวลาเมื่อใช้ Power (IR) เท่ากับ 370 W

ในรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาในการอบแห้งพบว่า แนวโน้มของgrafจะคล้ายกับรูปที่ 3 คือเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นอุณหภูมิผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นอย่างกว่ากรณีที่ความเร็วลมต่ำ

ในรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยป้อน Power เท่ากับ 470 W ให้กับแท่นรังสีอินฟราเรด จากรูปจะเห็นว่าที่ความเร็วเท่ากับ 0.1 m/s จะสามารถลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้เร็วที่สุด ในขณะที่ความชื้นจะลดลงช้าที่สุดเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 0.9 m/s



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) เท่ากับ 470 W

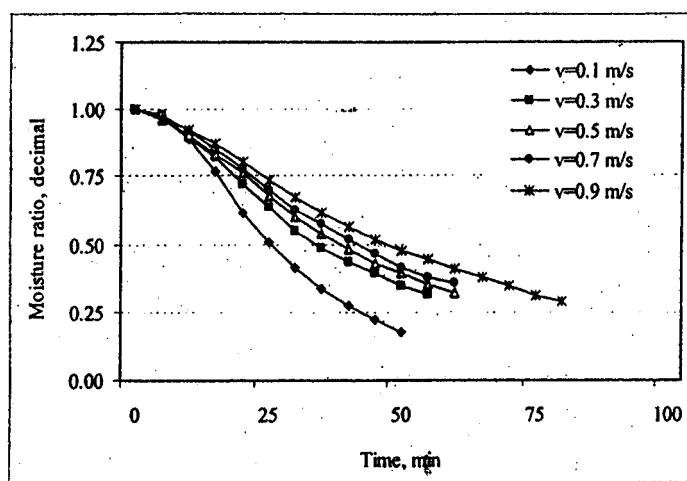


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผลิตภัณฑ์กับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) เท่ากับ 470 W

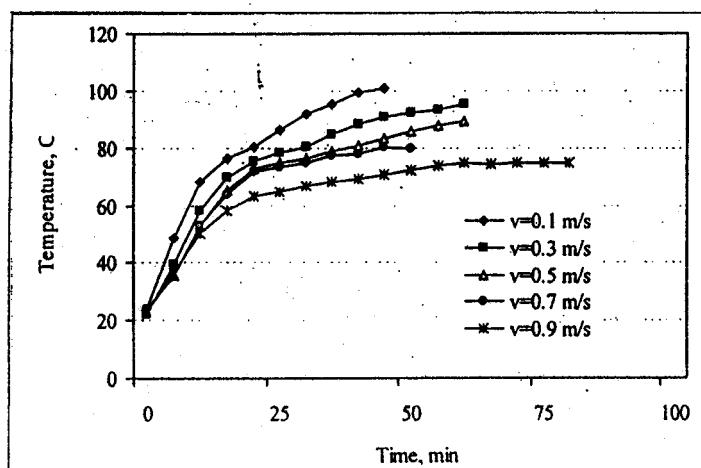
ในรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาในการอบแห้ง พบร่วมกับโน้มของกราฟคล้ายกับรูปที่ 3 โดยเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นอุณหภูมิผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นอย่างลง

ในรูปที่ 8 และ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา และความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผลิตภัณฑ์กับระยะเวลา ตามลักษณะที่มี Power เท่ากับ 640 W ให้กับแห้งรังสีอินฟราเรด จากผลการทดลองจะเห็นว่ามีแนวโน้มที่คล้ายกับกรณีที่แห้งมา กล่าวคือ อัตราการลดลงของความชื้นจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความเร็วลมต่ำๆ ในขณะที่อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน

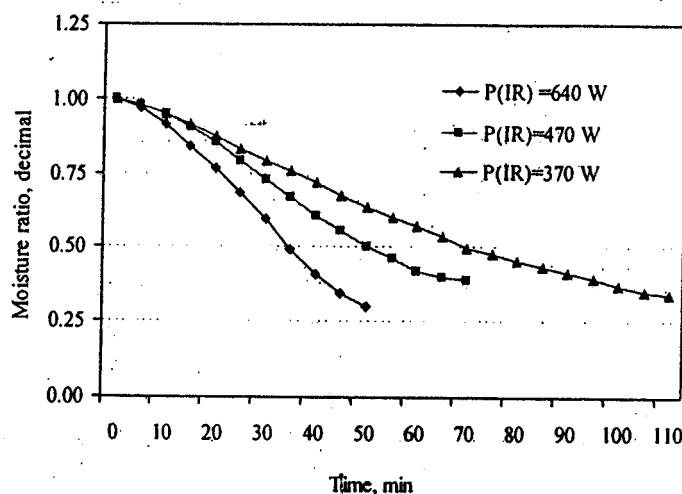
การอบแห้งเนื้อคั่วยรังสีอินฟราเรด



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) เท่ากับ 640 W



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผลิตภัณฑ์กับเวลา เมื่อใช้ Power (IR) เท่ากับ 640 W



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่กำลังวัดต่ออินฟราเรดต่าง ๆ เมื่อความเร็วลมเป็นคุณย์

ในรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา โดยกำหนดให้ความเร็วลม เป็นคุณย์ จากกราฟที่ Power เท่ากับ 640 W จะมีอัตราส่วนความชื้นลดลงเร็วที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ power อื่น ๆ หากกำหนดให้อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ พบว่าที่ power เท่ากับ 640 W จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าที่ power เท่ากับ 470 W และ 370 W เท่ากับ 43 และ 100 เบอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการแห้งอินฟราเรดปล่อยพลังงานให้กับผลิตภัณฑ์มากขึ้น ตามกำลังที่ป้อนให้ ทำให้อุณหภูมิผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้น้ำในเนื้อระเหยได้เร็วขึ้น

ผลการทดลองของกรณีนี้ไม่ได้นำไปเปรียบเทียบกับที่ความเร็วอื่น ๆ เนื่องจากที่ความเร็วลม เป็นคุณย์ อัตราส่วนความชื้นกับเวลาจะมีค่าใกล้เคียงกับที่ความเร็วลม 0.3 และ 0.5 m/s เมื่อนำมาเปรียบ กราฟจะได้ค่าใกล้เคียงกันมากทำให้เส้นกราฟที่ได้ทับกัน และยากต่อการสังเกต ดังนั้นจึงได้นำเสนอแยก ต่างหาก

ผลของความเร็วลมและกำลังวัตต์ต่อการเปลี่ยนแปลงของสี

จากผลการทดลองดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 สามารถสรุปการเปลี่ยนแปลงของสีได้ดังนี้

- เมื่อกำหนดให้กำลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแห้งอินฟราเรดคงที่ พบว่าการเปลี่ยนแปลง ของสีจะเพิ่มมากขึ้นถ้าลดความเร็วลม ทั้งนี้เนื่องจากการลดความเร็วลมลง จะส่งผลทำให้อุณหภูมิผิวเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีค่อนข้างมาก

การอบแห้งเนื้อตัวบัวรังสีอินฟราเรด

179

2. เมื่อกำหนดให้ความเร็วลมคงที่ พบว่าการเปลี่ยนของสีจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแห้งอินฟราเรด ซึ่งเกิดจากการที่ผลิตภัณฑ์ได้รับพลังงานมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์มีค่าสูง ส่งผลให้สีที่ผิวค่อนข้างเข้ม

Power (IR), W	Air velocity, m/s	การเปลี่ยนแปลงสี (ΔE)
640	0.3	28.2
640	0.5	21.7
640	0.7	13.5
470	0.3	15.8
470	0.5	12.6
470	0.7	8.6
370	0.3	9.2
370	0.5	8.2
370	0.7	7.2

ตารางที่ 1 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงของสี

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการอบแห้งเนื้อตัวบัวรังสีอินฟราเรด ซึ่งได้ศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลม และกำลังวัตต์ของอินฟราเรดต่อระยะเวลาอบแห้ง อุณหภูมิ และสีของผลิตภัณฑ์ จากการศึกษาพบว่า เมื่อลดความเร็วลม และเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแห้งอินฟราเรด จะมีผลทำให้ระยะเวลาการอบแห้ง ลดลง ในขณะเดียวกันอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่า การเปลี่ยนแปลงของสีนี้จะเพิ่มมากขึ้น เมื่อลดความเร็วลม และเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแห้งอินฟราเรด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.)

เอกสารอ้างอิง

- Afzal, T.M. and Abe, T. 1998. "Diffusion in potato during far infrared radiation drying". *Journal of Food Engineering*. 37: 353-365.
- Afzal, T.M. and Abe, T. 2000. "Simulation of moisture changes in barley during far infrared radiation drying". *Computers and Electronics in Agriculture*. 26: 137-145.
- Chu, K.J. and Chou, S.K. 2003. "Low-cost drying methods for developing countries". *Trends in Food Science & Technology*. 14: 519-528.

檠ໄພສັກດີ ທຶນຍູ້ມາ ຮັນກ່າງ ສຸວະນະຖົງ ແລະ ສມຈາດ ໂສກດນຮອດຖົກທີ່

- Gloannec, P., Lecharpentier, D., and Noel, H. 2002. "Experimental survey on the combination of radiating infrared and microwave sources for the drying of porous material". *Applied Thermal Engineering*. 22:1689-1703.
- Hashimoto, A. and Kameoka, T. 1999. "Effect of infrared irradiation on drying characteristics of wet porous materials." *Drying Technology-An International Journal*. 17: 1613 - 1626.
- Isengard, H.D. 1995. "Rapid water determination in foodstuffs". *Trends in Food Science & Technology*. 6: 155-162.
- Sakai, N. and Hanzawa, T. 1994. "Applications and advances in far-infrared heating in Japan". *Trends in Food Science & Technology*. 5: 357-362.
- Sheridan, P. and Shilton, N. 1999. "Application of far infrared radiation to cooking of meat Products". *Journal of Food Engineering*. 41: 203-208.
- Soponronnarit, S., Nattawut, D., Hirunlabh, J., Namprakai, P., and Thepa, S. 1992. "Computer Simulation of Solar Energy Assisted Fruit Drying". *RERIC International Energy Journal*. 14: 59-70.

วิชาการมหาฯ ปีที่ 34 ฉบับที่ 2 (189 - 201) มีนาคม - เมษายน 2550
 KKU Engineering Journal Vol. 34 No. 2 (189 - 201) March - April 2007

นบทวิจัย

การศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อน และลมร้อนร่วมรังสีอินฟราเรด *

อ่ำไพสก็อต ทีบุญญา^{*} และ ธนกัตร สุวรรณภูมิ^{*}

^{*}คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชาราน จ.อุบลราชธานี 34190

Email: enaumpte@ubu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาเปรียบเทียบผลงานทางการอบแห้งและความสันเปลือง พลังงาน ของการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมรังสีอินฟราเรด ซึ่งมีตัวแปรที่ศึกษา คือ อุณหภูมิอบแห้ง ความเร็วลม และกำลังงานที่ใช้ให้กับแท่นแห้งอินฟราเรด โดยระบะห่างระหว่างแท่ง อินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์และขนาดของผลิตภัณฑ์คงที่ สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษา เปรียบเทียบสมรรถนะการอบแห้ง คือ ระยะเวลาการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง และความสันเปลือง พลังงานจำเพาะ ผลจากการศึกษาพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ใช้ระยะเวลาการ อบแห้งสั้น อัตราการอบแห้งสูง และมีความสันเปลืองพลังงานจำเพาะที่สุด เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลม ร้อนเพียงอย่างเดียว นอกจากนั้นยังพบว่า การอบแห้งเพื่อตัวบล็อกร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ควรใช้ ความเร็วลมอย่างน้อย 0.3 m/s เพื่อให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

คำสำคัญ : การอบแห้ง, รังสีอินฟราเรด, ลมร้อน

* รับต้นฉบับเมื่อวันที่ 22 กันยายน 2549 และได้วันนบทความดีบันแกล้วเมื่อวันที่ 8 มกราคม 2550

Comparative Study of Drying using Hot Air and Hot Air-Infrared Radiation *

Umphisak Teeboonma¹⁾ and Tanapat Suwanakoot¹⁾

¹⁾ Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani 34190

Email: enaumpte@ubu.ac.th

ABSTRACT

The research aims to investigate and compare the drying kinetics and energy consumption of two drying configurations which are only hot air and combined hot air-infrared radiation. Parameters varied in this study are drying air temperature, air velocity, and input power of an infrared heater. The distance between an infrared source and the product is constant. The product size is also kept constant. To compare the drying performance, measured parameters are drying time, drying rate, and specific energy consumption. From experiments, the combined hot air-infrared radiation provides shorter drying time, higher drying rate, and lower specific energy consumption than those of the only hot air system. Moreover, in the hot air-infrared system, it is recommended that the hot air velocity should be at least 0.3 m/s in order to control the product quality being in an acceptable range.

Keywords : Drying , Infrared radiation , Hot air

* Original manuscript submitted: September 22, 2006 and Final manuscript received: January 8, 2006

บทนำ

ปัญหาด้านพัฒนา เป็นปัญหาที่มีความสำคัญสำหรับประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยมีปริมาณความต้องการใช้พัฒนาในด้านต่างๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทุกปี เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง หรือพัฒนาไฟฟ้า ซึ่งพัฒนาเหล่านี้มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจ และการพัฒนาประเทศในด้านต่างๆ ดังนั้น เพื่อป้องกันผลกระทบของปัญหาด้านพัฒนา การส่งเสริมให้มีการใช้พัฒนาอย่างถูกต้อง จึงเป็นประเด็นที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนในอนาคต การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ ซึ่งในกระบวนการจะมีการใช้พัฒนาต่อหน้าห้องสูด ดังนั้นการหาแนวทางการใช้พัฒนาอย่างมีประสิทธิภาพในการอบแห้งจึงเป็นเรื่องที่關注ในใจ การลดความชื้นของผลิตภัณฑ์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนやすดิย์ การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด และการอบแห้งด้วยน้ำมันความร้อน ซึ่งการอบแห้งในแต่ละวิธีจะมีทั้งข้อดีและข้อเสีย เช่น การอบแห้งด้วยลมร้อน เป็นเทคโนโลยีที่มีการใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีต้นทุนในการสร้างเครื่องที่ต่ำเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ ที่ได้กล่าว (Chu et al., 2003) นอกจากนี้จากการอบแห้งด้วยลมร้อนแล้วยังมีอิทธิพลที่มีต้นทุนต่ำ ก็คือ การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (Chu et al., 2003; Isengard, 1995) ซึ่งมีจุดเด่นที่น่าสนใจ ก็คือ ประการแรก พัฒนาจากวงรังสีอินฟราเรดจะถูกແแปลงสู่รังสีที่ทำให้ไม่เกิดความร้อนสูง และเกิดความร้อนขึ้น ทำให้อุณหภูมิภายในวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว (Gloouanne et al., 2002; Sakai et al., 1994) ประการที่สอง แห้งรังสีอินฟราเรดให้ heat flux สูง (Afzal et al., 1998; Sheridan et al., 1999; Hashimoto et al., 1999) ดังนั้นอุปกรณ์จะมีขนาดเล็ก ทำให้สามารถติดตั้งแบบเครื่องอบแห้งที่มีขนาดกะทัดรัด ประการที่สาม การให้ความร้อนโดยการแผ่รังสีจะทำให้อุณหภูมิกระชาบต่อน้ำหนักน้ำหนัก (Afzal et al., 2000) และต้องการอากาศหมุนเวียนเพียงเล็กน้อย ทำให้สามารถใช้พัดลมขนาดเล็ก ซึ่ง เป็นการลดทั้งต้นทุนอุปกรณ์ และค่าพลังงาน และประการสุดท้าย ก็คือ รังสีอินฟราเรดสามารถนำไปใช้ ควบคู่กับระบบอื่นได้ง่ายเนื่องจากใช้พื้นที่ในการติดตั้งที่น้อย และไม่มีความซับซ้อนของระบบ (Chu et al., 2003) ข้อสรุปเบื้องต้นจากงานวิจัยผ่านมาพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนและด้วยรังสีอินฟราเรด ต่างก็มีทั้งข้อดีและข้อเสียต่างกันไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะทดสอบ性能เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด โดยเลือกใช้เนื้อวัวเป็นตัวอย่างในการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจาก ได้ร่วมมือ กับผู้ประกอบการ เพื่อหาเทคนิคการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการทำเนื้อแคนดี้

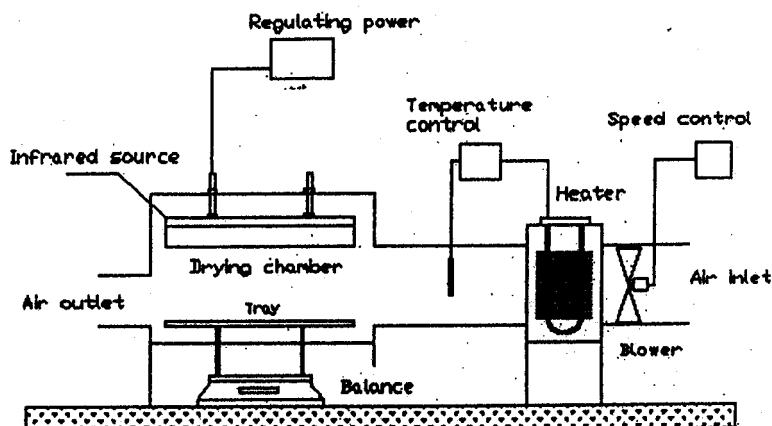
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ชุดทดลอง

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการศึกษา เป็นเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไอล ซึ่ง ออกแบบให้สามารถอบแห้งได้ทั้งลมร้อนเพียงอย่างเดียว และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ซึ่งมี ลักษณะการทำงานดังแสดงในรูปที่ 1 และมีรายละเอียดดังนี้ ขนาดห้องอบแห้งท่ากัน $30 \times 50 \times 25$ cm³ (กว้าง x ยาว x สูง) อุปกรณ์ให้ความร้อนเป็นแห้งรังสีอินฟราเรด 1 แห้งขนาด 650 W ระยะห่าง ระหว่างแห้งรังสีอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์เท่ากัน 15 cm ในแนวตั้งฉาก และขาดความร้อนขนาด

sigma พีทัคต์ ทิมุญา และ ชนกสรร ศุวรรณฤทธิ์

800 W พัดลมเป็นแบบไอลด์ตามแนวแกน มอเตอร์ขนาด 30 W สามารถปรับความเร็วรอบได้



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

วิธีการทดลอง

ในการทดลอง ได้เลือกใช้เนื้อรักเป็นตัวอย่างในการอบแห้ง ซึ่งมีเนื้อศักยภาพและอบแห้งเนื้อรักให้เหลือความชื้นสุดท้าย ใกล้เคียงกับเนื้อแ砧เดียวที่ทางข่ายความท้องตลาด เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ร่วมมือกับกลุ่มเกษตรกร เพื่อหาเทคนิคการอบแห้งเนื้อแ砧เดียวที่เหมาะสม สำหรับกรณีที่ปริมาณแสงแ砧มีไม่เพียงพอต่อการตากแดด หรือการอบแห้งเนื้อแ砧เดียวที่ไม่สามารถดำเนินการตากแดดได้ งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน โดยมีเงื่อนไขการอบแห้ง คือ อุณหภูมิอบแห้ง 50-60°C ความเร็วลม 0.5-1.5 m/s ในส่วนที่ 2 คือ การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ซึ่งมีเงื่อนไขการทดลอง คือ อุณหภูมิขาเข้าห้องอบแห้ง เท่ากับ 40°C ส่วนแห้งรังสีอินฟราเรดจะป้อนพลังงานในช่วง 260-640 W และเปลี่ยนแปลงความเร็วลมอยู่ระหว่าง 0.1-1.0 m/s สำหรับการบันทึกข้อมูลต่างๆ ระหว่างทำการทดลอง มีรายละเอียดดังนี้ อุณหภูมิอากาศที่ต่ำแห่งต่างๆ วัดโดยใช้เทอร์โมคัพเปิลชนิด K ต่อเข้ากับ data logger ความเร็วของอากาศโดยใช้ hot wire anemometer การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ย่านค่าจากเครื่องชั่งแบบดิจิตอล ที่มีค่าความละเอียด 0.1 กรัม สำหรับเงื่อนไขเริ่มต้นต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ที่นำมาทดลอง คือ เนื้อรักความชื้นเริ่มต้นประมาณ 300 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง โดยจัดเตรียมให้มีขนาด 3 x10 x1 cm. (กว้าง x ยาว x สูง) และในการทดลองแต่ละครั้งใช้เนื้อรัก 300 กรัม

ในส่วนของเงื่อนไขที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลต่าง เป็นช่วงที่เนื้อรักมีคุณสมบัติสอดคล้องกับคุณสมบัติเนื้อแ砧เดียวที่ทางข่ายความท้องตลาด คือ ความชื้นสุดท้ายประมาณ 140 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง หรืออัตราส่วนความชื้นประมาณ 0.5. โดยที่อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR)

ค่าวนวณจาก

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

- เมื่อ M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น, เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง
 M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ, เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง
 M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล, เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง

การคำนวณอัตราส่วนความชื้นในงานวิจัยนี้ เป็นการคำนวณโดยประมาณค่า คือ ไม่คิดความชื้นสมดุล โดยตั้งสมมุติฐานว่ามีค่าน้อย เมื่อเทียบกับความชื้นเริ่มต้นและความชื้นที่เวลาใดๆ

การวิเคราะห์สมรรถนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเบรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อน และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ซึ่งได้กำหนดพารามิเตอร์เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษาเบรียบเทียบดังนี้

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$\text{อัตราการอบแห้ง (DR)} = \frac{m_w}{DT} \quad (2)$$

เมื่อ m_w คือ มวลของน้ำที่ระเหย (กิโลกรัม, kg)

DT คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (ชั่วโมง, hr)

ความสัมเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน คำนวณได้จาก

$$SEC_{HA} = \frac{E_{fan} + E_{heater}}{m_w} \quad (3)$$

ความสัมเปลืองพลังงานจำเพาะ กรณีอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด คำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$SEC_{HA+IR} = \frac{E_{fan} + E_{heater} + E_{IR}}{m_w} \quad (4)$$

เมื่อ E_{fan} คือ พลังงานที่ให้กับพัดลม (MJ)

E_{heater} คือ พลังงานที่ให้กับน้ำโดยความร้อน (MJ)

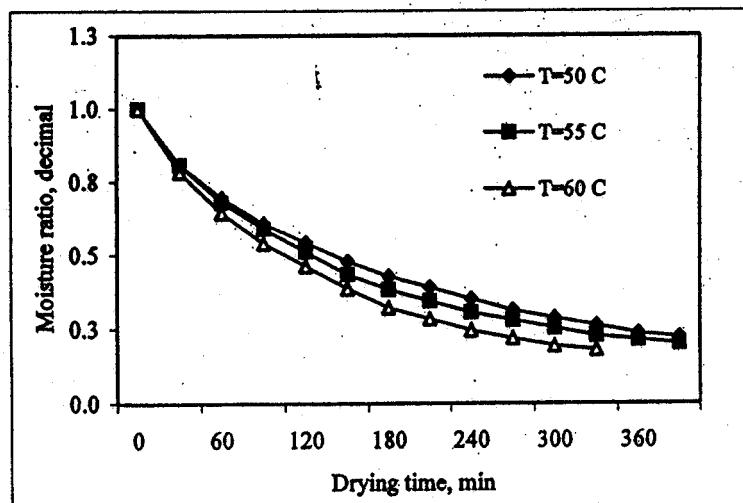
E_{IR} คือ พลังงานที่ให้กับแห้งอินฟราเรด (MJ)

ผลการทดลองและวิจารณ์

ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองและวิเคราะห์การอบแห้งเนื้อแ砧เดียวด้วยลมร้อน และการถีบลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ซึ่งผลจากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

การอบแห้งเนื้อด้วยลมร้อน

การศึกษาในส่วนนี้ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความเร็วลม ที่มีต่อพัฒนาการอบแห้งเนื้อ รวมทั้งความต้านเปลี่ยนพลังงานจำเพาะ ซึ่งมีรายละเอียดของผลการศึกษาดังนี้



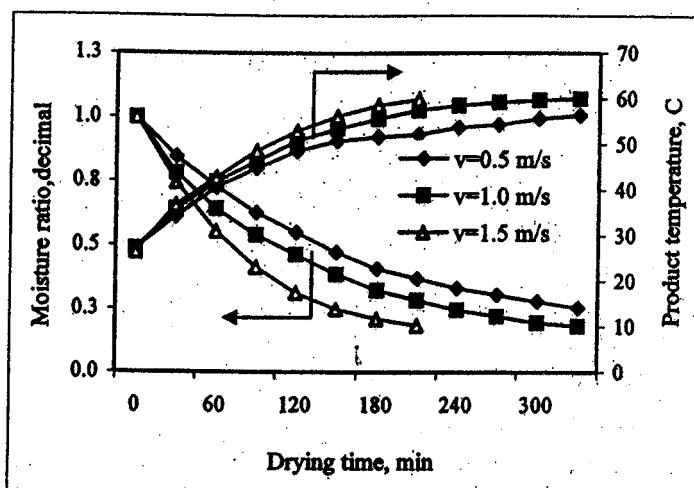
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความเร็วลม 1.0 m/s

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งเนื้อวัวด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง โดยใช้ความเร็วลม 1.0 m/s จากรูปสรุปได้ว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C อัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์จะลดลงเร็วที่สุด ทั้งนี้เนื่องจาก เนื้อแ砧เดียวได้รับพลังงานความร้อนมากที่สุด ทำให้อัตราการระเหยน้ำจากผลิตภัณฑ์สูงตามด้วย ดังจะเห็นได้จากอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเนื้อ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3 และหากใช้อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 เป็นเกณฑ์ในการ

การศึกษาเบรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมรังสีอินฟราเรด

195

พิจารณา พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C จะใช้เวลาตั้งกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55°C และ 50°C เท่ากับ 17 และ 42 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น อุณหภูมิผิดกันที่กับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60°C

รูปที่ 3 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้น อุณหภูมิเมื่อกับเวลา ที่ความเร็วลมต่างๆ โดยควบคุมอุณหภูมิอบแห้งให้คงที่เท่ากับ 60°C จากรูปที่ 3 จะเห็นว่าอัตราการลดลงของอัตราส่วนความชื้นในกรณีที่ใช้ความเร็วลมสูง จะลดลงเร็วกว่ากรณีที่ใช้ความเร็วลมต่ำ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า กรณีที่ใช้ความเร็วลมสูง มีรีบวนเพลิงงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับเนื้อก้มีรีบวนมาก ซึ่งจะลดคลื่นกับลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเนื้อ ส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำภายในเนื้อสูงตามดังนั้น จากเหตุผลที่กล่าวมา เนื่องสามารถลดความชื้นได้เร็วขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วลม

ตารางที่ 1 แสดงผลการศึกษาถึงความสัม�ันธ์ของพลังงานเจ้าเพาะกับอุณหภูมิอบแห้ง กรณีอบแห้งด้วยลมร้อน จะมีการใช้พลังงาน 2 ล้าน กิโล พลังงานที่จำเป็นให้พัดลมและพลังงานที่จำเป็นให้กับความร้อน ผลจากการศึกษาสรุปได้ดังนี้

1. พิจารณาที่ความเร็วลมคงที่ จากการศึกษาพบว่า ความสัมปันธ์ของพลังงานเจ้าเพาะจะลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะสั้น
2. พิจารณาที่อุณหภูมิกับที่

จากการศึกษาพบว่า ความสัมประสิทธิ์ของพัดลมงานเจาเพาะจะลดลง เมื่อเพิ่มความเร็วลม ทั้งนี้ เพราะ การอบแห้งด้วยลมร้อน ความเร็วลมจะมีผลต่อการนำพาความชื้นออกจากผักติดภัยฯ ทำให้สามารถลดระยะเวลาการอบแห้ง

Drying temperature (°C)	Velocity (m/s)	Drying time (min)	Drying rate (kg/hr)	Specific energy consumption (MJ/kg-H ₂ O evap)
50	0.5	195	0.015	63.3
	1.0	170	0.018	104.2
55	0.5	160	0.019	614.0
	1.0	140	0.021	102.4
60	0.5	135	0.022	59.5
	1.0	120	0.025	101.4

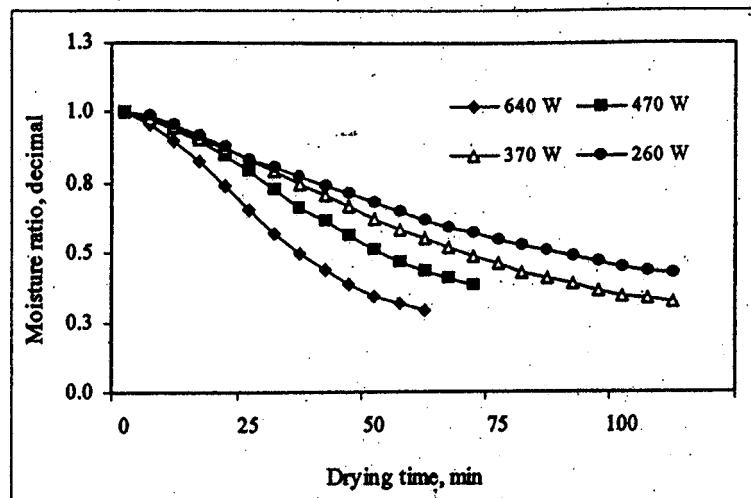
ตารางที่ 1 ผลการทดลองการอบแห้งเนื้อตัวยอกร้อนเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5

การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

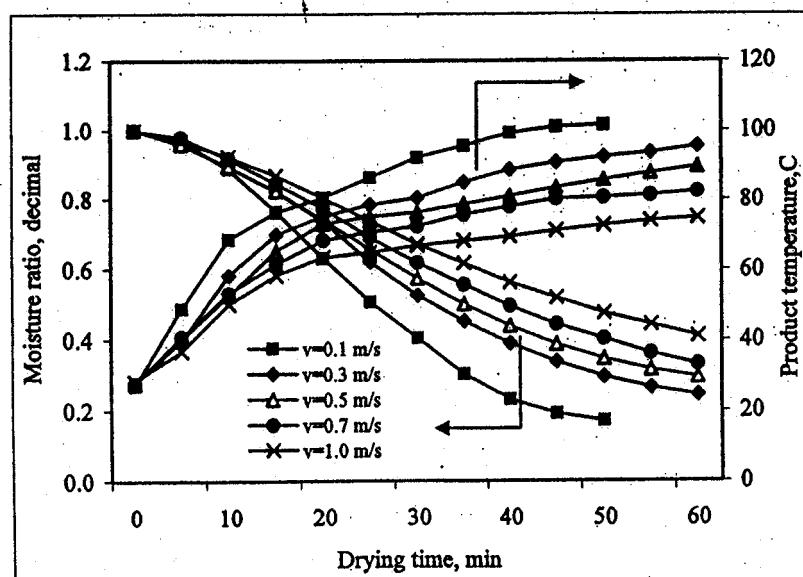
การศึกษาในส่วนการอบแห้งเนื้อตัวยอกร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ได้ศึกษาถึงผลของ กำลังไฟฟ้าที่จำเป็นให้กับแห้งอินฟราเรด และความเร็วลมที่มีผลต่อพฤติกรรมการอบแห้ง และความสัมประสิทธิ์ของพัดลมงานเจาเพาะ ผลจากการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 และ 5

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราผู้วนความชื้นกับเวลา ที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ โดยกำหนด ความเร็วลมให้คงที่เท่ากับ 0.5 m/s จากการทดลองสรุปได้ว่า อัตราส่วนความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้กับแห้งอินฟราเรด โดยที่กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 640 W จะมีอัตราการลดลงของ ความชื้นเร็วที่สุด ในขณะที่อัตราการลดลงของความชื้นจะช้าที่สุด เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 260 W หากพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 พบว่า การป้อนกำลังไฟฟ้าให้กับแห้งอินฟราเรดเท่ากับ 640 W จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการป้อนกำลังไฟฟ้า 470 W, 370 W และ 260 W เท่ากับ 43%, 94% และ 143% ตามลำดับ ซึ่งสามารถให้เหตุผลได้ว่า การเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่จำเป็นให้กับแห้ง อินฟราเรดสูงขึ้น ส่งผลให้ความชื้นของรังสีที่แผ่จากแห้งอินฟราเรดเพิ่มขึ้น ทำให้เนื้อได้รับพลังงาน ความร้อนเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้才ให้น้ำภายในเนื้อสามารถระเหยได้เร็วขึ้น

การศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมรังสีอินฟราเรด



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ความเร็วลม 0.5 m/s



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ $P = 640 \text{ W}$

ในรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความเร็วลมต่าง ๆ โดยควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้เท่ากัน 640 W จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลา และที่ความเร็วลม 0.1 m/s จะมีอัตราส่วนความชื้นลดลงเร็วที่สุด เมื่อเทียบกับที่ความเร็วลมต่าง ๆ เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากัน 0.5 ซึ่งเป็นค่าที่สองค่าของความชื้นของเนื้อแคดเดีย พบว่า การอบแห้งโดยใช้ความเร็วเท่ากัน 0.1 m/s จะใช้เวลาสั้นกว่าการณ์ใช้ความเร็วลม 0.3 m/s , 0.5 m/s , 0.7 m/s และ 0.9 m/s เท่ากัน 25% , 43% , 54% และ 79% ตามลำดับ ซึ่งสูงผลการทดลองได้ว่า การอบแห้งเนื้อแคดเดียด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ความเร็วต่ำ จะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการณ์ใช้ความเร็วลมสูง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ เนื่องจากพุทธิกรรมการให้ความร้อนของกระแสไฟฟ้าจะมีข้อแตกต่างจากการให้ความร้อนด้วยลมร้อน คือ ความร้อนจากกระแสไฟฟ้าจะถูกนำไปยังเนื้อโดยตรง โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางการถ่ายเทาความร้อนใดๆ ดังนั้นจึงส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวนอกเนื้อสูงกว่าอุณหภูมิของลมร้อนที่ไหลผ่าน ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้เกิดการถ่ายเทาความร้อนจากเนื้อไปสู่อากาศหรือลมที่พัดผ่านเนื้อ ดังนั้นหากเพิ่มความเร็วลม ก็จะยิ่งทำให้ความร้อนที่ถ่ายเทาจากเนื้อมีปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งจะสองค่าของอัตราการอบแห้งที่มีขึ้นของอุณหภูมิเนื้อที่แสดงในรูปที่ 5

Infrared power (W)	Velocity (m/s)	Drying time (min)	Drying rate (kg/hr)	Specific energy consumption (MJ/kg-H ₂ O evap)
260	0	95	0.032	29.6
	0.5	85	0.035	43.0
	1.0	185	0.016	122.7
370	0	70	0.043	31.1
	0.5	65	0.044	41.4
	1.0	105	0.029	83.5
470	0	50	0.060	28.2
	0.5	50	0.060	37.9
	1.0	70	0.043	64.1
640	0	35	0.086	26.9
	0.5	35	0.086	33.7
	1.0	48	0.063	53.7

ตารางที่ 2 ผลการทดลองการอบแห้งเนื้อคั่ยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด
หมายเหตุ พิจารณาที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากัน 0.5

ตารางที่ 2 แสดงผลลัพธ์ที่ใช้ในการอบแห้งโดยใช้ขั้นตอนความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดซึ่งประกอบด้วยพลังงาน 3 ส่วน คือ พลังงานที่จ่ายให้พัดลม ขดลวดความร้อน และแห้งอินฟราเรด จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. พิจารณาที่ความเร็วลมคงที่

จากการศึกษาพบว่า ความสัมบูรณ์ของพลังงานจำเพาะจะลดลง เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแห้งอินฟราเรด หันนี้เนื่องจาก เปอร์เซ็นต์การลดลงของระยะเวลาการอบแห้ง มากกว่าเพิ่มเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของพลังงานที่ใช้

การศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

199

2. พิจารณาที่ก่อจั่งไฟฟ้าของแห้งอินฟราเรดคงที่

จากการศึกษาพบว่า ความสันเปลี่ยนแปลงงานรำไพพรรณีเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลม ทั้งนี้ เกิดจากอาการจะเป็นตัวกลางที่ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์ลดลง ทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิผลิตภัณฑ์กรณีที่ใช้ความเร็วลมสูงสำหรับกรณีที่ใช้ความเร็วลมต่ำ ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 5 ซึ่ง ส่งผลให้ระยะเวลาการอบแห้งนานขึ้น

การเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

จากการศึกษาสามารถสรุปข้อแตกต่างของการอบแห้งเนื้อตัวยลมร้อน และการอบแห้งเนื้อตัวยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดได้ดังนี้

1. กลไกการถ่ายเทความร้อน

กลไกของการอบแห้งด้วยลมร้อน กระบวนการจะเริ่มจากความร้อนถ่ายเทจากลมร้อนตัวการ หาความร้อนไปยังผิวของเนื้อ หลังจากนั้นจะเกิดการนำความร้อนจากผิวไปสู่เนื้อต้านใน ด้วยเหตุนี้ อุณหภูมิของเนื้อจะต่ำกว่าความร้อนซึ่งเป็นตัวกลางที่ถ่ายเทความร้อนเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 3 สำหรับ ลมร้อนที่พัดผ่านเนื้อ นอกจากจะเป็นตัวกลางการถ่ายเทความร้อนแล้ว ยังทำหน้าที่เป็นตัวกลางการ ถ่ายเทมวลตัววาย โดยจะทำหน้าที่ลดความชื้นที่ผิวของเนื้อ

กลไกของการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด การถ่ายเทความร้อนในการอบแห้ง ด้วยเทคนิคแบบผสมผ่าวนี้ สามารถแบ่งชั้นวิเคราะห์ออกเป็น 2 ชั้น ดังนี้ ชั้นแรก คือ อุณหภูมิที่ ผิวของเนื้อต่ำกว่าความร้อน ซึ่งนี้จะได้รับความร้อนจาก 2 แหล่ง คือ ลมร้อนและแห้งอินฟราเรด โดย กลไกการถ่ายเทความร้อนในส่วนของลมร้อน และมวลจะเกิดขึ้นในลักษณะเช่นเดียวกับที่ได้อธิบายไว้ใน กรณีการอบแห้งด้วยลมร้อน สำหรับในส่วนของแห้งอินฟราเรด การถ่ายเทความร้อนจะอาศัยหลักการ แฝงรังสี ซึ่งไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายความร้อน ดังนั้นรังสีหรือคลื่นความร้อนจะถูกส่งไปยังผิว ของเนื้อโดยตรง ซึ่งจะก่อให้ผิวมากถูกเผาไหม้ คลื่นความร้อนทางส่วนสามารถสะท้อนกลับเข้าไปผิว ในของวัสดุได้ ทำให้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูง สำหรับในชั้นที่ 2 คือ ชั้นอุณหภูมิที่ผิว ของเนื้อสูงกว่าความร้อน ในชั้นนี้ เนื้อจะรับความร้อนจากแห้งอินฟราเรดเพียงแหล่งเดียว ในขณะเดียวกัน เนื้อจะสูญเสียความร้อนให้กับลมร้อนที่พัดผ่าน ซึ่งในชั้นนี้ ลมร้อนจะทำหน้าที่รับน้ำยาระบายน้ำยาระบายน้ำ ดังนั้นหากใช้ความเร็วลมที่สูง ก็จะมีผลทำให้เนื้อสูญเสียความร้อนมากขึ้น ซึ่งสามารถพิจารณาได้ จากรูปที่ 5

2. ระยะเวลาการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง และความสันเปลี่ยนแปลงของลักษณะงานรำไพพรรณี

ผลจากการศึกษาพบว่า การอบแห้งเนื้อตัวยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด จะใช้ระยะเวลา การอบแห้งที่สั้น หรืออัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว นอกจากนั้นยัง พบว่า ความสันเปลี่ยนแปลงของลักษณะงานรำไพพรรณีของแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด มีค่าต่ำกว่าการ อบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เป็นผลมาจากการลดลงแห้งอินฟราเรด ในส่วนของ ประสิทธิภาพการให้ความร้อน โดยมีลมร้อนเป็นส่วนที่ช่วยในการระบายความชื้นที่ผิวของเนื้อ ในทาง ตรงกันข้าม หากพิจารณาความสันเปลี่ยนแปลงของลักษณะงานรำไพพรรณีเพียงด้วยลมร้อน พบว่า มีค่า

ค่อนข้างสูง หันนี้เนื่องจากประสิทธิภาพการด�ยเทความร้อนด้วยวิธีการนี้จะไม่คิดเท่าที่ควร โดยสามารถสังเกตเห็นได้จาก อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ ที่นำเสนอในรูปที่ 3 ซึ่งจะมีลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์อย่างช้าๆ

3. อุณสภาพของผลิตภัณฑ์ในส่วนของการพิจารณาเกี่ยวกับอุณสภาพของผลิตภัณฑ์ ได้ตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบกับอุณสภาพของเนื้อแดดเดียวที่วางขายตามห้องตลาด ซึ่งได้ให้กุญแจทราบเป็นผู้พิจารณาอุณสภาพในด้านสี และการทดสอบ พบว่าอุณสภาพของเนื้อที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนในทุกเงื่อนไขอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติควรเลือกเงื่อนไขที่มีความถ้วนเป็นพิเศษ สำหรับงานซ่าเพาะที่สุด ในส่วนของอุณสภาพเนื้อที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด พบว่า อุณสภาพของเนื้อแดดเดียวอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เมื่อใช้ความเร็วลมตั้งแต่ 0.3 m/s ขึ้นไป จากการทดสอบพบว่า ที่ความเร็วลมต่ำกว่า 0.3 m/s เนื้อจะเกิดการทดสอบตัวตอนข้างมาก ในขณะที่สีผิวจะจะเข้มและมีรอยไหมเป็นจุดๆ ถูกถ่ายทอดกันเนื้อย่าง ซึ่งจะเกิดขึ้นกับทุกต่ำสุด ไฟฟ้าที่จำเป็นต้องใช้กับแห้งอินฟราเรด

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งเนื้อแดดเดียวด้วยลมร้อน และลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด จากการศึกษาพบว่า อุณสภาพช่วงอุ่นเนื้อที่ผ่านการอบแห้งห้องเตาไม่ต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยมีข้อแนะนำสำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด คือ การใช้ความเร็วลมอย่างน้อย 0.3 m/s สำหรับสมรรถนะโดยรวมของกระบวนการอบแห้งห้องเตาไม่ต้องเกิน 100°C พบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดให้ผลที่ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว คือ ใช้ระยะเวลาการอบแห้งต้น อัตราการอบแห้งสูง และความถ้วนเป็นพิเศษ สำหรับงานซ่าเพาะที่

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สก.) และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.)

เอกสารอ้างอิง

- Afzal, T.M. and Abe, T. 1998. "Diffusion in potato during far infrared radiation drying". *Journal of Food Engineering*. 37: 353-365.
- Afzal, T.M. and Abe, T. 2000. "Simulation of moisture changes in barley during far infrared radiation drying". *Computers and Electronics in Agriculture*. 26: 137-145.
- Chu, K.J. and Chou, S.K. 2003. "Low-cost drying methods for developing countries". *Trends in Food Science & Technology*. 14: 519-528.
- Gloannec, P., Lecharpentier, D., and Noel, H. 2002. "Experimental survey on the combination of radiating infrared and microwave sources for the drying of porous material". *Applied Thermal Engineering*. 22:1689-1703.
- Hashimoto, A. and Kameoka, T. 1999. "Effect of infrared irradiation on drying characteristics of wet porous materials." *Drying Technology-An International Journal*. 17: 1613 – 1626.

การศึกษาเบรย์นเพื่อยกการอบแห้งด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมรังสีอินฟราเรด

201

- Isengard, H.D. 1995. "Rapid water determination in foodstuffs". *Trends in Food Science & Technology*, 6: 155-162.
- Sakai, N. and Hanzawa, T. 1994. "Applications and advances in far-infrared heating in Japan". *Trends in Food Science & Technology*, 5: 357-362.
- Sheridan, P. and Shilton, N. 1999. "Application of far infrared radiation to cooking of meat Products". *Journal of Food Engineering*, 41: 203-208.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นาย ชนกัตร สุวรรณกoot (Mr. Tanapat Suwannakoot)
เกิดเมื่อวันที่	20 พฤษภาคม 2522 อายุ 28 ปี สถานภาพ โสด
ภูมิลำเนา	อยู่บ้านเลขที่ 111 หมู่ที่ 11 ตำบล บุ่งไหน อ. วาริน จ. อุบล รหัสไปรษณีย์ 34190
ประวัติการศึกษา	E-mail: tanapatann@hotmail.com
	สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนต้น
	และตอนปลาย สายวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์
	ที่โรงเรียนเบญจมบพิมพ์มหาราช, พ.ศ. 2533 - 2539
	ระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, พ.ศ.
	2543 - 2546