



การศึกษาการลดความชื้นดีปลิด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด
Study of Dehydration of Long Pepper Using a Tray Dryer

พิสิฐ ช่องลมกรด
Pisit Chonglomgrod

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2566



การศึกษาการลดความชื้นดีปัสด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด
Study of Dehydration of Long Pepper Using a Tray Dryer

พิสิฐ ช่องลมกรด
Pisit Chonglomgrod

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการลดความชื้นดีปัสด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด
ชื่อ นามสกุล	พิสิฐ ช่อกลมกรด
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
คณะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ปฎิวัติ คมวชิรกุล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว


.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติ สถาพรประสารณ์)


.....กรรมการ
(ดร.ศุภชัย หลักคำ)


.....กรรมการ
(ดร.ปฎิวัติ คมวชิรกุล)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร


.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ)

วันที่ 15 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2567

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการลดความชื้นดีป्लीด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด
ชื่อ นามสกุล	พิสิฐ ช่อลมกรด
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิชา และคณะ	วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2566

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความเร็วลมร้อนที่มีต่อ จลนพลศาสตร์ พลังงาน และเอ็กเซอร์จีของการอบแห้งดีป्ली ด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด พร้อมทั้ง ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการลดความชื้นของดีป्ली ในการทดลองใช้ดีป्लीที่มี ความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 246-253 (d.b.) เงื่อนไขการทดลองใช้อุณหภูมิลมร้อน 70 75 และ 80°C และความเร็วลมร้อน 0.5 0.7 และ 1.0 m/s การวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานอาศัยกฎข้อที่หนึ่งของ อุณหพลศาสตร์ และประยุกต์ใช้กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้า เอ็กเซอร์จีที่ไหลออก เอ็กเซอร์จีสูญเสีย จากการทดลองพบว่า การอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิลมร้อน 80°C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s ทำให้ความชื้นลดลงได้เร็วกว่าการอบแห้งที่เงื่อนไขอื่น ๆ การลดลงของ ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นความชื้นลดลงอย่างช้า ๆ การเพิ่ม อุณหภูมิลมร้อนมีผลทำให้ประสิทธิภาพพลังงาน และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ความเร็วลมร้อน ไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพพลังงานและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี ค่าประสิทธิภาพ พลังงานสูงสุดเท่ากับร้อยละ 22.56 และค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีสูงสุดเท่ากับร้อยละ 93.35 ในส่วน ของแบบจำลองเอมพิริคัลสามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งได้ดี โดยทุกเงื่อนไขการทดลอง สรุพบว่าแบบจำลองของ Midilli et al. สามารถทำนายคุณลักษณะการอบแห้งได้เหมาะสมมีค่าความแม่นยำ และใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด เพราะว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงสุด โดยมีค่า R^2 ระหว่าง 0.9969 – 0.9997 และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) มีค่าต่ำสุด โดยมีค่า RMSE ระหว่าง 0.0062 – 0.0159

คำสำคัญ : เครื่องอบแห้งแบบถาด, ลมร้อน, ดีป्ली, ประสิทธิภาพพลังงาน, ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี

Thesis Title	Study of Dehydration of Long Pepper Using a Tray Dryer
Author	Pisit Chonglomgrod
Degree	Master of Engineering (Mechanical Engineering)
Major Program	Mechanical Engineering, Faculty of Engineering
Academic Year	2023

ABSTRACT

The objective of this thesis was to study the effects of hot air temperature and velocity on the kinetics, energy, and exergy of drying long pepper using a tray dryer. The research also studied the mathematical model for predicting the dehydration of long pepper. The experiment used long pepper with an initial moisture of around 246-253 % (d.b.). The hot air temperatures of 70, 75, and 80°C and the hot air velocities of 0.5, 0.7, and 1 m/s were the experimental conditions of this research. The energy efficiency was analyzed based on the first law of thermodynamics, and the second law of thermodynamics was applied to the analysis of exergy inflow, exergy outflow, and exergy loss. The results showed that drying long pepper at a hot air temperature of 80°C and a hot air velocity of 1 m/s caused the moisture to decrease faster than drying at other conditions. The moisture content dropped quickly during the first phase of drying, then gradually decreased. The increase in the hot air temperature resulted in an increase in energy and exergy efficiency, while the increase in the hot air velocity did not affect energy and exergy efficiency. The highest energy efficiency was 22.56%, and the highest exergy efficiency was 93.35%. The empirical model performed well in predicting the drying moisture ratio. In all experimental conditions, it was concluded that the model of Midilli et al. was able to predict the drying characteristics appropriately, with the highest accuracy and closest to the experimental results. This is due to the fact that the decision coefficient (R^2) was the highest with an R^2 value between 0.9969 and 0.9997, and the root square of the mean square error (RMSE) was the lowest with an RMSE value between 0.0062 and 0.0159.

Keywords : Tray Dryer, Hot Air, Long Pepper, Energy Efficiency, Exergy Efficiency

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีจากความอนุเคราะห์ความเมตตากรุณาและความช่วยเหลือในทุกด้านจากอาจารย์ ดร.ปวิวัติ คมวชิรกุล อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ซึ่งกรุณามอบความรู้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำ การแก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์ ผู้ซึ่งกรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.ศุภชัย หลักคำ ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งทั้งสองท่านได้ให้ความรู้และการถ่ายทอดประสบการณ์ ตลอดจนตรวจสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำ ความรู้และแนวความคิดในด้านต่าง ๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้เขียนเป็นอย่างมาก

กราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.พลกฤษณ์ คุ่มกล้า อาจารย์ประจำสาขาวิชาวัสดุศาสตร์ อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และอาจารย์ศิริพล ทองอ่อน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ให้ความอนุเคราะห์สำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษางานวิจัยนี้ พร้อมทั้งให้คำแนะนำ ความรู้และแนวความคิดในด้านต่าง ๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้เขียนเป็นอย่างมาก

ท้ายที่สุด ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะมีประโยชน์สำหรับผู้สนใจต่อไป

พิสิฐ ช่องลมกรด

สารบัญ

หน้า

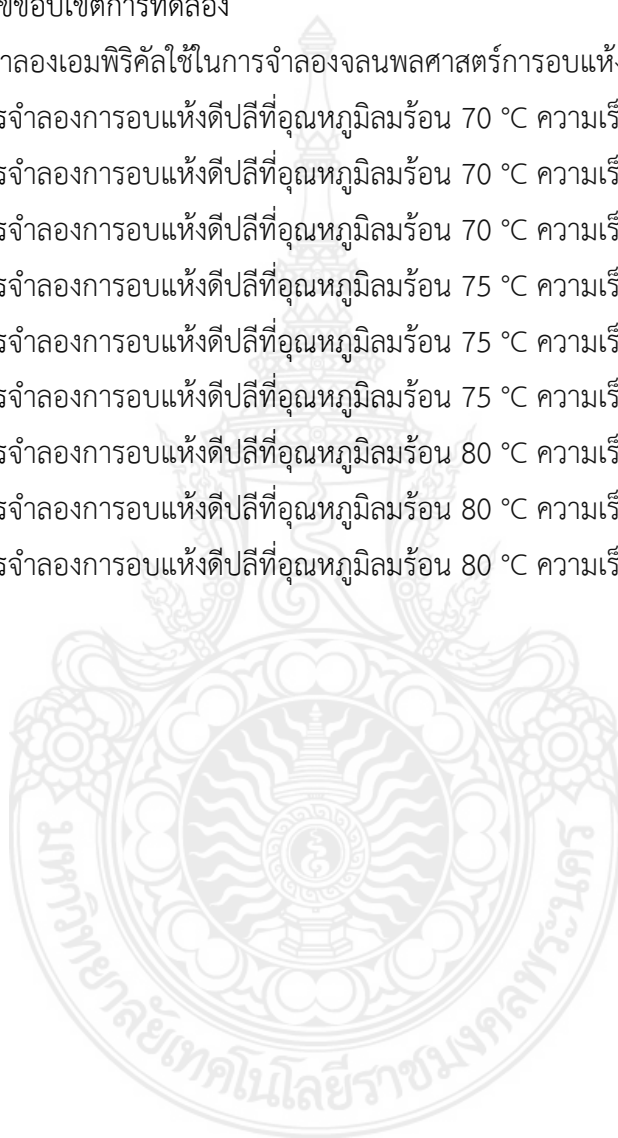
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ดิป्ली	4
2.2 บทนำการอบแห้ง	5
2.3 หลักการพื้นฐานการอบแห้ง	5
2.4 สมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์ของระบบอากาศ-น้ำ และของแข็งชื้น	6
2.5 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง	9
2.6 เครื่องอบแห้งแบบถาด	12
2.7 การวิเคราะห์พลังงาน	13
2.8 การวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี	15
2.9 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร ระหว่างการอบแห้ง	15
2.10 แบบจำลองเอมพิริคัล	17
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	25
3.2 วิธีดำเนินการทดลอง	29
3.3 เงื่อนไขขอบเขตการทดลอง	30
3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	30
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 จลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง	32
4.2 ผลการวิเคราะห์พลังงานของการอบแห้ง	35
4.3 ผลการวิเคราะห์เอนทัลปีของการอบแห้ง	38
4.4 การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดลอง	44
4.5 ผลการทดลองการอบแห้งดีปลีด้วยลมร้อนแบบถาดเปรียบเทียบกับ แบบจำลองเอมพิริคัล	53
4.6 สรุปผลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอบแห้ง	61
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผล	62
5.2 ข้อเสนอแนะ	63
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง	67
ภาคผนวก ข บทความตีพิมพ์เผยแพร่และใบรับรองการนำเสนอ	91
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	117

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์และการถ่ายเทของระบบอากาศ-น้ำ	7
2.2	แบบจำลองเอนพีริคัลที่นิยมใช้ในการจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง	18
3.1	เงื่อนไขขอบเขตการทดลอง	30
3.2	แบบจำลองเอนพีริคัลใช้ในการจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง	31
4.1	ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิร้อน 70 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s	44
4.2	ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิร้อน 70 °C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s	45
4.3	ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิร้อน 70 °C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s	46
4.4	ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิร้อน 75 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s	47
4.5	ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิร้อน 75 °C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s	48
4.6	ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิร้อน 75 °C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s	49
4.7	ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิร้อน 80 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s	50
4.8	ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิร้อน 80 °C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s	51
4.9	ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิร้อน 80 °C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s	52



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ผลดีป्ली	4
2.2	กลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างกระบวนการอบแห้ง	6
2.3	ความชื้นแบบต่างๆ ของวัสดุ	8
2.4	เส้นโค้งการอบแห้ง (Drying Curve)	10
2.5	เส้นโค้งอัตราการอบแห้งเชิงทฤษฎี	11
2.6	เครื่องอบแห้งแบบถาด	13
3.1	แผนผังเครื่องอบแห้งลมร้อนที่ใช้ในงานวิจัย	25
3.2	เครื่องอบแห้งลมร้อนที่ใช้ในงานวิจัย	26
3.3	ชุดพัฒนาลมสร้างแรงดัน	27
3.4	ชุดอินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วรอบพัดลม	27
3.5	Heater	27
3.6	ชุดควบคุมการจ่ายกระแสไฟ Heater	27
3.7	ตู้ควบคุมการทำงาน Heater	27
3.8	ด้านท้ายเครื่องอบแห้งแสดงตอนแห้ง Heater ทำงาน	28
3.9	เครื่องมือวัดความชื้น	28
3.10	เครื่องมือวัดอุณหภูมิ	28
3.11	เครื่องมือวัดความเร็วลม	28
3.12	ดีป्लीที่ใช้ในการทดลอง	29
4.1	ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อการลดความชื้นดีป्लीที่ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s	32
4.2	ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อการลดความชื้นดีป्लीที่ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s	32
4.3	ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อการลดความชื้นดีป्लीที่ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s	33
4.4	ผลกระทบของความเร็วลมร้อนต่อการลดความชื้นดีป्लीที่อุณหภูมิลมร้อน 70 °C	33
4.5	ผลกระทบของความเร็วลมร้อนต่อการลดความชื้นดีป्लीที่อุณหภูมิลมร้อน 75 °C	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.6	ผลกระทบของความเร็วลมร้อนต่อการลดความชื้นดิลีที่อุณหภูมิลมร้อน 80 °C	34
4.7	ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อประสิทธิภาพพลังงานที่ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s	35
4.8	ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อประสิทธิภาพพลังงานที่ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s	35
4.9	ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อประสิทธิภาพพลังงานที่ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s	36
4.10	ผลกระทบของความเร็วลมร้อนต่อประสิทธิภาพพลังงานที่อุณหภูมิลมร้อน 70 °C	36
4.11	ผลกระทบของความเร็วลมร้อนต่อประสิทธิภาพพลังงานที่อุณหภูมิลมร้อน 75 °C	37
4.12	ผลกระทบของความเร็วลมร้อนต่อประสิทธิภาพพลังงานที่อุณหภูมิลมร้อน 80 °C	37
4.13	ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อเอ็กเซอร์จิสัญเสียที่ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s	38
4.14	ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อเอ็กเซอร์จิสัญเสียที่ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s	38
4.15	ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อเอ็กเซอร์จิสัญเสียที่ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s	39
4.16	ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จิสที่ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s	39
4.17	ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จิสที่ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s	40
4.18	ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จิสที่ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s	40
4.19	ผลกระทบของความเร็วลมร้อนต่อเอ็กเซอร์จิสัญเสียที่อุณหภูมิลมร้อน 70 °C	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.20	ผลกระทบของความเร็วม้วนต่อเอกเซอร์จีสูญเสีย ที่อุณหภูมิความร้อน 75 °C	41
4.21	ผลกระทบของความเร็วม้วนต่อเอกเซอร์จีสูญเสีย ที่อุณหภูมิความร้อน 80 °C	42
4.22	ผลกระทบของความเร็วม้วนต่อประสิทธิภาพเอกเซอร์จี ที่อุณหภูมิความร้อน 70°C	42
4.23	ผลกระทบของความเร็วม้วนต่อประสิทธิภาพเอกเซอร์จี ที่อุณหภูมิความร้อน 75°C	43
4.24	ผลกระทบของความเร็วม้วนต่อประสิทธิภาพเอกเซอร์จี ที่อุณหภูมิความร้อน 80°C	43
4.25	ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิ ร้อน 70 °C ความเร็วม้วน 0.5 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัล ของ Midilli et al.	53
4.26	ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิ ร้อน 70 °C ความเร็วม้วน 0.7 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัล ของ Midilli et al.	54
4.27	ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิ ร้อน 70 °C ความเร็วม้วน 1.0 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัล ของ Midilli et al.	54
4.28	ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิ ร้อน 75 °C ความเร็วม้วน 0.5 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัล ของ Midilli et al.	55
4.29	ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิ ร้อน 75 °C ความเร็วม้วน 0.7 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัล ของ Midilli et al.	55
4.30	ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิ ร้อน 75 °C ความเร็วม้วน 1.0 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัล ของ Midilli et al.	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.31	ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิ ร้อน 80 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัล ของ Midilli et al.	56
4.32	ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิ ร้อน 80 °C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัล ของ Midilli et al.	57
4.33	ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิ ร้อน 80 °C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัล ของ Midilli et al.	57
4.34	ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีปลีที่ความเร็วลม ร้อน 0.5 m/s อุณหภูมิร้อน 70 75 และ 80 °C เปรียบเทียบกับแบบจำลอง เอมพิริคัลของ Midilli et al.	58
4.35	ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีปลีที่ความเร็วลม ร้อน 0.7 m/s อุณหภูมิร้อน 70 75 และ 80 °C เปรียบเทียบกับแบบจำลอง เอมพิริคัลของ Midilli et al.	58
4.36	ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีปลีที่ความเร็วลม ร้อน 1.0 m/s อุณหภูมิร้อน 70 75 และ 80 °C เปรียบเทียบกับแบบจำลอง เอมพิริคัลของ Midilli et al.	59
4.37	ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิ ร้อน 70 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 0.7 และ 1.0 m/s เปรียบเทียบกับ แบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al.	59
4.38	ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิ ร้อน 75 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 0.7 และ 1.0 m/s เปรียบเทียบกับ แบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al.	60
4.39	ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิ ร้อน 80 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 0.7 และ 1.0 m/s เปรียบเทียบกับ แบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al.	60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ดีปลี (Long pepper) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Piper retrofractum* vahl ผลสดมีสีเขียว เมื่อสุกแล้ว จะเปลี่ยนเป็นสีแดง ลักษณะของผลอัดกันแน่นเป็นช่อรูปทรงกระบอก โคนใหญ่กว่าปลายไม่มาก ปลายเล็กมน ผลมีความยาวประมาณ 2.5-7.5 เซนติเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-8 เซนติเมตร ผิวของผลค่อนข้างหยาบ และมีเกสรตัวเมียติดอยู่ ผลย่อยมีเมล็ดเดียว โดยเมล็ดมีขนาดเล็กมาก ลักษณะกลมและแข็ง ผงของผลมีสีน้ำตาล มีกลิ่นหอมเฉพาะตัว มีรสเผ็ดร้อน ขมปร่า นิยมเก็บผลมาใช้ในการปรุงรสเป็นสีน้ำตาล แล้วนำมาตากแดดให้แห้ง ผลอ่อนดีปลี สามารถใช้รับประทานเป็นผักสดได้ ส่วนสรรพคุณของดีปลีในการใช้เป็นยาสมุนไพร มีสรรพคุณช่วยบำรุงธาตุไฟในการย่อยอาหาร [1] สำหรับอุตสาหกรรมยาแผนโบราณ ดีปลีใช้เข้าตำรับยาแทบทุกตำรับ ข้อมูลจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (อย.) ดีปลีมีจำนวนทะเบียนยาแผนโบราณถึง 1,134 ตำรับ วัตถุประสงค์แห่ง ใช้ภายในประเทศเป็นส่วนประกอบยาแผนโบราณเครื่องเทศ และผลิตภัณฑ์ป้องกันกำจัดศัตรูพืช 25% ส่งออกไปประเทศจีน 75% จังหวัดที่ปลูกดีปลีมากในประเทศไทย กาญจนบุรี ราชบุรี นครปฐม ประจวบคีรีขันธ์ จันทบุรี เชียงใหม่ เลย และนครศรีธรรมราช การเพาะปลูกดีปลี เป็นพืชหลายปี สามารถให้ผลผลิตได้ตลอดทั้งปี ซึ่งผลผลิตเฉลี่ยสูงสุด 7,000 กิโลกรัมสดต่อไร่ ประมาณ 1,500 กิโลกรัมแห้งต่อไร่ [2] หลังจากปลูกประมาณ 6 เดือน ถึง 1 ปี สามารถเก็บผลผลิตได้ ดีปลีจะออกดอกตลอดปี แต่จะออกดอกมากในช่วงหน้าฝน หน้าแล้งดอกจะเล็ก ช่วงเวลาเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมเดือนพฤษภาคม ถึงเดือนกุมภาพันธ์ ส่วนช่วงเดือนมีนาคม ถึงเดือนเมษายน จะไม่ค่อยติดผล และเมื่อนำผลดีปลีมาตากแห้งนั้นสามารถนำมาขายได้

การอบแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ที่มีเป้าหมายเพื่อดึงความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุออกสู่ภายนอกโดยอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนซึ่งต้องใช้พลังงานจากภายนอก ถือเป็นกระบวนการทางด้านเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว ที่มีความสำคัญยิ่งต่อการรักษาคุณภาพลดความสูญเสีย และยืดอายุการเก็บรักษาสภาพผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์แปรรูปทางการเกษตรมีมูลค่าเพิ่มมากขึ้น การอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เพราะสามารถทำการลดความชื้นให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว ประสิทธิภาพของระบบอบแห้งสามารถประเมินได้หลากหลายวิธี การประเมินค่าประสิทธิภาพพลังงานและการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ประสิทธิภาพพลังงานในระบบอบแห้งเป็นตัวชี้วัดหนึ่ง que แสดงถึงการใช้พลังงานที่ส่วนต่างๆ ของระบบอบแห้ง [3] การวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีโดยทั่วไปมักใช้อุณหภูมิในแต่จะจุดของระบบเป็นข้อมูลเพื่อประเมินประสิทธิภาพการอบแห้ง โดย Castro et al.[4] วิเคราะห์เอ็กเซอร์จี

ของการอบแห้งหัวหอมของเครื่องอบแห้งสายพาน การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลอากาศ เป็นการเพิ่มเอกเซอร์จีเข้าห้องอบแห้ง การเพิ่มประสิทธิภาพเอกเซอร์จีทำได้โดยการเพิ่มอัตราการไหลอากาศ ในขณะเดียวกันอัตราการไหลอากาศที่สูงเกินไปจะส่งผลให้ระบบมีการสูญเสียความร้อนเพิ่มขึ้น Yogendrasasidhar and Setty [5] ทดลองอบแห้งเมล็ดข้าวฟ่างด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบด พบว่าเอกเซอร์จีสูญเสียเกิดจากปัจจัยด้านอุณหภูมิอากาศอบแห้ง อัตราการไหลอากาศ ความหนาเบต และความชื้นเริ่มต้นตัวอย่างอบแห้ง นอกจากนั้นค่าเอกเซอร์จีลดลงเมื่ออัตราการไหลอากาศและระยะเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพเอกเซอร์จีเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง อัตราการไหลอากาศ และระยะเวลาการอบแห้ง ในขณะที่การเพิ่มความหนาเบตและความชื้นเริ่มต้นตัวอย่างอบแห้งมีผลให้ประสิทธิภาพเอกเซอร์จีลดลง มีบทความวิจัยหลากหลายที่ทำการศึกษาวเคราะห์ประสิทธิภาพเอกเซอร์จีของการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร เช่น พริกไทย Akpinar [3] แป้งมันสำปะหลัง Aviara et al.[6] กระเจี๊ยบ Okunola et al.[7] มันฝรั่ง Arepally et al. [8] วอลนัต Chen et al.[9] และ มันหวาน Kolaric et al.[10] ผลจากการศึกษาจากบทความเหล่านี้พบว่า ค่าดัชนีความยั่งยืนด้านการผลิตเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกับค่าประสิทธิภาพเอกเซอร์จี เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรโดยทั่วไปได้ Benhamza et al.[11], Zalazar-garcia et al.[12] จากข้อมูลข้างต้น จะเห็นว่าประสิทธิภาพระบบอบแห้งมีความสำคัญมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อการลดความชื้นของการอบแห้งดีปลี การวิเคราะห์ค่าพลังงาน และการวิเคราะห์เอกเซอร์จี โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) คือการใช้สมการอธิบายพฤติกรรมจากการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าของข้อมูลในระบบที่จำลองขึ้นเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้มาจริง ซึ่งข้อดีของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง คือลดเวลาในการทดลอง ลดต้นทุนที่เกิดขึ้นในการทดลองอบแห้งจริง และสามารถศึกษารวมทั้งกำหนดเงื่อนไขการจำลองได้โดยง่าย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งดีปลีด้วยลมร้อน

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อค่าพลังงานและเอกเซอร์จีของการอบแห้งดีปลีด้วยลมร้อน

1.2.3 เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการลดความชื้นของดีปลี

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิลมร้อน 70 75 และ 80 °C ที่ความเร็วลมร้อน 0.5 0.7 และ 1.0 m/s ที่มีต่อจลนพลศาสตร์ ค่าพลังงานและเอ็กเซอร์จีของการอบแห้งดีปลีด้วยลมร้อน

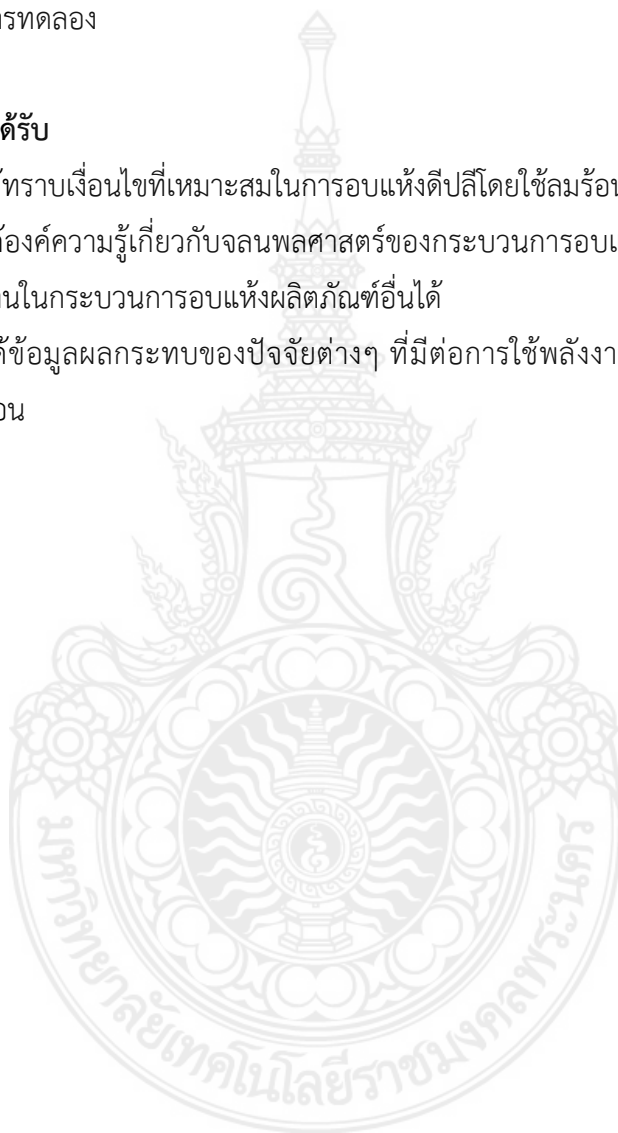
1.3.2 เปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลสำหรับทำนายการลดความชื้นของดีปลีกับผลการทดลอง

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 ได้ทราบเงื่อนไขที่เหมาะสมในการอบแห้งดีปลีโดยใช้ลมร้อน

1.4.2 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับจลนพลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้ง สามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อประยุกต์ใช้งานในกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์อื่นได้

1.4.3 ได้ข้อมูลผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อการใช้พลังงานและเอ็กเซอร์จีของระบบอบแห้งแบบลมร้อน



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในทางการศึกษาการลดความชื้นดิบลิด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 ดิบลิ

ดิบลิ (Long pepper) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Piper retrofractum* vahl ผลสดมีสีเขียว เมื่อสุกแล้วจะเปลี่ยนเป็นสีแดง ลักษณะของผลอัดกันแน่นเป็นช่อรูปทรงกระบอก โค้นใหญ่กว่าปลายไม่มาก ปลายเล็กมน ผลมีความยาวประมาณ 2.5-7.5 เซนติเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-8 เซนติเมตร ผิวของผลค่อนข้างหยาบ และมีเกสรตัวเมียติดอยู่ ผลย่อยมีเมล็ดเดียว โดยเมล็ดมีขนาดเล็กมาก ลักษณะกลมและแข็ง ผงของผลมีสีน้ำตาล มีกลิ่นหอมเฉพาะตัว มีรสเผ็ดร้อน ขมปร่า นิยมเก็บผลมาใช้เมื่อผลเริ่มเป็นสีน้ำตาล แล้วนำมาตากแดดให้แห้ง ผลอ่อนดิบลิ สามารถรับประทานเป็นผักสดได้ [1]



รูปที่ 2.1 ผลดิบลิ

ดิบลิแห้ง ใช้ภายในประเทศเป็นส่วนประกอบยาแผนโบราณเครื่องเทศ และผลิตภัณฑ์ป้องกันกำจัดศัตรูพืช 25% ส่งออกไปประเทศจีน 75% จังหวัดที่ปลูกดิบลิมากในประเทศไทย กาญจนบุรี ราชบุรี นครปฐม ประจวบคีรีขันธ์ จันทบุรี เชียงใหม่ เลย และนครศรีธรรมราช การเพาะปลูกดิบลิ เป็นพืชหลายปี สามารถให้ผลผลิตได้ตลอดทั้งปี ซึ่งผลผลิตเฉลี่ยสูงสุด 7,000 กิโลกรัมสดต่อไร่ ประมาณ 1,500 กิโลกรัมแห้งต่อไร่ [2] หลังจากปลูกประมาณ 6 เดือน ถึง 1 ปี สามารถเก็บผลผลิตได้ ดิบลิจะออกดอกตลอดปี แต่จะออกดอกมากในช่วงหน้าฝน หน้าแล้งดอกจะเล็ก ช่วงเวลาเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม เดือนพฤษภาคม ถึงเดือนกุมภาพันธ์ ส่วนช่วงเดือนมีนาคม ถึงเดือนเมษายน จะไม่ค่อยติดผล และเมื่อนำผลดิบลิมาตากแห้งนั้นสามารถนำมาขายได้

2.2 บทนำการอบแห้ง

การอบแห้ง (Drying) เป็นกระบวนการแปรสภาพของเหลว ของเหลวกึ่งแข็ง หรือแม้กระทั่งของแข็งให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายในรูปของของแข็งโดยการระเหยเอาของเหลว ซึ่งโดยกรณีส่วนใหญ่คือน้ำส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดออกไปจากวัสดุโดยการให้ความร้อน ทั้งนี้อาจยกเว้นกรณีการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) [13] ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดร่วมสาม (Triple point) ของของเหลวที่ต้องการขจัดออก ในกรณีดังกล่าวการอบแห้งเกิดขึ้นโดยการระเหิดของของแข็ง (เช่น น้ำแข็ง) ไปเป็นไอโดยตรงโดยไม่ผ่านวัฏภาคของเหลว ในการที่จะเรียกกระบวนการหนึ่งๆ ว่าเป็นกระบวนการอบแห้งได้นั้น จำเป็นจะต้องมีองค์ประกอบสำคัญ 2 ประการ คือ การเปลี่ยนวัฏภาคของของเหลวในวัสดุและการได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นของแข็งเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ โดยนิยามดังกล่าวข้างต้น การอบแห้งจึงเป็นกระบวนการที่แตกต่างจากการระเหย (Evaporation) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนของเหลวให้กลายเป็นของเหลวที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น

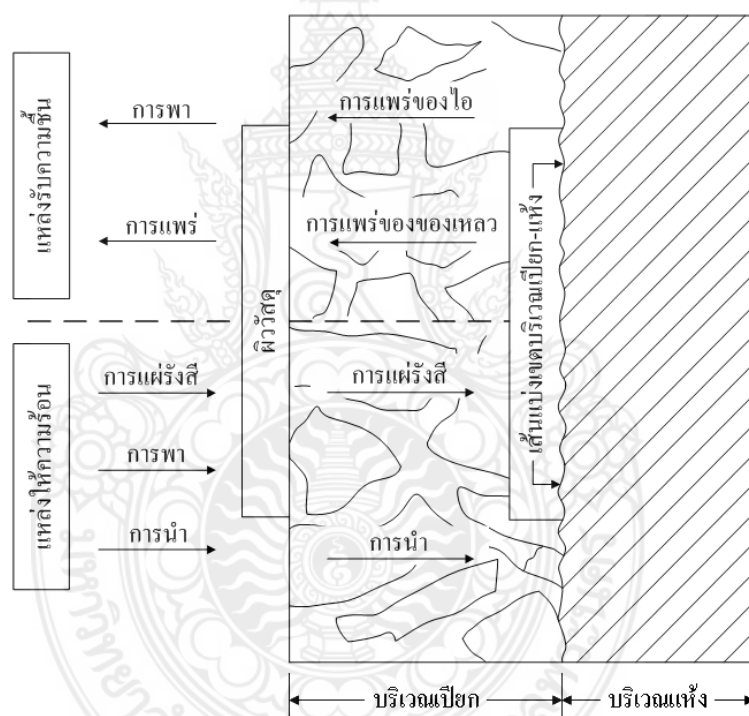
โดยทั่วไปวัตถุประสงค์หลักของการอบแห้ง คือ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์เกษตรและอาหาร เนื่องจากการอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นในวัสดุ ส่งผลให้จุลินทรีย์ที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เน่าเสียไม่สามารถเจริญได้ นอกจากนี้ปฏิกิริยาเคมี เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ก็ยังมีอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate of reaction) ที่ต่ำลงมากเมื่อปริมาณความชื้นมีค่าลดลง การอบแห้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ในส่วนของการอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ หากไม่มีการควบคุมหรือปรับสภาวะการอบแห้งให้เหมาะสม อาจทำให้ผลิตภัณฑ์เสียหายได้

2.3 หลักการพื้นฐานของการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนและมวลสารเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน นอกจากนี้ยังมีการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ของวัสดุ ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงเชิงกายภาพหรือเชิงเคมี ซึ่งล้วนแต่มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งมีผลกระทบต่อกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารอีกทอดหนึ่งด้วย ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงเชิงกายภาพ วัสดุอาจเกิดการหดตัว (Shrinkage) การพองตัว (Puffing) การตกผลึก (Crystallization) หรือการหลอมเหลว (Melting) ส่วนการเปลี่ยนแปลงเชิงเคมีนั้น อาจมีทั้งการเปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นที่ต้องการและไม่เป็นที่ต้องการ และอาจนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสี เนื้อสัมผัส (Texture) กลิ่นรส และคุณภาพอื่นๆ ของผลิตภัณฑ์ [13]

ดังกล่าวข้างต้นวิธีการในการถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุอาจมีได้หลากหลายวิธี อย่างไรก็ตามในปัจจุบันเครื่องอบแห้งส่วนใหญ่ก็ยังเป็นเครื่องอบแห้งแบบพาความร้อน (Convective dryers) ซึ่งความร้อนเข้าไปสู่วัสดุภายในเครื่องอบแห้งโดยการพา โดยมีอากาศร้อนเป็นตัวกลางในการพาความร้อน ในส่วนของการถ่ายเทหรือการเคลื่อนที่ของความชื้นในวัสดุนั้น ซึ่งมากกว่าร้อยละ 90 ของกรณีการอบแห้งทั้งหมดเป็นน้ำ อาจเป็นไปได้โดยหลายกลไก เช่น โดยการแพร่ของของเหลว (Liquid

diffusion) การแพร่ของไอ (Vapor diffusion) นอกจากนี้ การเคลื่อนที่ของความชื้นยังอาจเกิดขึ้นเนื่องจากผลต่างของความดันอุทกสถิต (Hydrostatic pressure) ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่อัตราการระเหยกลายเป็นไอของความชื้น ภายในวัสดุมีค่าสูงกว่าอัตราการเคลื่อนที่ของไอฟ่านโครงสร้างของวัสดุออกมาสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งอาจเกิดขึ้นในกรณีการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Superheated steam drying) ยิ่งไปกว่านั้นการเคลื่อนที่ของความชื้นอาจเกิดขึ้นแบบผสมผสาน คือเกิดการเคลื่อนที่ของความชื้นโดยกลไกต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นไปพร้อมๆ กัน ดังเช่นใน รูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงกลไกในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่อาจเกิดขึ้นได้ระหว่างกระบวนการอบแห้ง ในรูปแสดงถึงบริเวณหลัก 2 บริเวณในชิ้นวัสดุ คือ บริเวณที่วัสดุยังคงมีความชื้นสูง และบริเวณที่วัสดุมีความชื้นต่ำ ประเด็นสำคัญที่ควรระลึกถึงไว้เสมอคือระหว่างการอบแห้งโครงสร้างของวัสดุย่อมเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจส่งผลต่อกลไกการเคลื่อนที่ของความชื้นในวัสดุด้วย



รูปที่ 2.2 กลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างกระบวนการอบแห้ง [13]

2.4 สมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์ของระบบอากาศ-น้ำ และของแข็งชื้น

2.4.1 ไซโครเมตรี

ดังกล่าวถึงไปแล้วข้างต้นว่าเครื่องอบแห้งส่วนใหญ่ที่ใช้งานในปัจจุบันเป็น แบบพาความร้อน นั่นคือมีการใช้อากาศร้อนหรือก๊าซร้อนเป็นตัวกลางในการ ให้ความร้อนเพื่อใช้ในการระเหยน้ำ และเพื่อพาเอาความชื้นที่ระเหยจากวัสดุ ออกไปจากเครื่องอบแห้ง การอบแห้งจึงอาจเปรียบได้กับการเพิ่มความชื้นและการลดอุณหภูมิของอากาศร้อนในเครื่องอบแห้งนั่นเอง ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องทราบ

สมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic properties) และสมบัติเชิงถ่ายเท (Transport properties) ของอากาศชื้นก่อนทำการคำนวณหรือออกแบบ กระบวนการอบแห้ง โดยสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติดังกล่าวกับตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอบแห้งแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์และการถ่ายเทของระบบอากาศ-น้ำ [13]

สมบัติ	ความสัมพันธ์
P_v	$P_v = 100 \exp[27.0214 - (6887 / T_{\text{abs}}) - 5.32 \ln(T / 273.16)]$
Y	$Y = 0.622 RH P_v / (P - RH P_v)$
C_{pg}	$C_{pg} = 1.00926 \times 10^3 - 4.0403 \times 10^{-2} T + 6.1759 \times 10^{-4} T^2 - 4.097 \times 10^{-7} T^3$
k_g	$k_g = 2.425 \times 10^{-2} - 7.889 \times 10^{-5} T - 1.790 \times 10^{-8} T^2 - 8.570 \times 10^{-12} T^3$
ρ_g	$\rho_g = PM_{\text{air}} / (RT_{\text{abs}})$
μ_g	$\mu_g = 1.691 \times 10^{-5} + 4.984 \times 10^{-8} T - 3.187 \times 10^{-11} T^2 + 1319 \times 10^{-14} T^3$
C_{pv}	$C_{pv} = 1.883 - 1.6737 \times 10^{-4} T + 8.4386 \times 10^{-7} T^2 - 2.6966 \times 10^{-10} T^3$
C_{pw}	$C_{pw} = 2.8223 + 1.1828 \times 10^{-2} T - 3.5043 \times 10^{-5} T^2 + 3.601 \times 10^{-8} T^3$

โดยที่ P_v คือความดันไอของน้ำ (Pa)

Y คือความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศชื้น (kg ไอน้ำ / kg อากาศแห้ง)

C_{pg} คือความร้อนจำเพาะของอากาศชื้น (kJ/kg·K)

k_g คือ สหพันธ์นำความร้อนของอากาศชื้น (W/m·K)

ρ_g คือความหนาแน่นของอากาศชื้น (kg/m³)

μ_g คือความหนืดของอากาศชื้น (kg/m·s)

C_{pv} คือความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (kJ/kg·K)

C_{pw} คือความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg·K)

T_{abs} คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

T คืออุณหภูมิ (°C)

P คือความดัน (Pa)

RH คือความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ชื้น (สัดส่วน)

M_{air} คือมวลโมเลกุลของอากาศ (~ 29 kg/kmol)

R คือค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 J/mol·K)

2.4.2 ความชื้น

ความชื้นของวัสดุ ซึ่งในที่นี้แทนด้วยสัญลักษณ์ X อาจระบุค่าได้ทั้งในฐานเปียกและฐานแห้ง อย่างไรก็ตาม ในทางการคำนวณใช้ความชื้นฐานเปียกมากกว่าฐานแห้งเนื่องจากคำนวณค่าได้สะดวกและรวดเร็ว ในทางตรงกันข้ามความชื้นฐานแห้งเหมาะสำหรับการคำนวณและออกแบบ เนื่องจากมวลของแข็งแห้งที่ใช้ในการคำนวณค่าความชื้นมีค่าคงที่ตลอดช่วงการอบแห้ง ด้วยเหตุนี้ในการใช้ข้อมูลผลการทดลองหรือการทดสอบใดๆ จึงต้องพิจารณาให้ชัดเจนว่าค่าความชื้นที่ระบุไว้เป็นค่าความชื้นบนฐานใด

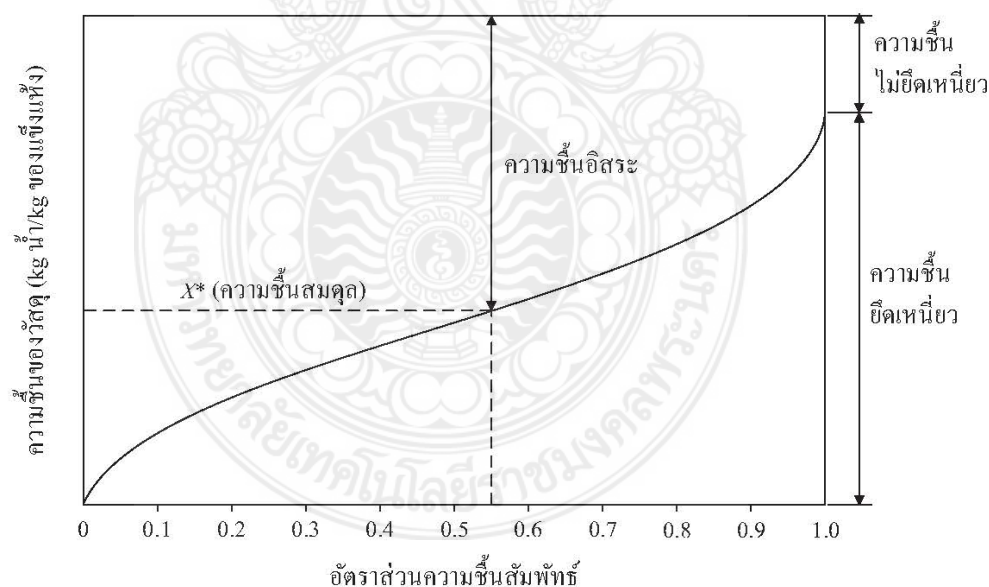
ความชื้น (ฐานแห้ง หรือ kg น้ำ/kg ของแข็งแห้ง):

$$X \text{ (d.b.)} = (M - M_s)/M_s \quad (2.1)$$

เมื่อ M คือมวลของวัสดุที่เวลาใดๆ (kg) และ M_s คือมวลของแข็งแห้ง (Bone-dry mass, kg) ซึ่งได้จากการนำวัสดุไปอบแห้งจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงของมวลอีกต่อไป (หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือไม่มีความชื้นหลงเหลืออยู่)

ความชื้น (ฐานเปียก หรือ kg น้ำ/kg ของแข็งเปียก):

$$X \text{ (w.b.)} = (M - M_s)/M \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.3 ความชื้นแบบต่างๆ ของวัสดุ [13]

รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของความชื้นแบบต่างๆ ที่สำคัญในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง โดยความชื้นไม่ยึดเหนี่ยว (Unbound moisture) นั้นสามารถจัดออกจากวัสดุได้ง่ายที่สุด เนื่องจากไม่ได้ยึดติดอยู่กับโครงสร้างของวัสดุ ในทางตรงกันข้ามความชื้นยึดเหนี่ยว (Bound moisture) นั้นจะ

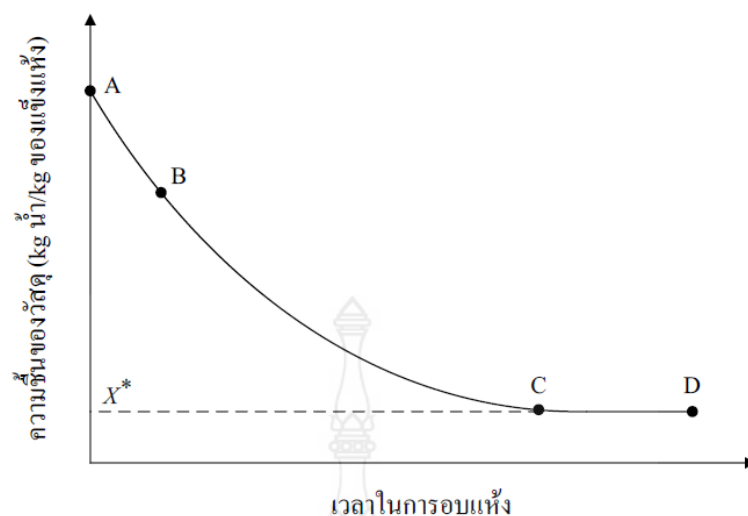
ขจัดออกจากวัสดุได้ยากกว่า ทั้งนี้ค่าความชื้นสูงสุดซึ่งอาจขจัดออกได้จากวัสดุจะขึ้นกับสภาวะการอบแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ในกรณีที่อุณหภูมิของอากาศคงที่ โดยปริมาณความชื้นที่สามารถขจัดออกได้ที่สภาวะการอบแห้งหนึ่งๆ เรียกว่า ความชื้นอิสระ (Free moisture) ส่วนค่าความชื้นต่ำสุดของวัสดุที่สภาวะการอบแห้งหนึ่งๆ เรียกว่าค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, EMC หรือ X^*) ซึ่งก็คือค่าความชื้นที่สภาวะสมดุลระหว่างวัสดุกับอากาศขึ้นที่สภาวะการอบแห้งนั้นๆ นั่นเอง ทั้งนี้ปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการระเหยความชื้นยิดเหนี่ยวนีมีค่าเท่ากับค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอรวมกับค่าพลังงานอีกส่วนหนึ่งที่ต้องใช้ในการทำลายการยึดเหนี่ยวระหว่างความชื้นยิดเหนี่ยวกับโครงสร้างของวัสดุ ซึ่งขึ้นกับความชื้นของวัสดุเอง ทั้งนี้ค่าพลังงานในการทำลายการยึดเหนี่ยวนี้จะมีค่าเป็นศูนย์สำหรับความชื้นไม่ยิดเหนี่ยว และมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับวัสดุต่างชนิดกันที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศค่าหนึ่งๆ โดยทั่วไปแล้วค่าพลังงานในการทำลายการยึดเหนี่ยวนี้มีค่าเป็นบวก และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นของวัสดุมีค่าลดลง

2.5 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

ในการศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งของวัสดุใดวัสดุหนึ่ง โดยทั่วไปแล้วมักนำเสนอผลการศึกษาในรูปของจลนพลศาสตร์การอบแห้ง (Drying kinetics) ซึ่งก็คือข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของวัสดุเมื่อเทียบกับเวลานั่นเอง ทั้งนี้หากพิจารณาการอบแห้งที่สภาวะใดสภาวะหนึ่ง อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของตัวกลางการอบแห้งที่สัมผัสกับวัสดุคงที่ โดยทั่วไปแล้วจะพบว่าในช่วงแรกของการอบแห้งซึ่งอาจเริ่มขึ้นภายหลังช่วงเวลาสั้นๆ ที่วัสดุปรับตัวเข้าสู่สภาวะการอบแห้ง ค่าความชื้นของวัสดุจะลดลงแบบเป็นเชิงเส้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น [13] (ช่วง AB) ในรูปที่ 2.4 แสดงจลนพลศาสตร์การอบแห้งของวัสดุในรูปของเส้นโค้งการอบแห้ง หลังจากช่วงแรกของการอบแห้งผ่านไป ความชื้นของวัสดุจะเริ่มลดลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยอัตราการลดลงของความชื้นจะค่อยๆ ลดลงกับเวลาการอบแห้งที่เพิ่มมากขึ้น (ช่วง BC) จนกระทั่งในที่สุดความชื้นของวัสดุจะไม่เปลี่ยนแปลง หรืออาจกล่าวได้ว่ากระบวนการอบแห้งได้ถึงจุดสิ้นสุด (จุด D) ที่ค่าความชื้นสมดุล (X^*) ที่สภาวะการอบแห้งนั้นๆ ดังนั้นปริมาณความชื้นที่สามารถขจัดออกได้ที่สภาวะการอบแห้งหนึ่งๆ หรือค่าความชื้นอิสระ X_f ตามรูปที่ 2.3 จึงมีค่าเท่ากับ

$$X_f = X - X^* \quad (2.3)$$

ทั้งนี้ต้องระลึกไว้เสมอว่าค่าความชื้นสมดุลของวัสดุที่แตกต่างกันย่อมมีค่าไม่เท่ากัน หรือแม้ว่าจะเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน ค่าความชื้นสมดุลก็ยังแปรเปลี่ยนไปตามสภาวะการอบแห้ง (อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของตัวกลางการอบแห้ง)



รูปที่ 2.4 เส้นโค้งการอบแห้ง (Drying Curve) [13]

ข้อมูลจลนพลศาสตร์การอบแห้งมีความสำคัญ เพราะเป็นข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของวัสดุกับเวลา ซึ่งจะทำให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถระบุเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุให้ได้ความชื้นตามที่ต้องการ จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นกับเวลา สามารถคำนวณอัตราการอบแห้ง (Drying rate, N) ได้ดังสมการที่ (2.4)

$$N = -\frac{M_s}{A} \frac{dx}{dt} \quad \text{หรือ} \quad N = -\frac{M_s}{A} \frac{dx_f}{dt} \quad (2.4)$$

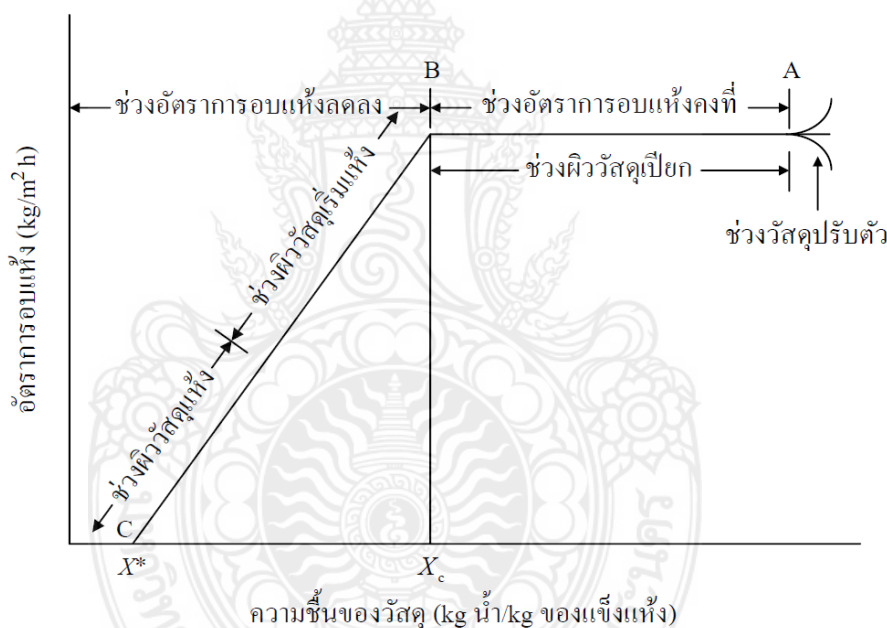
หากทำการวาดเส้นโค้งการอบแห้งโดยใช้ค่าความชื้น (w.b.) ลักษณะของเส้นโค้งจะแตกต่างไปจากที่แสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งวาดโดยใช้ค่าความชื้น (d.b.)

โดยที่ N คืออัตราการอบแห้ง อัตราการระเหยความชื้นจากผิวของวัสดุ ซึ่งมีหน่วยเป็นมวลของความชื้นต่อพื้นที่ผิวของวัสดุต่อหน่วยเวลา เช่น $\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$, A คือพื้นที่ผิวของวัสดุที่เกิดการระเหยน้ำ ซึ่งอาจแตกต่างจากพื้นที่ผิวของวัสดุที่ได้รับความร้อน เช่น ในกรณีที่วัสดุวางอยู่บนภาตที่บ ด้านล่างของวัสดุอาจได้รับความร้อนซึ่งเกิดการนำผ่านขึ้นมาจากภาต แต่ไม่อาจมีความชื้นถ่ายเทผ่านพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับภาตนั้นไปได้) และ M_s คือมวลของแข็งแห้งของวัสดุ ในกรณีที่ไมทราบค่า A ก็อาจจะระบุค่าอัตราการอบแห้งในรูปของมวลน้ำที่ระเหยไปต่อหน่วยเวลาก็ได้

หากนำค่า N มาวาดเพื่อแสดงความสัมพันธ์กับค่า X จะได้เส้นโค้งที่เรียกว่าเส้นโค้งอัตราการอบแห้ง (Drying rate curve) ซึ่งแตกต่างจากเส้นโค้งการอบแห้งในรูปที่ 2.4 พึงระลึกไว้เสมอว่าข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการสร้างเส้นโค้งทั้ง 2 ชนิดนี้ต้องเป็นข้อมูลที่ได้จากการอบแห้งที่สภาวะใดสภาวะหนึ่งเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติสภาวะภายในเครื่องอบแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องอบแห้งที่มีขนาดใหญ่ หรือเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องที่มีการเคลื่อนที่ของวัสดุภายในเครื่องอบแห้ง มักไม่คงที่

จึงต้องระมัดระวังในการนำข้อมูลจลนพลศาสตร์การอบแห้งที่ได้จากการทดลองที่สภาวะใดสภาวะหนึ่งซึ่งมีค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของตัวกลางการอบแห้งที่สัมผัสกับวัสดุคงที่ไปใช้งาน

รูปที่ 2.5 แสดงเส้นโค้งอัตราการอบแห้งเชิงทฤษฎี (Theoretical drying rate curve) ซึ่งอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงหลักๆ หากไม่นับช่วงที่วัสดุปรับตัวเข้าสู่สภาวะการอบแห้ง คือช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (ช่วง AB) และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (ช่วง BC) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เป็นช่วงที่ผิวของวัสดุมีน้ำหล่อเลี้ยงอยู่ตลอดเวลา จึงทำให้อัตราการระเหยน้ำจากผิวของวัสดุขึ้นอยู่กับความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายนอกวัสดุเท่านั้น กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือหากความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายนอกวัสดุนั้นน้อย น้ำจะระเหยจากผิวของวัสดุได้อย่างรวดเร็ว อัตราการอบแห้งจะมีค่าสูง ในทางตรงกันข้ามหากความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายนอกวัสดุนั้นมาก น้ำจะระเหยจากผิวของวัสดุได้ช้า อัตราการอบแห้งจะมีค่าต่ำ



รูปที่ 2.5 เส้นโค้งอัตราการอบแห้งเชิงทฤษฎี [13]

ร้อนและมวลสารภายนอกวัสดุนั้นมีค่ามาก น้ำจะระเหยจากผิวของวัสดุได้ช้า อัตราการอบแห้งในช่วงนี้จะมีค่าต่ำ ทั้งนี้ทราบกันดีว่าค่าความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายนอกวัสดุนั้นระบุโดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (Mass transfer coefficient) ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองค่านี้ขึ้นกับค่าความเร็วและทิศทางไหลของตัวกลางการอบแห้งผ่านวัสดุเป็นหลัก ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ อุณหภูมิผิวของวัสดุจะมีค่าคงที่อยู่ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของตัวกลางการอบแห้งเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากผิวของวัสดุมีชั้นฟิล์มของน้ำหล่อเลี้ยงอยู่ตลอดเวลา

เมื่อความชื้นของวัสดุลดลงจนถึงค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่าค่าความชื้นวิกฤต (Critical moisture content, X_c) ผิวของวัสดุจะเริ่มไม่มีชั้นฟิล์มของน้ำหล่อเลี้ยงอยู่มากพอที่จะทำให้เกิดการระเหยด้วยอัตราที่เท่ากับอัตราการระเหยในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ประกอบกับน้ำในโครงสร้างเคลื่อนที่มาที่ผิวของวัสดุไม่ทันต่อการระเหย อัตราการอบแห้งในช่วงนี้จึงมีค่าลดลง ดังนั้นจึงเรียกช่วงการอบแห้งช่วงนี้ว่าช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling drying rate period, FRP) ในช่วงนี้อัตราการอบแห้งจะขึ้นกับความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในวัสดุเป็นหลัก กระบวนการอบแห้งในช่วงนี้จึงขึ้นกับทั้งสภาวะในการอบแห้งและชนิดของวัสดุที่นำมาอบแห้ง และแตกต่างจากการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ซึ่งกระบวนการอบแห้งขึ้นกับสภาวะการอบแห้งเป็นส่วนใหญ่ ชนิดของวัสดุมีผลน้อย ท้ายที่สุดความชื้นของวัสดุก็จะลดลงจนกระทั่งเข้าสู่ค่าความชื้นสมดุล ในการอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพมักไม่พบช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากค่าความชื้นวิกฤตของอาหารและวัสดุชีวภาพมักมีค่าค่อนข้างสูง

2.6 เครื่องอบแห้งแบบถาด

ในการอบแห้งวัสดุที่มีลักษณะเป็นชิ้น เป็นก้อน หรือเป็นแท่ง ซึ่งเป็นลักษณะที่พบได้โดยทั่วไปของอาหารและวัสดุชีวภาพนั้น นิยมใช้เครื่องอบแห้งแบบถาด (Tray dryers) มากที่สุด เครื่องอบแห้งแบบนี้อาจมีลักษณะเป็นตู้ซึ่งภายในจัดเรียงเป็นชั้นสำหรับใส่ถาดบรรจุวัสดุที่ต้องการอบแห้ง ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.6 หรืออาจเป็นห้องอบแห้งที่สามารถเข็นรถเข็น (Trolley) ซึ่งวางเรียงถาดใส่วัสดุเข้าไปได้ ภายในห้องอบแห้งจะมีการติดตั้งพัดลมเพื่อหมุนเวียนตัวกลางการอบแห้ง ซึ่งนิยมใช้อากาศร้อนมากที่สุด เพื่อให้วัสดุได้รับพลังงานความร้อนอย่างทั่วถึงไม่ว่าจะอยู่บริเวณใดของห้องอบแห้ง ด้วยเหตุนี้การออกแบบหรือเลือกระบบหมุนเวียนตัวกลางการอบแห้งจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง การออกแบบระบบหมุนเวียนตัวกลางการอบแห้งให้ทำงานได้ดังกล่าวนั้นอาจทำได้หลายวิธี ในกรณีที่มีการหมุนเวียนตัวกลางการอบแห้งไม่ดีพอ วัสดุที่สัมผัสกับตัวกลางการอบแห้งมากกว่าย่อมแห้งได้เร็วกว่าการทำให้วัสดุแห้งหรือมีความชื้นไม่สม่ำเสมอ นำไปสู่ความเสียหายของผลิตภัณฑ์ได้



รูปที่ 2.6 เครื่องอบแห้งแบบถาด [13]

จุดเด่นของเครื่องอบแห้งแบบถาดคือความสามารถในการอบแห้งวัสดุได้หลากหลาย สามารถทำการอบแห้งวัสดุที่มีรูปร่าง ขนาด หรือพฤติกรรมในการอบแห้งที่แตกต่างกันได้มาก ทั้งนี้เพราะเครื่องอบแห้งชนิดนี้ไม่มีข้อจำกัดในแง่ของเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุ สามารถใช้ได้ทั้งกับวัสดุที่ต้องใช้เวลานาน หรือใช้เวลาสั้นในการอบแห้ง สามารถปรับเปลี่ยนสภาวะการทำงานได้ง่าย และวัสดุไม่ต้องการเคลื่อนที่ในขณะที่ทำการอบแห้ง ทำให้ตัดปัญหาเรื่องข้อจำกัดในการใช้งานกับวัสดุที่มีรูปร่างหลากหลาย อย่างไรก็ตาม เครื่องอบแห้งแบบถาดก็มีข้อเสียในแง่ของค่าใช้จ่ายที่สูง และเวลาที่ต้องใช้ในการลำเลียงวัสดุเข้าและออกจากเครื่องอบแห้ง ข้อจำกัดอีกประการหนึ่งของเครื่องอบแห้งชนิดนี้คือ ต้องทำการอบแห้งแบบเป็นกะ (Batch) เท่านั้น ข้อควรระวังอีกประการหนึ่งในการออกแบบหรือเลือกเครื่องอบแห้งชนิดนี้ก็คือ ปัญหาที่เกี่ยวกับการหมุนเวียนของตัว กลางการอบแห้งภายในห้องอบแห้ง ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั่นเอง

2.7 การวิเคราะห์พลังงาน

พลังงาน คือ ความสามารถทำงานได้ในช่วงเวลานึงที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง พลังงานสามารถเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่ง และสามารถถ่ายโอนจากบริเวณหนึ่งไปเป็นอีกบริเวณหนึ่งได้ ในการเปลี่ยนรูปพลังงานหรือถ่ายโอนพลังงานจะเป็นไปตามหลักการอนุรักษ์พลังงาน การวิเคราะห์พลังงานจะใช้กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ ในกระบวนการอบแห้งเกี่ยวข้องกับกระบวนการทำความร้อน กระบวนการทำความเย็น และกระบวนการลดความชื้น ซึ่งกระบวนการเหล่านี้สามารถพิจารณาให้เป็นกระบวนการไหลแบบสภาวะคงตัว และทำการวิเคราะห์โดยการประยุกต์ใช้กฎการอนุรักษ์มวล (สำหรับอากาศแห้งและความชื้น) และหลักการอนุรักษ์พลังงาน สมการทั่วไปของการอนุรักษ์มวลของอากาศแห้ง (ไม่มีความชื้น) [14] ดังสมการต่อไปนี้

$$\sum \dot{m}_{ai} = \sum \dot{m}_{ao} \quad 2.5$$

โดยที่ $\dot{m}_{ai}$ (kg/s) คืออัตราการไหลของมวลอากาศทางเข้า และ $\dot{m}_{ao}$ (kg/s) คืออัตราการไหลของมวลอากาศทางออกของกระบวนการอบแห้ง จากสมการที่ 2.5 สำหรับอากาศที่แห้ง (ไม่มีความชื้น) แต่สำหรับในกระบวนการอบแห้งด้วยกระบวนการพาความร้อนโดยทั่วไปนั้นจะมีความชื้นภายในวัสดุระเหยผสมกับลมร้อนที่ไหลผ่านกระบวนการอบแห้ง ดังนั้นสามารถอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\sum (\dot{m}_{wi} + \dot{m}_{mp}) = \sum \dot{m}_{wo} \quad 2.6$$

$$\text{หรือ} \quad \sum (\dot{m}_{ai} w_i + \dot{m}_{mp}) = \sum \dot{m}_{ai} w_o \quad 2.7$$

โดยที่ $\dot{m}_{wi}$ และ $\dot{m}_{wo}$ คืออัตราการไหลของมวลความชื้นของอากาศทางเข้าและทางออกของกระบวนการอบแห้งตามลำดับ $\dot{m}_{mp}$ คืออัตราการไหลของมวลความชื้นที่ระเหยออกจากวัสดุที่ทำการอบแห้ง w_i และ w_o คืออัตราส่วนความชื้นความชื้นที่ไหลเข้าและทางออกของกระบวนการอบแห้ง (kg ไอน้ำ/kg อากาศแห้ง)

สำหรับการวิเคราะห์พลังงานในงานวิจัยนี้ จะมีการวิเคราะห์อยู่ 2 ส่วน คือ ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ (Energy Utilization : EU, kW.) ได้จากสมการต่อไปนี้ [6]

$$EU = \dot{m}(h_i - h_o) \quad 2.8$$

เมื่อ $\dot{m}$ (kg/s) คืออัตราการไหลเชิงมวล ส่วน h_i คือเอนทัลปีขาเข้าและ h_o คือเอนทัลปีขาออก (kJ/kg) และในการวิเคราะห์พลังงานส่วนที่ 2 จะพิจารณาค่าประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency : η_{en} , %) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ [6]

$$\eta_{en} = \left(\frac{h_i - h_o}{h_i} \right) \times 100 \quad 2.9$$

โดยเอนทัลปีขาเข้าและขาออกหาได้จากสมการ [14], [6]

$$h = (\dot{m} c_p T) + (w h_g) \quad 2.10$$

เมื่อ $\dot{m}$ (kg/s) คืออัตราการไหลเชิงมวลส่วน h_i (kJ/kg) คือเอนทัลปีขาเข้าและ h_o (kJ/kg) คือเอนทัลปีขาออก ส่วน h_g (kJ/kg) คือความร้อนของไอน้ำอิ่มตัว (Saturate vapor) C_p (kJ/kg·°C) คือค่าความจุความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิใดๆ w คือ Humidity ratio of drying air และ T (°C) คืออุณหภูมิใดๆ

2.8 การวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี

เอ็กเซอร์จี (Exergy) คือพลังงานที่เราดึงเอาออกมาใช้ได้ (Usable energy) จากระบบ ตัวพลังงาน (Energy) ไม่หายไป แต่เปลี่ยนรูป แต่พลังงานที่เราดึงมาใช้ได้มีจำกัด เช่น ให้ระบบเรามีพลังงานมากกว่าสิ่งแวดล้อม พอเราดึงเอ็กเซอร์จีมาใช้ ถึงแม้พลังงานรวมจะมีเท่าเดิม แต่รูปแบบมีเอ็นโทรปีเยอะขึ้น ทำให้ค่าพลังงานที่ดึงมาได้มีอย่างจำกัด จนกระทั่งถึงสมดุลทางความร้อนกับสิ่งแวดล้อมแล้วถึงแม้ระบบจะยังมีพลังงาน (Energy) รวมเท่าเดิมอยู่ แต่เราก็ดึงเอ็กเซอร์จี มาใช้ไม่ได้แล้ว ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีของกระบวนการรอบหนึ่งดีปิ้นนั้นอยู่บนพื้นฐานของกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ เพื่อให้ง่ายในการวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องกำหนดสถานะและขอบเขตทางเข้าและทางออกของกระบวนการรอบหนึ่ง เพื่อนำไปคำนวณหาเอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้า (Exergy inflow) เอ็กเซอร์จีที่ไหลออก (Exergy outflow) และเอ็กเซอร์จีสูญเสีย (Exergy loss) โดยเอ็กเซอร์จีที่คำนวณได้นั้นจะเป็นเอ็กเซอร์จีที่พิจารณาให้อยู่ในสภาวะแบบคงตัว (Steady State) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [15]

$$\text{Exergy} = \bar{C}_p \left[(T - T_\infty) - T \ln \frac{T}{T_\infty} \right] \quad 2.11$$

เมื่อ T คืออุณหภูมิใดๆ และ T_∞ คืออุณหภูมิอากาศแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$) $\bar{C}_p$ คือค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของลมร้อน

โดยที่เอ็กเซอร์จีสูญเสีย (Exergy Loss) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Exergy loss} = \text{Exergy inflow} - \text{Exergy outflow}$$

$$\sum \text{Ex}_L = \sum \text{Ex}_i - \sum \text{Ex}_o \quad 2.12$$

สำหรับการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี (Exergy Efficiency) หาได้จากสมการ

$$\text{Exergy Efficiency} = \frac{\text{Exergy}_{out}}{\text{Exergy}_{in}} \times 100 \quad 2.13$$

2.9 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างการอบแห้ง

Lewis (1921) และ Sherwood (1929a, b) เป็นผู้ริเริ่มงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุขึ้นอย่างเป็นระบบ โดย Sherwood (1929a) ได้แบ่งกลไกการถ่ายเทมวลสาร (ความชื้น) ระหว่างการอบแห้งออกเป็น 3 แบบ ดังนี้ [13]

1. น้ำ (ความชื้น) เกิดการระเหยที่บริเวณผิวของวัสดุ และความต้านทานในการถ่ายเทมวลสารภายในวัสดุมีค่าต่ำ เมื่อเทียบกับความต้านทานในการถ่ายเทมวลสารจากผิวของวัสดุไปสู่สิ่งแวดล้อม

2. น้ำเกิดการระเหยที่บริเวณผิวของวัสดุ และความต้านทานในการถ่ายเทมวลสารภายในวัสดุมีค่าสูง เมื่อเทียบกับความต้านทานในการถ่ายเทมวลสารจากผิวของวัสดุไปสู่สิ่งแวดล้อม

3. น้ำ ซึ่งอาจอยู่ในสถานะของเหลวหรือไอ เกิดการแพร่จากภายในวัสดุมาที่บริเวณผิวของวัสดุ และความต้านทานในการถ่ายเทมวลสารภายในวัสดุมีค่าสูง เมื่อเทียบกับความต้านทานในการถ่ายเทมวลสารทั้งหมด

ทั้งนี้หากการอบแห้งเริ่มต้นขึ้นในขณะที่วัสดุยังมีความชื้นสูง การถ่ายเทมวลสารในช่วงแรกจะเป็นไปตามกลไกแบบที่ 1 ซึ่งก็คือการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่นั่นเอง อย่างไรก็ตาม เมื่อความชื้นของวัสดุลดต่ำกว่าค่าความชื้นวิกฤต กลไกการถ่ายเทมวลสารจะเปลี่ยนไป โดยอาจเป็นไปตามกลไกที่ 2 หรือกลไกที่ 3 ก็ได้

ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ น้ำจะระเหยจากผิวของวัสดุได้โดยอิสระโดยไม่ขึ้นกับชนิดและโครงสร้างของวัสดุ ดังนั้นจึงสามารถคำนวณอัตราการอบแห้ง ซึ่งก็คืออัตราการระเหยน้ำจากผิวของวัสดุได้โดยง่าย หากทราบสภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิ ความเร็ว ตลอดจนทิศทางการไหลของตัวกลางการอบแห้งเมื่อเทียบกับผิวของวัสดุ และพื้นที่ผิวของวัสดุ ในกรณีการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อนและไม่มีการสูญเสียความร้อนจากห้องอบแห้งไปสู่สิ่งแวดล้อม ตลอดจนไม่มีการให้ความร้อนกับวัสดุโดยวิธีอื่นใดนอกจากการพาความร้อน อุณหภูมิผิวของวัสดุจะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง ด้วยเหตุนี้จึงสามารถคำนวณอัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ได้จากสมการที่ (2.14)

$$N_c = \frac{h(T_{air} - T_{wb})}{\lambda_s} \quad 2.14$$

โดยที่ N_c คืออัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$) T_{wb} คืออุณหภูมิกระเปาะเปียกที่ผิววัสดุ ($^{\circ}\text{C}$ หรือ K) ซึ่งมีค่าเท่ากับอุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำที่ความดันของห้องอบแห้ง T_{air} คืออุณหภูมิอากาศ ($^{\circ}\text{C}$ หรือ K) λ_s คือความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอน้ำที่ความดันของห้องอบแห้ง ($\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$)

ทั้งนี้สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้จากสมการพื้นฐานในหนังสือหรือบทความที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร ในทางปฏิบัติพบว่าอัตราการระเหยน้ำในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่มักมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2.14 โดย Kudra และ Strumillo (1986) รายงานว่า อัตราการระเหยน้ำในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ที่ได้จากการทดลอง มักมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2.14 ประมาณร้อยละ 30 และมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิด

และโครงสร้างของวัสดุด้วย สำหรับการคำนวณอัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงนั้นทำได้ยากกว่าการคำนวณอัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และมักต้องอาศัยข้อมูลผลการทดลองประกอบด้วยเสมอ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้น (จลนพลศาสตร์การอบแห้ง) ของอาหารและวัสดุชีวภาพนั้นอาจทำได้หลายรูปแบบ ได้แก่ การพัฒนาแบบจำลองเอมพิริคัล (Empirical Models) และ แบบจำลองเชิงทฤษฎี (Theoretical Models)

2.10 แบบจำลองเอมพิริคัล

แบบจำลองเอมพิริคัลเป็นแบบจำลองอย่างง่าย ซึ่งสามารถใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งของวัสดุ โดยอาศัยการปรับค่าคงที่ของแบบจำลอง จนกระทั่งผลการจำลองสอดคล้องกับผลการทดลอง กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ การใช้แบบจำลองเอมพิริคัลก็คือการปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) ให้ผลการจำลองตรงกับผลการทดลองนั่นเอง แม้ว่าแบบจำลองประเภทนี้จะไม่สามารถให้คำอธิบายหรือรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับกลไกการอบแห้งได้ เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่มีจุดมุ่งหมายหลักแต่เพียงการทำนายผลการทดลอง แต่แบบจำลองประเภทนี้ก็ยังเป็นแบบจำลองที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากที่สุดประเภทหนึ่ง เนื่องจากใช้งานได้ง่าย สะดวกและรวดเร็ว โดยทั่วไปแบบจำลองเอมพิริคัลมักอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) และเวลาในการอบแห้ง ดังสมการที่ 2.16

$$MR = \frac{X_t - X^*}{X_0 - X^*} = f(t) \quad 2.16$$

* อัตราส่วนความชื้น คืออัตราส่วนระหว่างความชื้นอิสระของวัสดุที่เวลาใดๆ ต่อความชื้นอิสระของวัสดุที่ เวลาเริ่มต้นของกระบวนการอบแห้ง หรืออาจกล่าวได้ว่าอัตราส่วนความชื้นก็คืออัตราส่วนระหว่างแรงขับเคลื่อน (Driving Force) ของการถ่ายเทมวลสารที่เวลาใดๆ ต่อแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวลสาร ทั้งหมดของวัสดุ ด้วยเหตุนี้สมการที่ 2.16 จึงเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวลสารกับเวลาการอบแห้ง ซึ่งสอดคล้องเป็นอย่างดีกับข้อมูลจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

โดยที่ X_t คือความชื้นของวัสดุที่เวลาใดๆ (kg น้ำ/kg ของแข็งแห้ง) X_0 คือความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (kg น้ำ/kg ของแข็งแห้ง) และ X^* คือความชื้นสมดุลของวัสดุ (kg น้ำ/kg ของแข็งแห้ง ความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นสามารถนำไปใช้ในการจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งของวัสดุ หรืออีกนัยหนึ่ง คือการทำนายความชื้นของวัสดุที่เวลาใดๆ ได้เป็นอย่างดีเมื่อความต้านทานการถ่ายเทมวลสารภายนอกชิ้นวัสดุมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความต้านทานการถ่ายเทมวลสารภายในชิ้นวัสดุ หรืออีกนัยหนึ่งคือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (Mass Transfer Coefficient) ของตัวกลางการอบแห้ง

ที่บริเวณผิวของวัสดุมีค่าสูงมาก ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่ว่าความชื้นบริเวณผิวของวัสดุจะมีค่าเท่ากับ ความชื้นสมดุลที่สภาวะการอบแห้งนั้นโดยทันทีทันใด หลังจากที่มีการอบแห้งเริ่มต้นทั้งนี้สัมประสิทธิ์ การถ่ายเทมวลสารจะมีค่าสูงเมื่อตัวกลางการอบแห้งไหลผ่านผิวของวัสดุด้วยความเร็วสูง ซึ่งจะทำให้ ตัวกลางการอบแห้งสามารถพาเอาความชื้นที่ระเหยจากผิวของวัสดุไปได้อย่างรวดเร็ว จนกระทั่ง ความชื้นบริเวณผิวของวัสดุมีค่าเท่ากับ ความชื้นสมดุลที่สภาวะการอบแห้งได้อย่างรวดเร็วดังที่ได้ ตั้งสมมติฐานไว้นั่นเอง

ตารางที่ 2.2 รวบรวมแบบจำลองเอมพิริคัลที่นิยมใช้ในการจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ของอาหารและวัสดุชีวภาพชนิดต่างๆ ทั้งนี้ไม่มีกฎเกณฑ์หรือหลักการใดที่อาจนำมาใช้สรุปได้ว่าแบบ จำลองใดในตารางที่ 2.2 จะเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งอาหารหรือวัสดุชีวภาพ ชนิดหนึ่งๆ ภายใต้กระบวนการและสภาวะการอบแห้งหนึ่งๆ อย่างไรก็ตาม มีรายงานเป็นจำนวนมาก ที่ระบุว่าแบบจำลองของ Page รวมทั้ง Page แบบปรับปรุง และของ Midilli et al. สามารถใช้ในการ จำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งของอาหารและวัสดุชีวภาพหลากหลายชนิดได้เป็นอย่างดี

ตาราง 2.2 แบบจำลองเอมพิริคัลที่นิยมใช้ในการจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง [13]

ลำดับ	แบบจำลอง	สมการความสัมพันธ์
1	Newton / Lewis	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$
4	Handerson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
6	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
7	Two-term	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
8	Wan and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$

MR คือ อัตราส่วนความชื้น t คือเวลาในการอบแห้ง (นาที) a, b, c, k, k_0 , k_1 และ n คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการปรับเส้นโค้งให้ผลการจำลองสอดคล้องกับผลการทดลอง

อย่างไรก็ตาม ควรทดสอบแบบจำลองโดยเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลอง และ วิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบด้วยวิธีการทางสถิติ โดยการคำนวณและวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ และค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดยกกำลังสอง (Root mean square error) เพื่อให้มั่นใจว่า แบบจำลองนั้น เหมาะสมที่สุดสำหรับการจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งที่สนใจ

มีบทความวิจัยเป็นจำนวนมากที่รายงานถึงความสามารถของแบบจำลองเอมพิริคัล ในการจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพชนิดต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นกรณีการอบแห้งขึ้น

อาหาร ซึ่งวางเป็นชั้นเดียวหรือชั้นบางบนภาชนะที่มีตัวกลางการอบแห้งไหลผ่าน โดยที่สภาวะของตัวกลางการอบแห้งได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็ว ตลอดจนทิศทางการไหล ที่บริเวณโดยรอบชั้นอาหารนั้นไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาการอบแห้ง หรือแม้กระทั่งในกรณีของการอบแห้งอาหารหรือวัสดุชีวภาพที่เป็นอนุภาคของแข็ง เช่น กรณีการอบแห้งแบบฟลูอิดไชด์เบด ตลอดจนกระทั่งกรณีการอบแห้งแบบใช้คลื่นไมโครเวฟและการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่สภาวะการอบแห้งเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เช่น ในกรณีการอบแห้งที่มีการลดอุณหภูมิของตัวกลางการอบแห้งลงหลังจากการอบแห้งผ่านไปได้ระยะหนึ่ง พบว่าแบบจำลองเอมพิริคัลไม่สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งได้ดี

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี และทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เกี่ยวกับการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบถาด การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง การวิเคราะห์ค่าพลังงาน การวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี และการใช้แบบจำลองเอมพิริคัลในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง โดยมีการสรุปจากการทบทวนวรรณกรรมดังนี้

วสันต์ จินธาดา และคณะ [16] ได้ทำการทดลองอบแห้งยางแผ่นด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และทำการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้ง โดยใช้เวลาในการอบแห้ง 5 วัน โดยวันที่ 1 ควบคุมอัตราการไหลอากาศไว้ที่ 0.248 kg/s วันที่ 2-5 ควบคุมอัตราการไหลอากาศไว้ที่ 0.020 kg/s การอบแห้งวันที่ 1 มีอุณหภูมิห้องอบแห้ง $32-40^\circ\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ห้องอบแห้ง $44-72\%$ และรังสีดวงอาทิตย์ $428-1,089 \text{ watt/m}^2$ วันที่ 2-5 อุณหภูมิห้องอบแห้ง $34-54^\circ\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ห้องอบแห้ง $27-72\%$ และรังสีดวงอาทิตย์ $136-1,042 \text{ watt/m}^2$ จากผลการทดลองพบว่าที่อัตราการไหลอากาศสูง อุณหภูมิในห้องอบแห้งจะต่ำลงในขณะที่ประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์สูงขึ้น ในทางกลับกันเมื่ออัตราการไหลของอากาศต่ำลง อุณหภูมิในห้องอบแห้งจะสูงขึ้น ในขณะที่ประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ต่ำลง เครื่องอบแห้งมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ $31,369.27 \text{ วัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม}$ ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ $465.77 \text{ วัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม}$ และประสิทธิภาพทางความร้อน 2.11% การอบแห้งวันที่ 1 มีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี $12-79\%$ ต่ำกว่าวันที่ 2-5 มีประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี $42-94\%$ เนื่องจากที่อัตราการไหลอากาศสูงเอ็กเซอร์จีสูญเสียก็จะสูงตามไปด้วยทำให้ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีต่ำลง

รัฐศักดิ์ พรหมมาศ และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีในกระบวนการอบแห้งวัสดุพืชนหลายชั้นโดยใช้ลมร้อน โดยทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ลมร้อนด้วยเครื่องอบลมร้อนแบบถาด ที่ทางเข้าก่อนการอบแห้งและทางออกหลังการอบแห้งที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์ โดยในการทดลองได้ทำการอบแห้งด้วยอากาศความเร็ว 0.5 m/s และอุณหภูมิลมร้อน 50°C โดยทำการอบแห้งต่อเนื่องจำนวน 6 ชั่วโมง ในระหว่างการทดลองทำการบันทึก อุณหภูมิ

แวดล้อมและความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิของเพคเบตวัสดุพูน อุณหภูมิอากาศทางเข้าและทางออกของเครื่องอบแห้งทุกๆ 15 นาที จากการอบแห้งวัสดุพูนพบว่าพลังงานความร้อนที่ใช้เป็นประโยชน์ ในการระเหยความชื้น จะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีค่ามากพลังงานความร้อนที่ใช้จึงมีค่ามาก ส่วนเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียที่ไหลเข้าและทางออกก็จะแปรเปลี่ยนไปกับชนิดของแพคเบตที่ใช้ในการอบแห้ง

Ndubisi A. Avlara และคณะ [6] ทำการศึกษาวិเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จี ของการอบแห้งแป้งมันสำปะหลังในเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด สมรรถนะของระบบในแง่ของการใช้พลังงาน อัตราส่วนการใช้พลังงาน ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน เอ็กเซอร์จีไหลเข้าและไหลออก, การสูญเสียเอ็กเซอร์จี และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี ผลการวิจัยพบว่าอัตราส่วนการใช้พลังงานและการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นจาก 1.93 เป็น 5.51 J/s และ 0.65 เป็น 0.6 เมื่อการอบแห้งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 40 เป็น 60 °C ประสิทธิภาพการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นจาก 16.036 เป็น 30.645% ในขณะที่เอ็กเซอร์จีการไหลเข้าการไหลออกและการสูญเสียเพิ่มขึ้นจาก 0.399 เป็น 2.686, 0.055 เป็น 0.555 และ 0.344 เป็น 2.131 J/s ตามลำดับ

Akpinar E.K. [18] ได้ศึกษากระบวนการอบแห้งพริกหยวกแดงแผ่นบาง โดยการอบแห้งในเครื่องอบแห้งที่อุณหภูมิการอบแห้ง 55 60 และ 70 °C ความเร็วลมต่อเนื่อง 1.5 m/s เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พลังงานใช้ประโยชน์และเอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้ง โดยการใช้กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์พลังงานเพื่อนำไปสู่การประมาณค่าอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ให้เป็นประโยชน์ และประยุกต์ใช้กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี

Hussein [19] ศึกษาการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จี ในระหว่างการค้าขายน้ำมันเทศที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน น้ำมันเทศหั่นเป็นสามส่วน ลีोटแรกถูกเตรียมล่วงหน้าในโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ 0.5% (SMB) ลีोटที่สองถูกลวกด้วยน้ำ (WAB) และลีोटสุดท้ายไม่ถูกบำบัด ตัวอย่างถูกทำให้แห้งที่อุณหภูมิการทำแห้งที่แตกต่างกัน (60°C 70°C และ 80°C และความเร็วลมคงที่ 1.5 m/s การประเมินการใช้พลังงาน อัตราส่วนการใช้พลังงาน อัตราการถ่ายเทความร้อน การสูญเสียเอ็กเซอร์จี และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี ผลการวิจัยพบว่ายิ่งอุณหภูมิสูง ระยะเวลาในการอบแห้งก็จะสั้นลงโดยไม่คำนึงถึงการบำบัด อย่างไรก็ตาม ขึ้นน้ำมันเทศ WAB ใช้เวลาในการทำแห้งนานกว่า SMB และ UNT การวิเคราะห์พลังงานแสดงให้เห็นว่า EU, EUR และ Qevap เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ขึ้น WAB มี EU, EUR และ Qevap สูงสุด ถัดจาก SMB และ UNT มีค่าน้อยที่สุด สำหรับการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี เอ็กเซอร์จีสูญเสีย และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิในการอบแห้ง จะได้การสูญเสียพลังงานสูงสุดและต่ำสุดที่อุณหภูมิ 80°C และ 60°C ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีต่ำที่สุดอยู่ที่ 60°C ดังนั้น การอบแห้งที่ 70°C และการปรับสภาพด้วย SMB เป็นสถานะที่ยอมรับได้มากที่สุดโดยพิจารณาจากการสูญเสียการเอ็กเซอร์จีปานกลางที่มีประสิทธิผล (8.69 KJ/s) และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี (0.38)

D. Yogendrasasidhar และ Y. Pydi Setty [5] ทดลองอบแห้งเมล็ดข้าวฟ่างด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไธเบต พบว่าเอกเซอร์จีสูญเสียเกิดจากปัจจัยด้านอุณหภูมิอากาศอบแห้ง อัตราการไหลอากาศ ความหนาเบต และความชื้นเริ่มต้นตัวอย่างอบแห้งนอกจากนั้นค่าเอกเซอร์จีลดลงเมื่ออัตราการไหลอากาศและระยะเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพเอกเซอร์จีเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง อัตราการไหลอากาศ และระยะเวลาการอบแห้ง ในขณะที่การเพิ่มความหนาเบตและความชื้นเริ่มต้นตัวอย่างอบแห้งมีผลให้ประสิทธิภาพเอกเซอร์จีลดลง

Akpinar E.K. [3] ได้ทำการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้งแบบถาด ของพริกไทยในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยการพาความร้อนแบบบังคับ โดยใช้ข้อมูลการทดลองในวรรณกรรมสำหรับพริกเขียวยาว (Akpinar และ Bicer ใน Energy Convers Manag 49: 1367–1375, 2008) จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีและศักยภาพในการปรับปรุงของระบบอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ลดลงตามระยะเวลาการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น อัตราส่วนเอ็กเซอร์จีสูญเสียเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น ดัชนีความยั่งยืนด้านการผลิตเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี และลดลงเมื่อประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีลดลง ปัจจัยผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมลดลงตามการเพิ่มประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี

María Castro และคณะ [4] ได้วิจัยการวิเคราะห์พลังงานของการอบแห้งแบบพาความร้อนอย่างต่อเนื่องของหัวหอม โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วลมที่มีผลกระทบต่อเอ็กเซอร์จี สมดุลพลังงานและเอ็กเซอร์จีดำเนินการโดยคำนึงถึงห้องอบแห้ง วิเคราะห์พฤติกรรมโดยพิจารณาจากประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี อัตราการสูญเสียเอ็กเซอร์จี การปรับปรุงเอ็กเซอร์จีและดัชนีความยั่งยืน พบว่า อัตราการสูญเสียเอ็กเซอร์จีจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและความเร็วของอากาศที่ทำให้แห้ง เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมจะแตกต่างกันไปตามสภาวะการทำงาน ในอีกทางหนึ่งประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเร็วลม พฤติกรรมนี้เกิดจากการที่การใช้พลังงานได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้น เนื่องจากมีการใช้พลังงานในปริมาณมากที่สุดเพื่อการระเหยของความชื้น อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีจะลดลงตามการเพิ่มอุณหภูมิเนื่องจากความชื้นอิสระลดลง ความชื้นจึงเริ่มกระจายออกจากภายในเนื้อหัวหอมสู่พื้นผิว ค่าศักยภาพการปรับปรุงแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้งหัวหอมสามารถแก้ไขได้ ดัชนีความยั่งยืนของห้องอบแห้งแตกต่างกันไปจาก 1.9 ถึง 5.1 เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการ จะต้องแก้ไขพารามิเตอร์เพื่อที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีของกระบวนการ

Abiodun Okunola [7] ได้ทดลองเครื่องอบแห้งแบบตู้อัตโนมัติแบบบังคับพาที่รวมเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูลแบบดาต้าล็อกเกอร์ โดยใช้ตัวอย่างกระเจี๊ยบเขียว ถูกทำให้แห้งในเครื่องอบแห้งที่อุณหภูมิการอบแห้ง 50 60 และ 70 °C โดยใช้มวลต่างกันสามระดับ 200 300 และ 400 กรัม ที่ความเร็วลมต่อเนื่อง 0.7 m/s เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้ง

ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการใช้พลังงาน การใช้พลังงาน และอัตราส่วนการใช้พลังงาน เพิ่มขึ้นจาก 26.59 เป็น 68.24% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 70 °C ในขณะที่ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีแตกต่างกันไปตั้งแต่ 49.15 ถึง 63.47% ผลการวิจัยพบว่าประสิทธิภาพการเอ็กเซอร์จีลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการอบแห้ง

Arepally D. [8] ทดลองจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งมะเขือเทศ มีปริมาณการอบแห้งที่แตกต่างกันในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนตามธรรมชาติแบบผสม นอกจากนี้ยังประมาณอัตราส่วนการใช้พลังงาน (EUR) และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี ขึ้นมะเขือเทศถูกทำให้แห้งเพื่อให้ได้ปริมาณความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 8% (w.b) จาก 93.67% (w.b) ในระยะเวลา 20 23 และ 30 ชั่วโมง สำหรับน้ำหนัก 2 kg/m² 4 kg/m² และ 6 kg/m² ตามลำดับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชั้นบางต่างๆ ถูกเลือกเพื่อให้เหมาะสมกับข้อมูลการทดลอง จากผลทางสถิติ การประมาณค่า Two-term แสดงให้เห็นว่าเหมาะสมกับการทดลองอบแห้งสำหรับน้ำหนัก 2 kg/m² และ 4 kg/m² ในขณะที่แบบจำลองลอการิทึมแสดงให้เห็นว่าเหมาะสมสำหรับ 6 kg/m²

Chang Chen [9] ได้วิจัยเกี่ยวกับวอลนัทที่เก็บเกี่ยวสดจะถูกปอกเปลือก ล้าง แล้วอบแห้งแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต่อเนื่องในอุตสาหกรรม วัตถุประสงค์ของเพื่อศึกษาโครงสร้างวอลนัท และตรวจสอบผลกระทบตอลักษณะการถ่ายเทความร้อนระหว่างวอลนัทกระบวนการแช่และทำให้แห้ง เส้นทางกลายความชื้นไปยังวอลนัทถูกกำหนดโดยใช้วิธีติดตามเรื่องแสง และศึกษาจลนพลศาสตร์ของวอลนัทภายใต้อุณหภูมิการแช่ที่แตกต่างกัน (15 25 และ 35 °C) การศึกษาโดยใช้แบบจำลอง Peleg HA การอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบถาดชั้นเดียวในเครื่องทำแห้งที่อุณหภูมิ 43°C และความเร็วมวล 1.41 m/s อิทธิพลของรูขุมขน (แบบปิดผนึกและแบบไม่ปิดผนึก) และกระบวนการแช่ (เวลาแช่ 0 2 และ 5 นาที) ต่อคุณลักษณะการอบแห้งวอลนัทอย่างเป็นระบบ ผลการวิจัยพบว่ามีทั้งรูพรุนของผลและการแช่ตัวเวลามีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อลักษณะความชุ่มชื้นและการอบแห้งของวอลนัท การดูดซับความชื้นผ่านรูพรุนของก้านและเปลือกมีความสำคัญเท่าเทียมกันในระหว่างกระบวนการแช่ กระบวนการแช่ 2-5 นาทีและทำให้แห้งเพิ่มเติมใช้เวลาอีก 2-4 ชั่วโมง การศึกษานี้ให้ความรู้สำหรับการจำลองและการทำนายลักษณะการถ่ายเทความร้อนในระหว่างกระบวนการแช่และทำให้แห้งวอลนัท การศึกษานี้อาจนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมการอบแห้งวอลนัทเพื่อการประมวลผลที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

A. Midilli [20] ได้ทดลองการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ของถั่วพิสตาชิโอทั้งเปลือกและไร้เปลือกสำเร็จในการศึกษาครั้งนี้ เพื่อจุดประสงค์เหล่านี้ ผลลัพธ์ที่จัดหาจาก Gaziantep, Tur-key ถูกนำมาใช้ เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์เหล่านี้แล้วสรุปได้ดังนี้ ถั่วพิสตาชิโอทั้งเปลือกและไร้เปลือกถูกอบแห้งอย่างเพียงพอในช่วงระหว่าง 40 และ 60 °C 200 และ 808 W/m² ของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ที่ 1.23 m/s ของความเร็วลมแห้งใน 6 ชม. ตัวอย่างพิสตาชิโอที่ปอกเปลือกจะใช้พลังงานมากกว่าตัวอย่างถั่วพิสตาชิโอที่มีเปลือก ปริมาณ

ความชื้นของตัวอย่างถั่วพิสตาชิโอไม่ปกเปิดออก การแปรผันของ EUR ขึ้นอยู่กับโครงสร้างและปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์แห้ง EUR อาจถือได้ว่ามีความสำคัญพารามิเตอร์เพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้ง การใช้เอ็กเซอร์จีอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเกิดขึ้นได้ในเวลาและเงื่อนไขที่เอ็กเซอร์จีสูญเสียุน้อยที่สุด การสูญเสียเอ็กเซอร์จีเท่ากับศูนย์ ณ จุดที่ประเมินประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีได้ 100% เนื่องจากกระบวนการอบแห้งในระบบหยุดลง ดังนั้นจึงแนะนำว่าควรเรียงลำดับโครงสร้าง และปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ นำมาพิจารณาเพื่อลดการใช้พลังงานและการสูญเสียพลังงาน

Neslihan Colak และคณะ [21] ศึกษาเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์พลังงานของกระบวนการอบแห้งแบบชั้นเดียวของใบสะระแหน่ในเครื่องอบแห้งแบบถาด โดยใช้ป้อนความร้อนจากแหล่งใต้ดิน ณ มหาวิทยาลัย Ege เมืองอิซมีร์ ประเทศตุรกี กระบวนการอบแห้งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิอากาศที่ 40 45 และ 50°C และอัตราการไหลของมวลตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.05 kg/s ที่ความชื้นสัมพัทธ์คงที่ 16% ผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราการไหลของมวลต่อเอ็กเซอร์จีสูญเสีย ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี และศักยภาพในการปรับปรุงกระบวนการอบแห้งพบว่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีสูงสุดของห้องอบแห้งคือได้ที่อุณหภูมิ 50°C และอัตราการไหลของมวลอากาศแห้ง 0.05 kg/s ค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีจะแปรผันจาก 76.03 ถึง 97.24% ที่อุณหภูมิ อากาศอบแห้ง 40–50°C โดยมีอัตราการไหลของมวลอากาศแห้ง 0.01– 0.05 kg/s

Mohammad Kaveh [22] วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาจลนศาสตร์ของการอบแห้ง คุณภาพพลังงาน และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีของถั่วลิ้นเต่าในเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนด้วยลมร้อน โดยใช้แบบจำลอง Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) มีการตรวจสอบผลกระทบของอุณหภูมิอากาศและความเร็วในการหมุนของโรตารี การทดสอบการอบแห้งดำเนินการที่อุณหภูมิอากาศสามระดับ 40 55 และ 70°C และความเร็วการหมุนสามระดับ 5 10 และ 15 รอบต่อนาที การสร้างแบบจำลองจลนศาสตร์ คุณภาพ (สี อายุการหดตัว และอัตราส่วนการคั้นสภาพ) พลังงาน เอ็กเซอร์จี และดัชนีการออกฤทธิ์ของการอบแห้งถั่วเขียว ผลการวิจัยพบว่าอัตราการใช้พลังงาน ค่าต่ำสุดและสูงสุดของอัตราส่วนการใช้พลังงานได้ตามลำดับในสภาวะการอบแห้งที่ 70°C และความเร็วการหมุน 15 รอบต่อนาที และที่ 40°C และความเร็วการหมุน 15 รอบต่อนาที การลดอุณหภูมิในการอบแห้งและความเร็วในการหมุนทำให้คุณสมบัติด้านคุณภาพลดลง อัตราเอ็กเซอร์จีสูญเสียและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีเฉลี่ยแปรผันตั้งแต่ 0.02 ถึง 0.11 kJ/s และ จาก 0.5434 ถึง 0.8382 ตามลำดับ อัตราเฉลี่ยของศักยภาพในการปรับปรุงเอ็กเซอร์จีเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศและความเร็วในการหมุนของโรตารีเพิ่มขึ้น ค่า R^2 สูงสุดสำหรับค่าทำนายอัตราส่วนความชื้น การใช้พลังงาน อัตราส่วนการใช้พลังงาน เอ็กเซอร์จีสูญเสีย และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีด้วยแบบจำลอง ANFIS คือ 0.9996 0.9999 0.9995 0.9989 และ 0.9996 ตามลำดับ

วรรณิ เอกศิลป์ [23] ทำการศึกษาประสิทธิภาพพลังงานและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้งวัสดุชีวภาพ โดยใช้กระบวนการสเปาเต็ดเบตร่วมกับไมโครเวฟ (Microwave spouted bed) ซึ่งทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งเร็วขึ้นและได้คุณภาพดีขึ้น และการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จี (Exergy) ของระบบการอบแห้งโดยใช้สเปาเต็ดเบตร่วมกับไมโครเวฟ โดยการเปลี่ยนอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า ให้ค่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุชีวภาพอัตราการไหลของอากาศและพลังงานจากไมโครเวฟมีค่าคงที่ ผลจากวิเคราะห์พบว่า ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีมีค่าน้อยกว่าประสิทธิภาพพลังงาน เนื่องจากการสูญเสียพลังงานจากกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ได้จากการศึกษาพลังงาน ค่าประสิทธิภาพพลังงาน และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เอ็กเซอร์จีของอากาศที่ทางออกมีค่ามากกว่าเอ็กเซอร์จีของอากาศที่ทางเข้าเนื่องจากพลังงานของไมโครเวฟ

ฐศักดิ์ พรหมมาศ และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีในกระบวนการอบแห้งวัสดุพรุณโดยใช้ลมร้อน โดยทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อนด้วยเครื่องอบลมร้อนแบบถาด ที่ทางเข้าก่อนการอบแห้งและทางออกหลังการอบแห้งที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์ โดยในการทดลองได้ทำการอบแห้งด้วยอากาศความเร็ว 2.5 m/s และอุณหภูมิลมร้อน 50 °C 60 °C และ 70 °C โดยทำการอบแห้งต่อเนื่องจำนวน 6 ชั่วโมง และทำการบันทึกข้อมูลทั้งทางเข้าและทางออกของเครื่องอบแห้งทุกๆ 15 นาที ในการวิเคราะห์อาศัยกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ วิเคราะห์พลังงานที่ใช้เป็นประโยชน์ในการอบแห้งแพคเบตวัสดุพรุณ และประยุกต์ใช้กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้า เอ็กเซอร์จีที่ไหลออก เอ็กเซอร์จีที่สูญเสีย และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้ง จากการวิเคราะห์สามารถนำผลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงกระบวนการอบแห้งให้มีประสิทธิภาพสูงสุดต่อไป

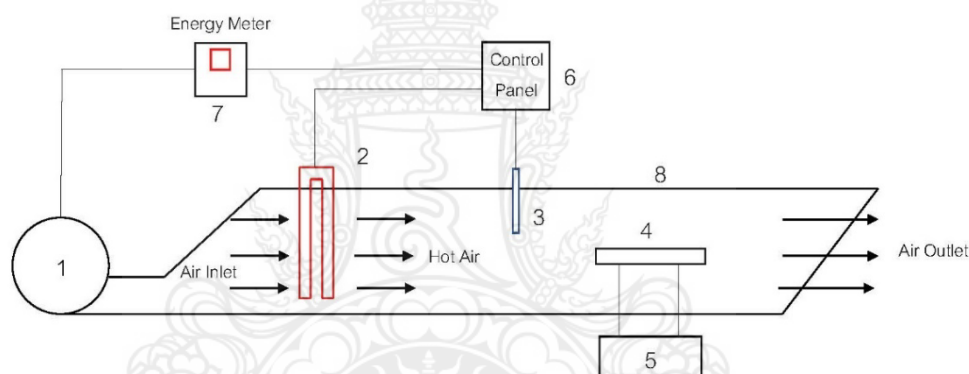
จากข้อดีของการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด หากนำมาใช้สำหรับการอบแห้งดีปลีน่าจะเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง (Drying Kinetics) ของดีปลี โดยค่าพลังงานและเอ็กเซอร์จีของการอบแห้งดีปลีจะถูกดำเนินการในงานวิจัยนี้เช่นกัน คาดว่าข้อมูลที่ได้รับการศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบกระบวนการอบแห้งดีปลีที่เหมาะสมได้ รวมถึงสามารถนำไปขยายผลเพื่อใช้ในการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรชนิดอื่นได้ในอนาคต

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการดำเนินงานวิจัย การศึกษาการลดความชื้นดีปัสด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด โดยทำการศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิและความเร็วลมร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น ค่าพลังงาน และเอ็กเซอร์จีของการอบแห้งดีปัสในเครื่องอบแห้งแบบถาด ในส่วนแรกการวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานอาศัยกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ และประยุกต์ใช้กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้า เอ็กเซอร์จีที่ไหลออก เอ็กเซอร์จีสูญเสีย และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้ง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 3.1 แผนผังเครื่องอบแห้งลมร้อนที่ใช้ในงานวิจัย

การทดลองประกอบไปด้วยอุปกรณ์

1) พัดลม DF Low noise centrifugal fan รุ่น DF-1. 3-11 อัตราการไหลสูงสุด 405 m³/h ความเร็วรอบ 2,800 rpm. ความดันสถิตยสูงสุด 450 Pascal Power 180 Watt. 220 Volt 50 Hz. ทำหน้าที่ป้อนลมร้อนเข้าสู่ระบบเพื่อเป็นตัวกลางในการพาความร้อน ซึ่งสามารถปรับความเร็วรอบเพื่อเพิ่มลดปริมาณลมให้ได้ตามการทดลองในเงื่อนไขต่างๆ โดยใช้ชุดอินเวอร์เตอร์ ข้อกำหนดทางเทคนิค

Input voltage : AC 220V

Output voltage : AC 10-220V

Rated current : 15A

Maximum current : 20A

Maximum power 4000W : (At 220V)

2) ชุดทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (Electric heater) ทรงดวงกลม กำลังไฟ 3,500 Watt 220 Volt/1Ph/50Hz ทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง ถูกควบคุมโดยโซลิตสเตท รีเลย์ รุ่น ASR-25RA โวลุ่ม ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟให้ตาม Heater ต้องการ

3) เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Type K) ชุดเซ็นเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิ มีความแม่นยำสูง ตอบสนองรวดเร็ว และมีช่วงการวัดอุณหภูมิที่กว้าง ซึ่งทำหน้าที่วัดค่าอุณหภูมิที่ได้ภายในห้องอบแห้ง ส่งค่าที่วัดได้ไปยังชุดควบคุม เพื่อสั่งให้ Heater ตัด-ต่อการทำงาน ให้ได้อุณหภูมิลมร้อนตามต้องการ

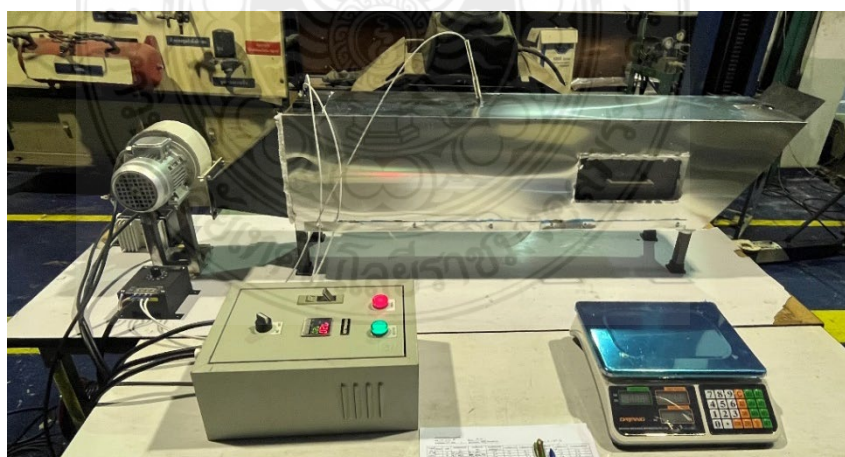
4) ภาตใส่วัสดุอบแห้ง Steel เจาะรูด้านล่างและด้านข้างเพื่อให้ลมร้อนไหลผ่าน ใช้ใส่ดิสป्लीที่ใช้ในการอบแห้งขนาด กว้างxยาวxสูง 20x20x5 cm.

5) เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล รุ่น DY-729 ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ใช้ชั่งน้ำหนักดิสป्लीที่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการอบแห้ง

6) ตัวควบคุมการทำงานโดยอาศัยอุณหภูมิอบแห้ง (Drying Temperature) ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิของลมร้อนที่ก่อนถึงภาตใส่ดิสป्ली ที่วัดได้จากตำแหน่งหมายเลข 3 เพื่อควบคุมการทำงานของชุดทำความร้อน โดยชุดควบคุมเป็นแบบ PID Controller เพื่อควบคุมการทำความร้อนแบบคงที่ การอ่านค่าอุณหภูมิบนหน้าจอแสดงผลแบบดิจิตอล

7) ชุดวัดการใช้พลังงานไฟฟ้า (Energy Meter) ใช้วัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งด้วยลมร้อน

8) ห้องอบแห้ง (Drying chamber) Steel ขนาดพื้นที่หน้าตัด 24 x21 cm ซึ่งห้องอบแห้งทำการหุ้มฉนวนเซรามิคไฟเบอร์ความหนา 19 mm. Density 128 kg/m³ เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ซึ่งเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง มีดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 เครื่องอบแห้งลมร้อนที่ใช้ในงานวิจัย



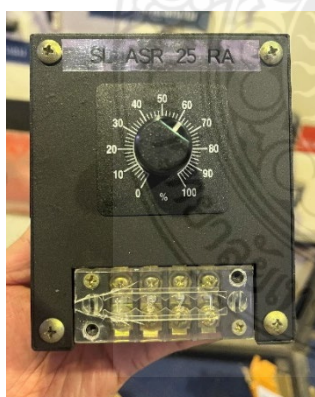
รูปที่ 3.3 ชุดพัดลมสร้างแรงดัน



รูปที่ 3.4 ชุดอินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วรอบพัดลม



รูปที่ 3.5 Heater



รูปที่ 3.6 ชุดควบคุมการจ่ายกระแสไฟ Heater



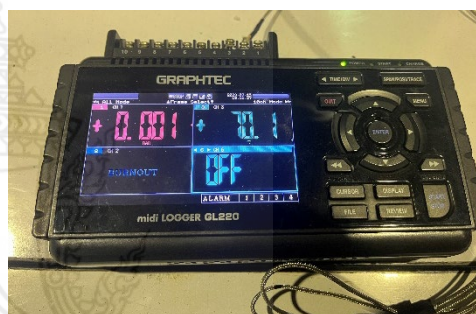
รูปที่ 3.7 ตู้ควบคุมการทำงาน Heater



รูปที่ 3.8 ด้านท้ายเครื่องอบแห้งแสดงตอนแท่ง Heater ทำงาน



รูปที่ 3.9 เครื่องมือวัดความชื้น



รูปที่ 3.10 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 3.11 เครื่องมือวัดความเร็วลม



รูปที่ 3.12 คีปลี่ที่ใช้ในการทดลอง

3.2 วิธีดำเนินการทดลอง

3.2.1 วัสดุคีปลี่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 246-253 (d.b.) ขนาดความยาวเฉลี่ย 45mm. และเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 7 mm. (แหล่งปลูก สวนเกษตร จ.เชียงใหม่) การเก็บรักษานำมาพักไว้ในตู้เย็นอุณหภูมิ 7 ถึง 10 °C

3.2.2 ก่อนทำการทดลองนำคีปลี่สะอาดมวลครั้งละ 0.5 kg. มาพักไว้ในตู้เย็นอุณหภูมิห้อง 30 นาที โดยทำทุกเงื่อนไขการทดลอง

3.2.3 เปิดสวิตช์เดินเครื่องพัดลมก่อนเพื่อป้องกันชุดทำความร้อนขาด วัดความเร็วลมโดยใช้เครื่องมือวัดความเร็วลม Tenmars air velocity meter รุ่น TM-413

3.2.4 เปิดสวิตช์ชุดทำความร้อนปรับค่าจนได้อุณหภูมิอบแห้งตามต้องการ เดินเครื่องอบแห้งประมาณ 10 นาที จนอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งคงที่ตามแต่ละเงื่อนไขของการอบแห้ง การอ่านค่าอุณหภูมิอบแห้งบนหน้าจอแสดงผลแบบดิจิตอล ของชุดควบคุมการทำงาน และทำการวัดความชื้นภายในห้องอบแห้งบริเวณก่อนถึงถาดอบแห้ง เครื่องมือวัดความชื้น Dwyer digital instrument รุ่น 485B-1

3.2.5 นำคีปลี่มวล 0.5 kg. ใส่เข้าสู่เครื่องอบแห้งและทำการอบตามเงื่อนไขที่กำหนด ระหว่างการทดลองจะทำการจดบันทึกน้ำหนักของคีปลี่ทุก 30 นาที เพื่อนำมาคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงความชื้น จนกระทั่งน้ำหนักของคีปลี่ไม่เปลี่ยนแปลง ในทุกเงื่อนไขการทดลอง

3.2.6 ทำการวัดและจดบันทึกอุณหภูมิ และความชื้นลมร้อนทางออกหลังการอบแห้งทุก 30 นาที ในทุกเงื่อนไขการทดลอง เครื่องมือวัดอุณหภูมิ Graphtec midi logger รุ่น GL220 เครื่องมือวัดความชื้น Dwyer digital instrument รุ่น 485B-1

3.2.7 ในการทดลองใช้อุณหภูมิลมร้อน 3 ค่า คือ 70 75 และ 80 °C โดยทดลองที่ความเร็วลมร้อน 3 ค่า 0.5 0.7 และ 1.0 m/s

3.2.8 หาค่าความชื้นสุดท้าย ทำโดยการนำคีปลี่ไปอบที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

3.3 เงื่อนไขขอบเขตการทดลอง

ในการทดลองใช้อุณหภูมิอบแห้ง 70 75 และ 80 °C และความเร็วอากาศอบแห้ง 0.5 0.7 และ 1.0 m/s โดยใช้เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบ 1 ถาด ทำการทดลองและเก็บผลตามเงื่อนไขที่กำหนด ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขขอบเขตการทดลอง

วิธีการอบ	เงื่อนไขในการอบแห้ง	
	อุณหภูมิลมร้อน (°C)	ความเร็วลมร้อน (m/s)
อบแห้งด้วยลมร้อนแบบถาด จำนวน 1 ถาด	70	0.5
	75	0.5
	80	0.5
	70	0.7
	75	0.7
	80	0.7
	70	1.0
	75	1.0
	80	1.0

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการศึกษาการลดความชื้นดิบลิด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด หลังจากทำการทดลองได้ผลเรียบร้อยแล้ว ในส่วนที่สองเป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการลดความชื้นของดิบลิกับผลการทดลอง Avicara et al.[29] ได้วิจัยการสร้างแบบจำลองการอบแห้งแป้งมันสำปะหลังพื้นเมืองแบบแผ่นบางในเครื่องอบแบบถาด Akpinar et al. [30] ศึกษาการสร้างแบบจำลองและการศึกษาทดลองการอบแห้งแอปเปิลแผ่นบางด้วยการพาความร้อนเครื่องอบไซโคลน Mortaza et al. [31] ได้ศึกษาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการศึกษาทดลองการอบแห้งสตอเบอร์รี่แบบชั้นบางในเครื่องอบแห้งแบบไซโคลนแบบพาความร้อน ในงานวิจัยนี้เลือกสมการเอมพิริคัลที่นิยมใช้งานทางด้านอบแห้ง 6 สมการดังแสดงตารางที่ 3.1 เพื่อหาแบบจำลองของสูตรเอมพิริคัลที่มีค่าเหมาะสมที่สุด ในการทดสอบใช้โปรแกรม Matlab และนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดลองการอบแห้ง โดยใช้ข้อมูลจากผลการทดสอบจริงจากการดิบลิด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด

ตารางที่ 3.2 แบบจำลองเอมพิริคัลใช้ในการจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

ลำดับ	แบบจำลอง	สมการความสัมพันธ์
1	Newton / Lewis	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$
4	Handerson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
6	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$

MR คือ อัตราส่วนความชื้น t คือเวลาในการอบแห้ง (นาที) a, b, c, k, k_0 , k_1 และ n คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการปรับเส้นโค้งให้ผลการจำลองสอดคล้องกับผลการทดลอง

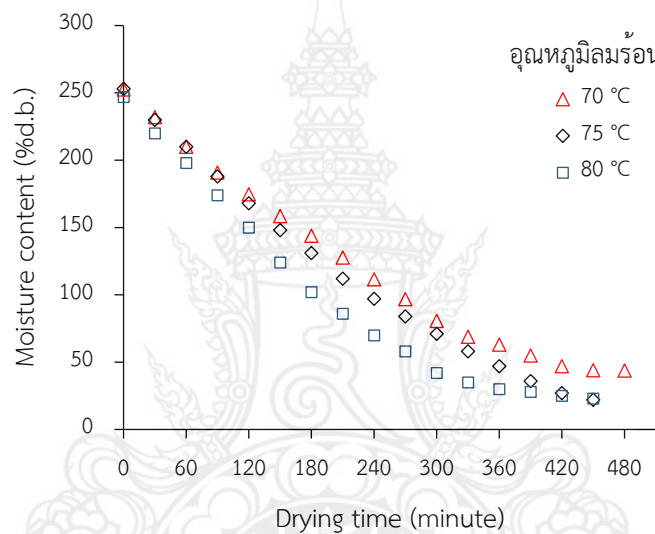
จากแบบจำลองเอมพิริคัลใช้ในการจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ในงานวิจัยการศึกษา การลดความชื้นดิบด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) [29] และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) [32] ได้จากผลการจำลองในโปรแกรม Matlab และโดยตัวแปรทั้งสองตัวสามารถนำไปสู่การเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุดเพื่อใช้ในการอบแห้ง การพิจารณาว่าแบบจำลองที่ได้นั้นจะมีค่าความแม่นยำและใกล้เคียงกับผลการทดลองหรือไม่ จะพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determine, R^2) ซึ่งจะต้องมีค่ามากที่สุด ในขณะที่ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) จะต้องมีย่านค่าต่ำที่สุด

บทที่ 4

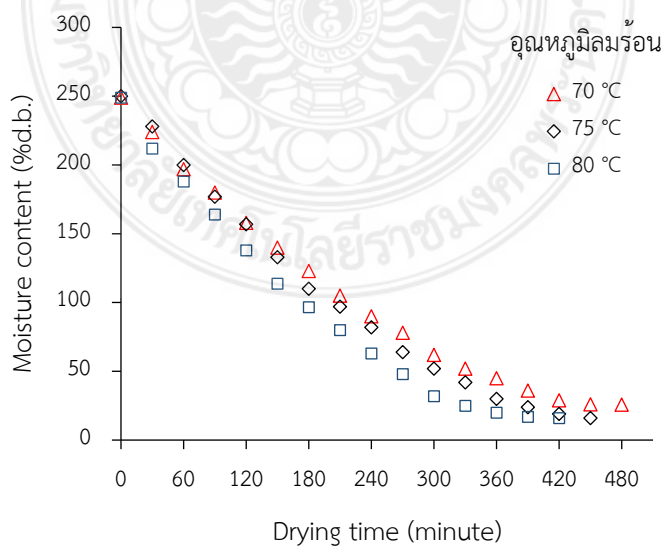
ผลการทดลอง

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงผลการทดลอง อิทธิพลของปัจจัยต่างๆ อุณหภูมิลมร้อนและความเร็วลมร้อนที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์ ค่าพลังงานและเอนทาลปีของการอบแห้งดีปลีด้วยลมร้อน พร้อมทั้งเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการลดความชื้นของดีปลีกับผลการทดลอง

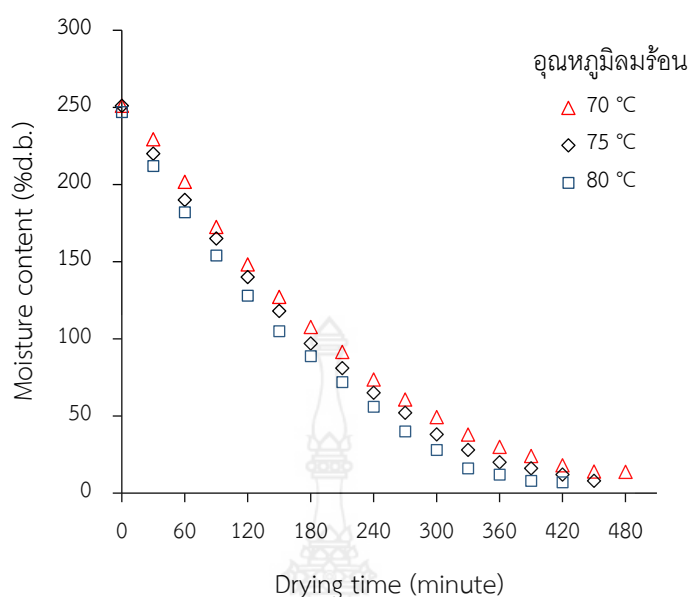
4.1 จลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง แสดงดังรูปที่ 4.1-4.6



รูปที่ 4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อการลดความชื้นดีปลีที่ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s

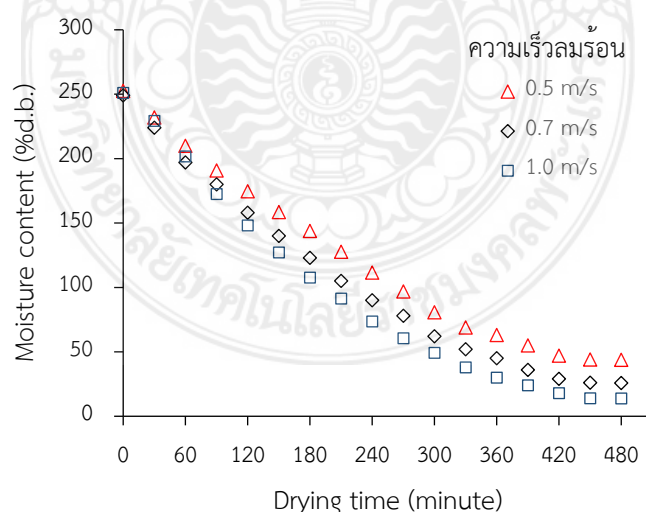


รูปที่ 4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อการลดความชื้นดีปลีที่ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s

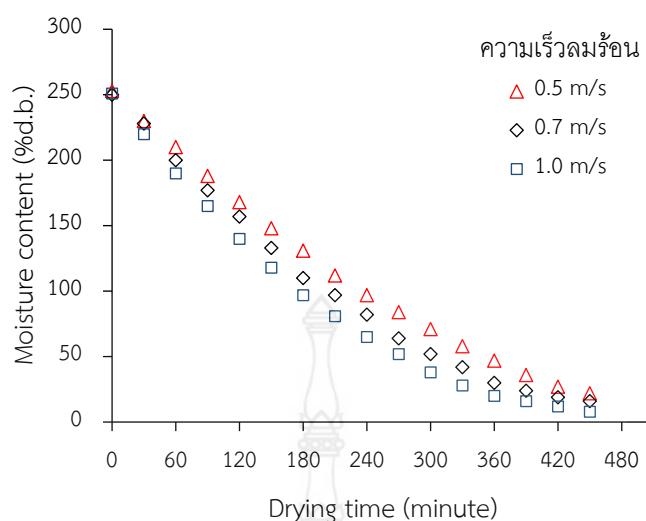


รูปที่ 4.3 ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อการลดความชื้นดิบที่ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s

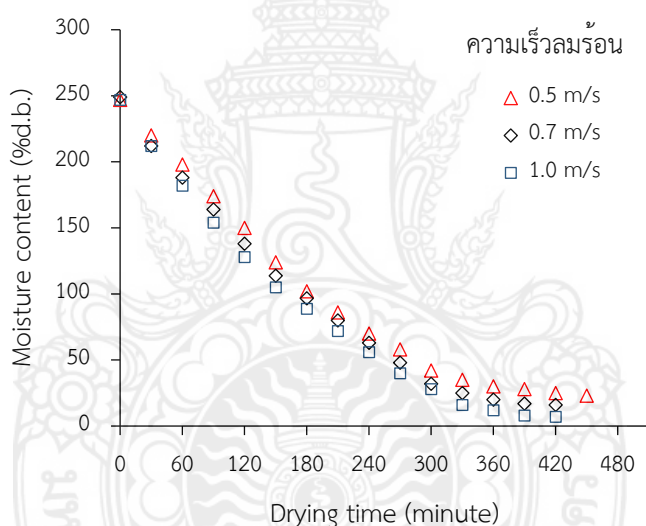
ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อการลดความชื้นดิบแสดงในรูปที่ 4.1-4.3 ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นเมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้นความชื้นจึงเริ่มลดลงอย่างช้าๆจนเกือบคงที่ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนความชื้นดิบลดลงได้มากขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิลมร้อนที่สูงขึ้นความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิลมร้อนกับอุณหภูมิที่ผิวตีสจึงเพิ่มขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการระเหยน้ำจึงมากขึ้นตามไปด้วย [26]



รูปที่ 4.4 ผลกระทบของความเร็วลมร้อนต่อการลดความชื้นดิบที่อุณหภูมิลมร้อน 70 °C



รูปที่ 4.5 ผลกระทบของความเร็วมรณะต่อการลดความชื้นดีปัสที่อุณหภูมิ 75 °C



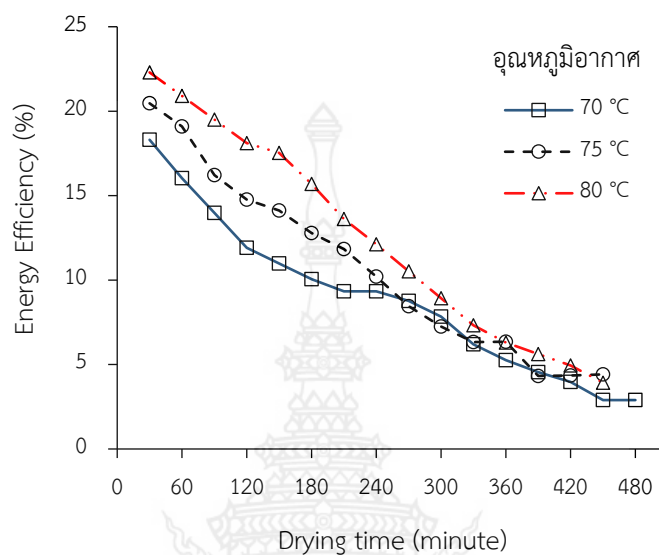
รูปที่ 4.6 ผลกระทบของความเร็วมรณะต่อการลดความชื้นดีปัสที่อุณหภูมิ 80 °C

ผลกระทบของความเร็วมรณะต่อการลดความชื้นดีปัสแสดงในรูปที่ 4.4-4.6 ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นเมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้นความชื้นจึงเริ่มลดลงอย่างช้าๆจนเกือบคงที่ การเพิ่มความเร็วมรณะทำให้มวลมรณะที่ไหลผ่านห้องอบแห้งเพิ่มขึ้น การระเหยของน้ำจึงเพิ่มมากขึ้น ที่อุณหภูมิ 80 °C เทียบกับ 75 °C ความเร็วมรณะสูงเป็นการเพิ่มการพาความร้อน จึงมีผลให้ความชื้นดีปัสลดลงได้มากกว่าที่ความเร็วมรณะต่ำ [27]

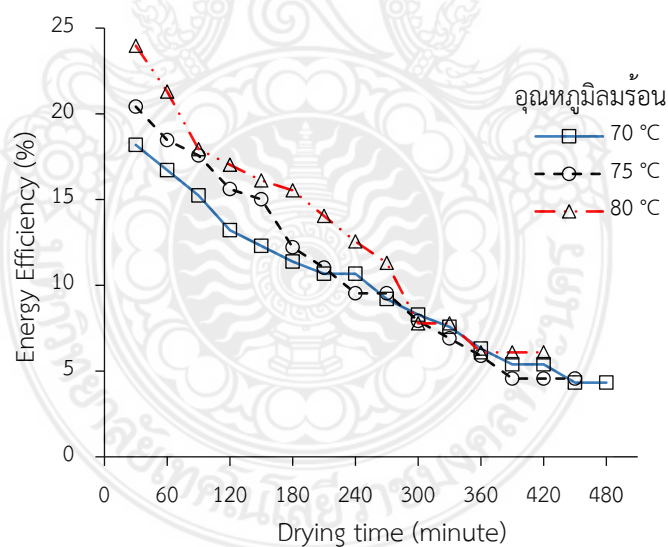
เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.1-4.6 พบว่า ความชื้นดีปัสลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก หลังจากนั้นความชื้นจึงลดลงอย่างช้าๆ เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากปริมาณน้ำที่อยู่ภายในดีปัสเริ่มน้อยลงและส่วนใหญ่จะอยู่ภายในเนื้อดีปัส ระยะเวลาที่ใช้สำหรับการแพร่ของน้ำจากภายในออกสู่ผิวด้านนอกจึงเพิ่มขึ้น [28]

4.2 ผลการวิเคราะห์พลังงานของการอบแห้ง

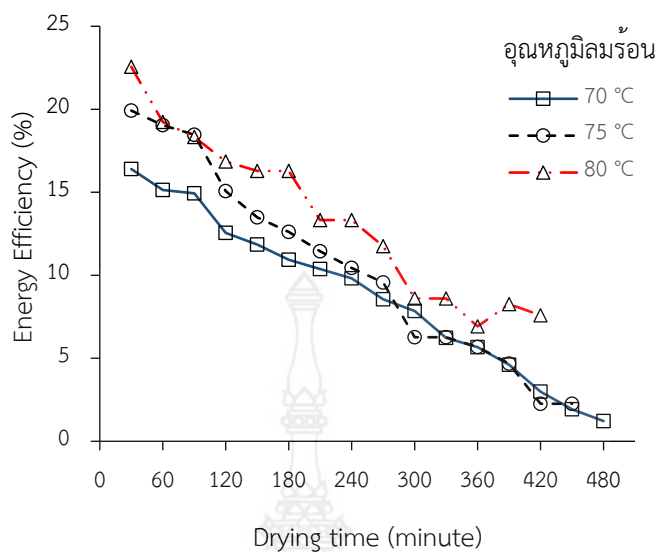
จากการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความเร็วลมร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงานสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้



รูปที่ 4.7 ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อประสิทธิภาพพลังงานที่ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s

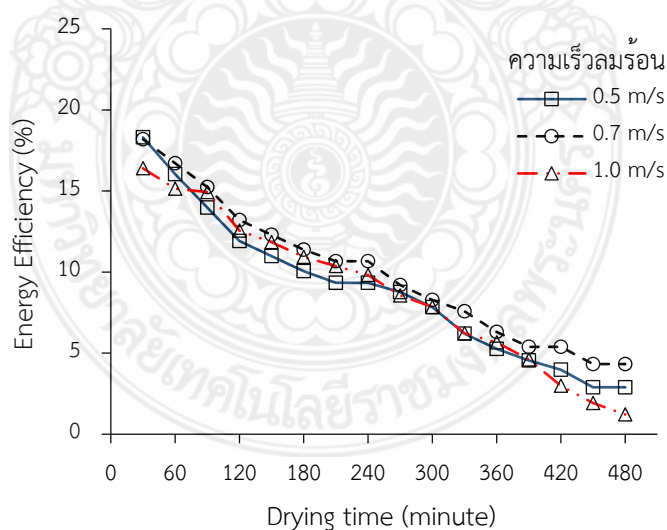


รูปที่ 4.8 ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อประสิทธิภาพพลังงานที่ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s

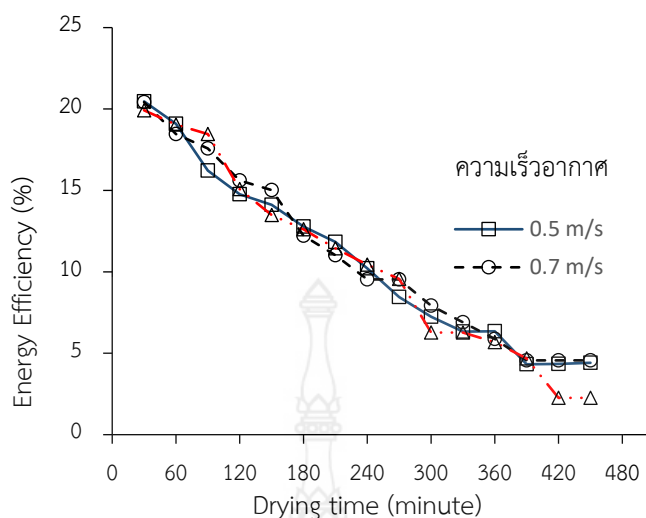


รูปที่ 4.9 ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อประสิทธิภาพพลังงานที่ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s

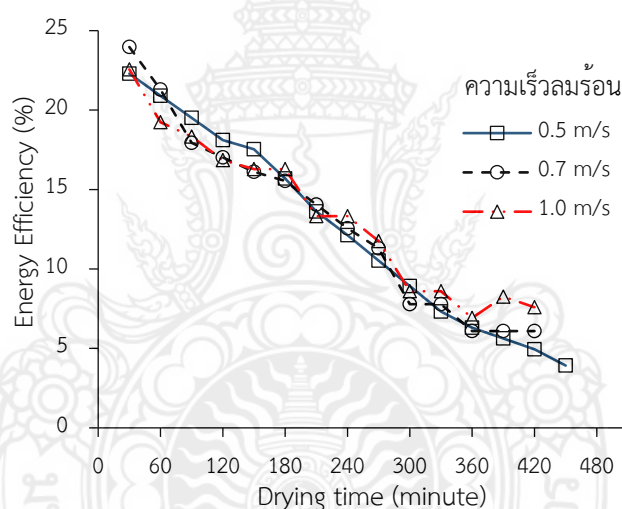
อุณหภูมิลมร้อนมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพพลังงาน แสดงดังรูปที่ 4.7-4.9 เมื่ออุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพพลังงานจะสูงขึ้น เนื่องจากผลของการระเหยของน้ำเพิ่มขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อค่าประสิทธิภาพพลังงานและเมื่อเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้นค่าประสิทธิภาพพลังงานมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากผลของการระเหยของน้ำลดลงอย่างรวดเร็วช่วงแรกของการอบแห้ง ดังกล่าวไปแล้ว



รูปที่ 4.10 ผลกระทบของความเร็วลมร้อนต่อประสิทธิภาพพลังงานที่อุณหภูมิลมร้อน 70 °C



รูปที่ 4.11 ผลกระทบของความเร็วมรอนต่อประสิทธิภาพพลังงานที่อุณหภูมิรอน 75 °C



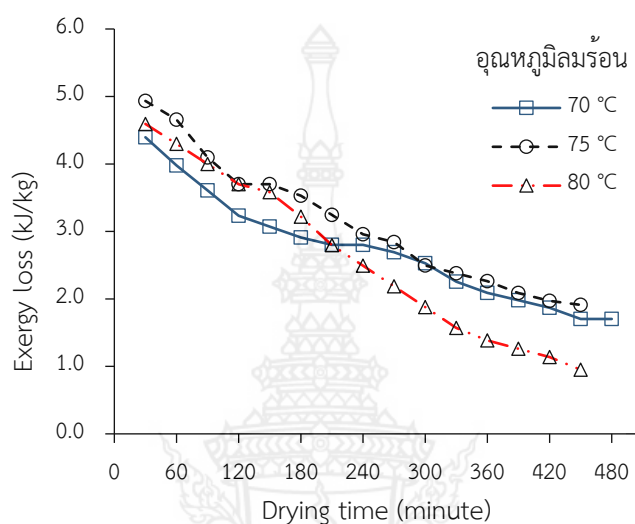
รูปที่ 4.12 ผลกระทบของความเร็วมรอนต่อประสิทธิภาพพลังงานที่อุณหภูมิรอน 80 °C

รูปที่ 4.10-4.12 แสดงผลกระทบของความเร็วมรอนต่อประสิทธิภาพพลังงาน จะเห็นได้ว่า ความเร็วมรอนที่อุณหภูมิเดียวกันไม่มีผลต่อประสิทธิภาพพลังงาน แม้การเพิ่มความเร็วมรอนจะทำให้มวลอากาศไหลผ่านห้องอบแห้งเพิ่มขึ้น แต่อัตราการระเหยน้ำที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยทำให้การเพิ่มความเร็วมรอนไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพพลังงาน และเมื่อเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้นค่าประสิทธิภาพพลังงานมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากผลของการระเหยของน้ำลดลงอย่างรวดเร็วช่วงแรกของการอบแห้ง

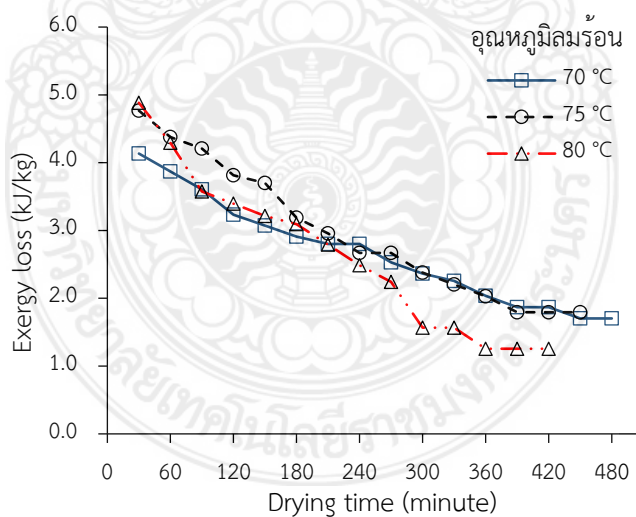
เมื่อพิจารณารูปที่ 4.7-4.12 ดังได้กล่าวมาแล้วในช่วงแรกของการอบแห้ง ประสิทธิภาพพลังงานจะสูงเพราะวัสดุมีการระเหยความชื้นได้ดี

4.3 ผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีของระบบอบแห้ง

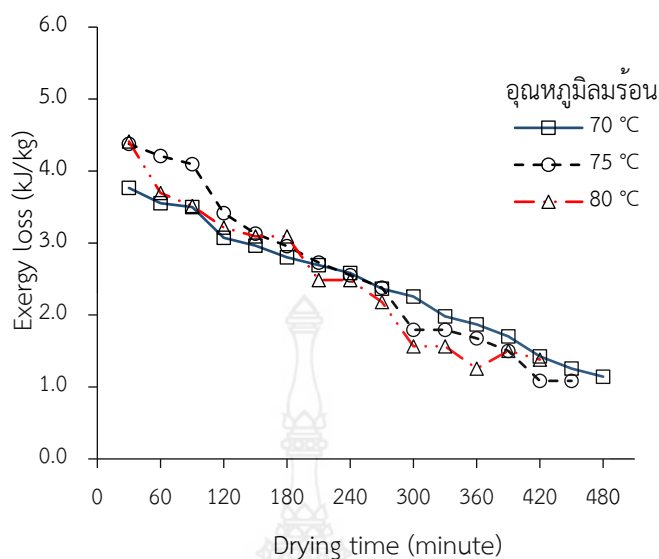
ในรูปที่ 4.13-4.15 แสดงผลการทดลองผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อเอ็กเซอร์จีสูญเสียที่ความเร็วลมร้อน 0.5 0.7 และ 1.0 m/s และในรูปที่ 4.16-4.18 แสดงผลการทดลองผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อน ต่อประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีสูญเสียที่ความเร็วลมร้อน 0.5 0.7 และ 1.0 m/s



รูปที่ 4.13 ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อเอ็กเซอร์จีสูญเสียที่ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s

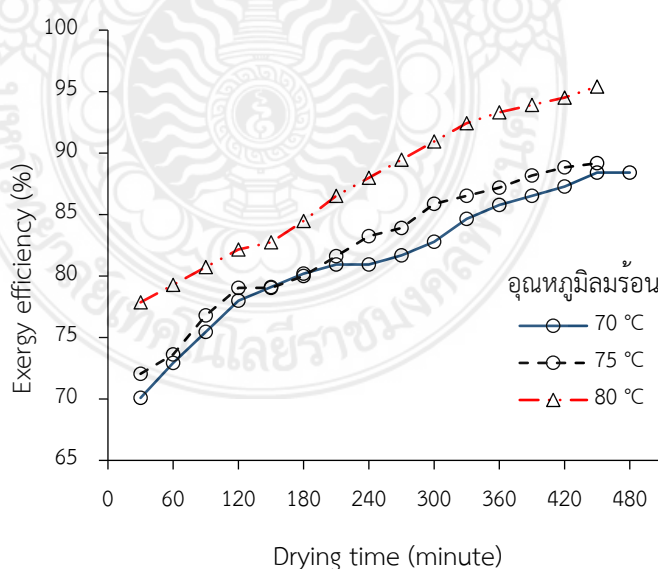


รูปที่ 4.14 ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อเอ็กเซอร์จีสูญเสียที่ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s

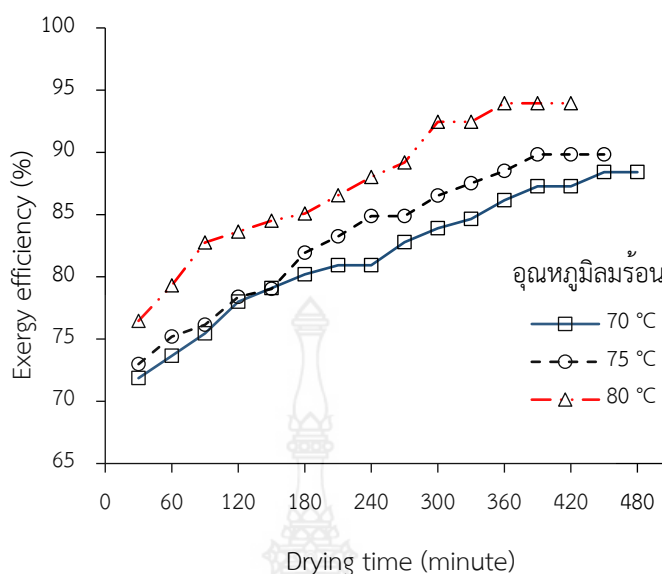


รูปที่ 4.15 ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อเอ็กเซอร์จิสสูญเสียที่ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s

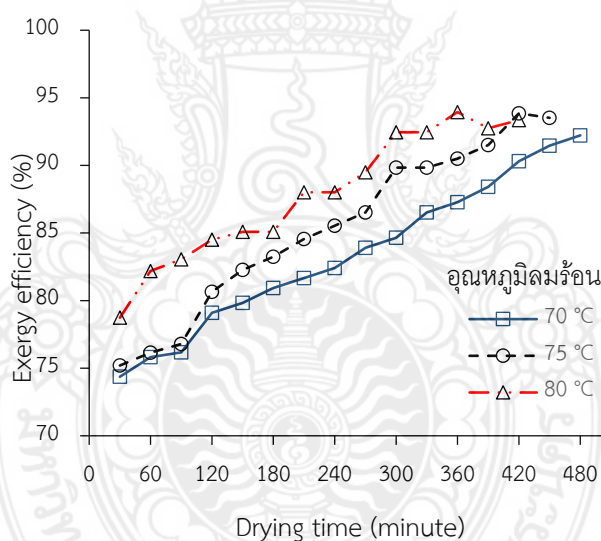
จากรูปที่ 4.13-4.15 ผลการทดลองผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อเอ็กเซอร์จิสสูญเสียที่ความเร็วลมร้อน 0.5 0.7 และ 1.0 m/s แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้นค่าเอ็กเซอร์จิสสูญเสียมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนไม่ได้ทำให้ทำให้ค่าเอ็กเซอร์จิสสูญเสียแตกต่างกันมาก เนื่องจากว่าอุณหภูมิทางออกที่แตกต่างกัน เอ็กเซอร์จิสที่ไหลเข้า เอ็กเซอร์จิสที่ไหลออก มีผลต่อค่าเอ็กเซอร์จิสสูญเสีย



รูปที่ 4.16 ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จิสที่ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s



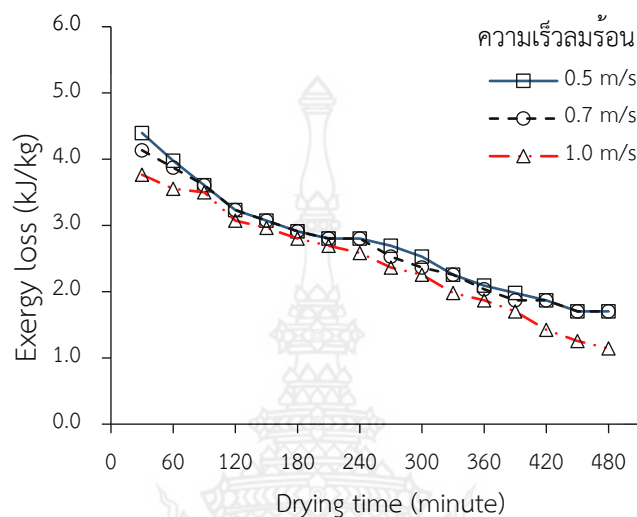
รูปที่ 4.17 ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อประสิทธิภาพเอกเซอร์จีที่ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s



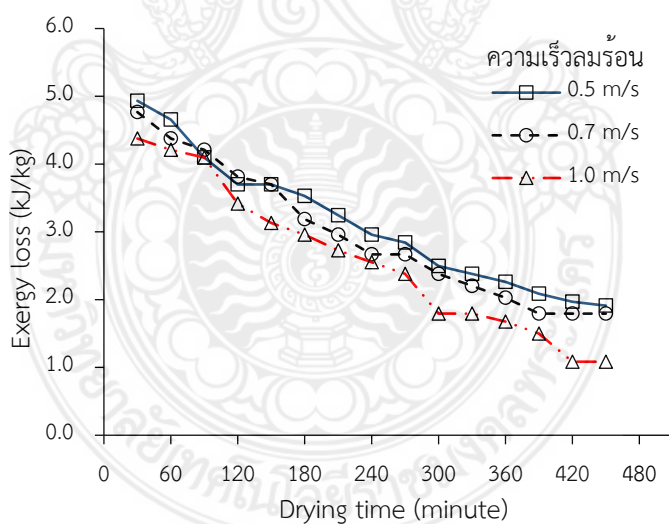
รูปที่ 4.18 ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อประสิทธิภาพเอกเซอร์จีที่ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s

จากรูปที่ 4.16-4.18 แสดงผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนต่อประสิทธิภาพเอกเซอร์จี ที่ความเร็วลมร้อน 0.5 0.7 และ 1.0 m/s จะเห็นได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนมีผลให้ประสิทธิภาพเอกเซอร์จีเพิ่มขึ้น แสดงว่าอุณหภูมิลมร้อนเข้าห้องอบแห้งที่สูงขึ้น ทำให้วัสดุมีการระเหยความชื้นได้ดี และเมื่อเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้น ค่าประสิทธิภาพเอกเซอร์จีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากค่าเอ็กเซอร์จีสูญเสียลดลงตามเวลาตามอบแห้งที่สูงขึ้น ดังได้กล่าวไปแล้ว

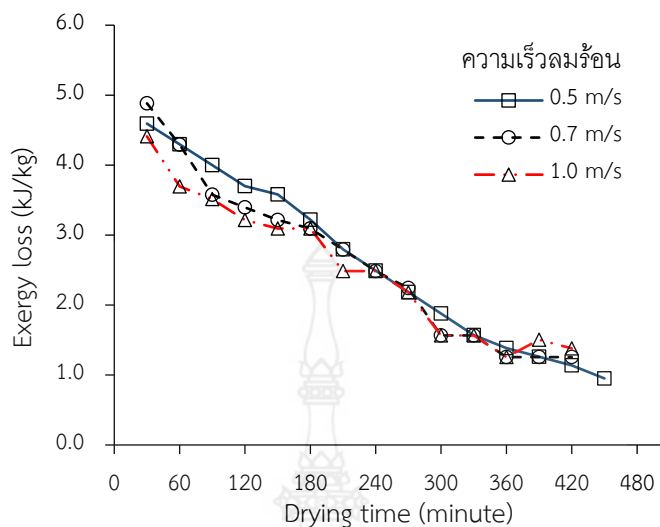
ในรูปที่ 4.19-4.21 แสดงผลการทดลองผลกระทบของความเร็วม้วนต่อเอ็กเซอร์จีสูญเสียที่อุณหภูมิร้อน 70 75 และ 80°C และในรูปที่ 4.22 ถึง 4.24 ผลการทดลองผลกระทบของความเร็วม้วนต่อเอ็กเซอร์จีสูญเสีย ที่อุณหภูมิร้อน 70 75 และ 80 °C



รูปที่ 4.19 ผลกระทบของความเร็วม้วนต่อเอ็กเซอร์จีสูญเสียที่อุณหภูมิร้อน 70 °C

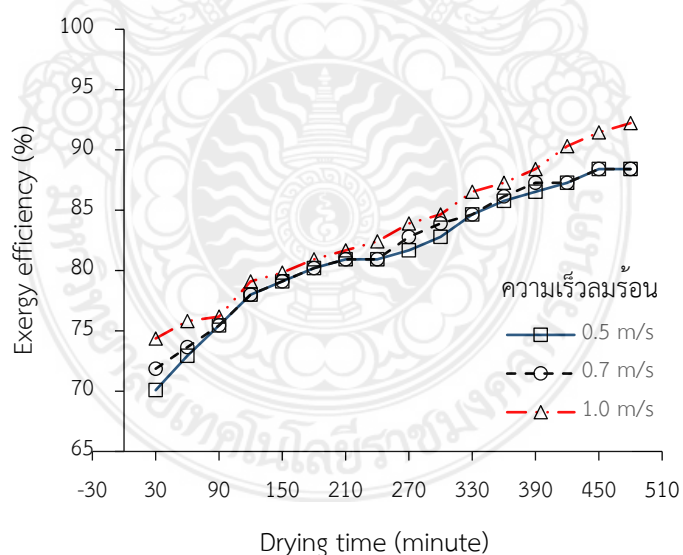


รูปที่ 4.20 ผลกระทบของความเร็วม้วนต่อเอ็กเซอร์จีสูญเสียที่อุณหภูมิร้อน 75 °C

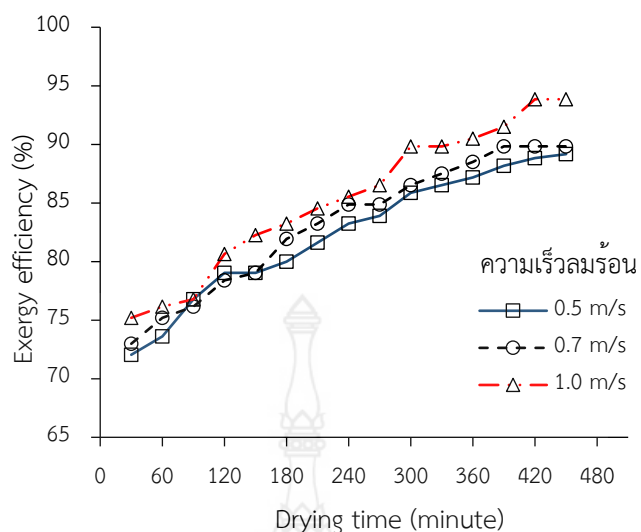


รูปที่ 4.21 ผลกระทบของความเร็วมรอนต่อเอกเซอร์จิสูญเสียที่อุณหภูมิรอน 80 °C

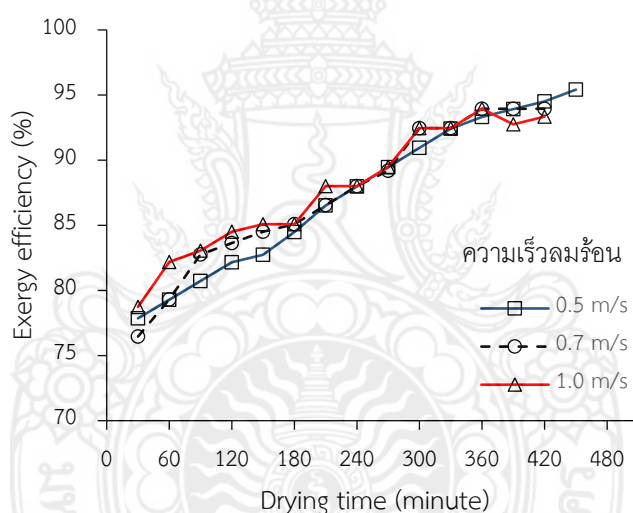
ผลการทดลองในรูปที่ 4.19-4.21 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเร็วมรอนที่อุณหภูมิเดียวกัน ไม่มีผลกระทบต่อเอกเซอร์จิสูญเสีย เนื่องจากอุณหภูมิที่ออกปลายทางออกของอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้นค่าเอกเซอร์จิสูญเสียมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 4.22 ผลกระทบของความเร็วมรอนต่อประสิทธิภาพเอกเซอร์จิสูญที่อุณหภูมิรอน 70 °C



รูปที่ 4.23 ผลกระทบของความเร็วมร้อนต่อประสิทธิภาพเอกเซอร์จีที่อุณหภูมิร้อน 75 °C



รูปที่ 4.24 ผลกระทบของความเร็วมร้อนต่อประสิทธิภาพเอกเซอร์จีที่อุณหภูมิร้อน 80 °C

ผลกระทบของความเร็วมร้อนต่อประสิทธิภาพเอกเซอร์จีแสดง ดังรูปที่ 4.21-4.24 การเปลี่ยนแปลงความเร็วมร้อน ไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพเอกเซอร์จี เนื่องจากความเร็วมร้อน 0.5–1 m/s ถือได้ว่าเป็นเป็นค่าความเร็วที่ไม่สูงมาก เมื่ออัตราการไหลของมวลอากาศผ่านห้องอบแห้งน้อย การเปลี่ยนแปลงความเร็วมร้อนจึงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพเอกเซอร์จี และเมื่อเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้นค่าประสิทธิภาพเอกเซอร์จีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากค่าเอ็กเซอร์จีสูญ เสียลดลงตามเวลาตามอบแห้งที่สูงขึ้น ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว

4.4 การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดลอง

อัตราส่วนความชื้นที่ผ่านการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลของการลดความชื้นดีปลีด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิลมร้อน 70 °C และ 80 °C และความเร็วลมร้อน 0.5 0.7 และ 1 m/s โดยผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะถูกเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความชื้นกับข้อมูลการทดลอง เพื่อหาแบบจำลองที่ผลอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้น ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด การพิจารณาว่าแบบจำลองที่ได้นั้นจะมีค่าความแม่นยำและใกล้เคียงกับผลการทดลองหรือไม่ จะพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determine, R^2) ซึ่งจะต้องมีค่ามากที่สุด ในขณะที่ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) จะต้องมีค่าต่ำที่สุด ผลการจำลองแสดงดังตารางที่ 4.1-4.9

ตารางที่ 4.1 ผลการจำลองการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิลมร้อน 70 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s

ลำดับ	ชื่อแบบจำลอง	สมการความสัมพันธ์	Constant	R^2	RMSE
1	Newton / Lewis	$MR = \exp(-kt)$	$k = 0.0036$	0.9882	0.0299
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	$k = 0.0013,$ $n = 1.1801$	0.9974	0.0144
3	Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	$k = 0.0052,$ $n = 0.6876$	0.9882	0.0309
4	Handerson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	$a = 1.0397,$ $k = 0.0037$	0.9915	0.0263
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	$a = 1.2139,$ $c = -0.2007,$ $k = 0.0027$	0.9963	0.0180
6	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	$a = 0.9864,$ $b = 0.0000,$ $k = 0.0010,$ $n = 1.2286$	0.9976	0.0149

จากตารางที่ 4.1 ผลการจำลองการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิลมร้อน 70 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัล จากการพิจารณาค่า R^2 และค่า RMSE พบว่า แบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al. ได้ค่าเหมาะสมและแม่นยำที่สุด โดยค่า R^2 สูงสุดอยู่ที่ 0.9976 และค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.0149

ตารางที่ 4.2 ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิร้อน 70 °C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s

ลำดับ	ชื่อแบบจำลอง	สมการความสัมพันธ์	Constant	R ²	RMSE
1	Newton / Lewis	$MR = \exp(-kt)$	$k = 0.0043$	0.9885	0.0315
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	$k = 0.0015,$ $n = 1.1903$	0.9982	0.0127
3	Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	$k = -0.0225,$ $n = -0.1930$	0.9885	0.0325
4	Handerson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	$a = 1.0421,$ $k = 0.0045$	0.9915	0.0280
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	$a = 1.1821,$ $c = -0.1708,$ $k = 0.0033$	0.9979	0.0144
6	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	$a = 0.9896,$ $b = -0.0001,$ $k = 0.0016,$ $n = 1.1681$	0.9987	0.0119

จากตารางที่ 4.2 ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิร้อน 70 °C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัล จากการพิจารณาค่า R² และค่า RMSE พบว่า แบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al. ได้ค่าเหมาะสมและแม่นยำที่สุด โดยค่า R² สูงสุดอยู่ที่ 0.9987 และค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.0119

ตารางที่ 4.3 ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิร้อน 70 °C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s

ลำดับ	ชื่อแบบจำลอง	สมการความสัมพันธ์	Constant	R ²	RMSE
1	Newton / Lewis	$MR = \exp(-kt)$	$k = 0.0051$	0.9835	0.0402
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	$k = 0.0012,$ $n = 1.2363$	0.9996	0.0068
3	Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	$k = -0.6731,$ $n = 0.0053$	0.9882	0.0309
4	Handerson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	$a = 1.0666,$ $k = 0.0054$	0.9895	0.0331
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	$a = 1.1800,$ $c = -0.1469,$ $k = 0.0040$	0.9976	0.0166
6	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	$a = 1.0003,$ $b = -0.0005,$ $k = 0.0014,$ $n = 1.2321$	0.9997	0.0062

จากตารางที่ 4.3 ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิร้อน 70 °C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัล จากการพิจารณาค่า R² และค่า RMSE พบว่า แบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al. ได้ค่าเหมาะสมและแม่นยำที่สุด โดยค่า R² สูงสุดอยู่ที่ 0.9997 และค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.0062

ตารางที่ 4.4 ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิร้อน 75 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s

ลำดับ	ชื่อแบบจำลอง	สมการความสัมพันธ์	Constant	R ²	RMSE
1	Newton / Lewis	$MR = \exp(-kt)$	$k = 0.0042$	0.9783	0.0444
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	$k = 0.0009,$ $n = 1.2869$	0.9978	0.0146
3	Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	$k = -0.4684,$ $n = -0.0089$	0.9783	0.0459
4	Handerson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	$a = 1.0608,$ $k = 0.0044$	0.9843	0.0389
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	$a = 1.3437,$ $c = -0.3289,$ $k = 0.0026$	0.9985	0.0127
6	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	$a = 0.9924,$ $b = -0.0002,$ $k = 0.0013,$ $n = 1.1925$	0.9993	0.0091

จากตารางที่ 4.4 ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิร้อน 75 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัล จากการพิจารณาค่า R² และค่า RMSE พบว่า แบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al. ได้ค่าเหมาะสมและแม่นยำที่สุด โดยค่า R² สูงสุดอยู่ที่ 0.9993 และค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.0091

ตารางที่ 4.5 ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิร้อน 75 °C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s

ลำดับ	ชื่อแบบจำลอง	สมการความสัมพันธ์	Constant	R ²	RMSE
1	Newton / Lewis	$MR = \exp(-kt)$	$k = 0.0048$	0.9796	0.0447
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	$k = 0.0010,$ $n = 1.2903$	0.9986	0.0122
3	Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	$k = 0.7458,$ $n = 0.0065$	0.9796	0.0461
4	Handerson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	$a = 1.0671,$ $k = 0.0052$	0.9859	0.0383
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	$a = 1.2235,$ $c = -0.1954,$ $k = 0.0036$	0.9968	0.0190
6	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	$a = 0.9927,$ $b = -0.0001,$ $k = 0.0011,$ $n = 1.2604$	0.9989	0.0113

จากตารางที่ 4.5 ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิร้อน 75 °C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัล จากการพิจารณาค่า R² และค่า RMSE พบว่า แบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al. ได้ค่าเหมาะสมและแม่นยำที่สุด โดยค่า R² สูงสุดอยู่ที่ 0.9989 และค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.0113

ตารางที่ 4.6 ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิ 75 °C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s

ลำดับ	ชื่อแบบจำลอง	สมการความสัมพันธ์	Constant	R ²	RMSE
1	Newton / Lewis	$MR = \exp(-kt)$	$k = 0.0056$	0.9846	0.0391
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	$k = 0.0015,$ $n = 1.2450$	0.9981	0.0142
3	Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	$k = 0.6258,$ $n = 0.0090$	0.9846	0.0404
4	Handerson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	$a = 1.0535,$ $k = 0.0059$	0.9883	0.0353
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	$a = 1.1576,$ $c = -0.1394,$ $k = 0.0044$	0.9980	0.0152
6	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	$a = 0.9903,$ $b = -0.0001,$ $k = 0.0019,$ $n = 1.1897$	0.9992	0.0101

จากตารางที่ 4.6 ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิ 75 °C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัล จากการพิจารณาค่า R² และค่า RMSE พบว่า แบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al. ได้ค่าเหมาะสมและแม่นยำที่สุด โดยค่า R² สูงสุดอยู่ที่ 0.9992 และค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.0101

ตารางที่ 4.7 ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิร้อน 80 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s

ลำดับ	ชื่อแบบจำลอง	สมการความสัมพันธ์	Constant	R ²	RMSE
1	Newton / Lewis	$MR = \exp(-kt)$	$k = 0.0050$	0.9848	0.0379
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	$k = 0.0015,$ $n = 1.2278$	0.9971	0.0169
3	Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	$k = -0.5928,$ $n = -0.0085$	0.9848	0.0391
4	Handerson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	$a = 1.0578,$ $k = 0.0053$	0.9895	0.0325
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	$a = 1.1166,$ $c = -0.0785,$ $k = 0.0045$	0.9924	0.0285
6	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	$a = 0.9823,$ $b = 0.0001,$ $k = 0.0007,$ $n = 1.3836$	0.9988	0.0119

จากตารางที่ 4.7 ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิร้อน 80 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัล จากการพิจารณาค่า R² และค่า RMSE พบว่า แบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al. ได้ค่าเหมาะสมและแม่นยำที่สุด โดยค่า R² สูงสุดอยู่ที่ 0.9988 และค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.0119

ตารางที่ 4.8 ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิ 80 °C ความเร็วอากาศ 0.7 m/s

ลำดับ	ชื่อแบบจำลอง	สมการความสัมพันธ์	Constant	R ²	RMSE
1	Newton / Lewis	$MR = \exp(-kt)$	$k = 0.0057$	0.9861	0.0365
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	$k = 0.0018,$ $n = 1.2117$	0.9964	0.0192
3	Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	$k = -0.6195,$ $n = -0.0092$	0.9861	0.0377
4	Handerson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	$a = 1.0431,$ $k = 0.0059$	0.9886	0.0342
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	$a = 1.1133,$ $c = -0.0962,$ $k = 0.0048$	0.9942	0.0253
6	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	$a = 0.9759,$ $b = 0.0000,$ $k = 0.0013,$ $n = 1.2669$	0.9969	0.0193

จากตารางที่ 4.8 ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิ 80 °C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัล จากการพิจารณาค่า R² และค่า RMSE พบว่า แบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al. ได้ค่าเหมาะสมและแม่นยำที่สุด โดยค่า R² สูงสุดอยู่ที่ 0.9969 และค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.0193

ตารางที่ 4.9 ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิ 80 °C ความเร็วอากาศ 1.0 m/s

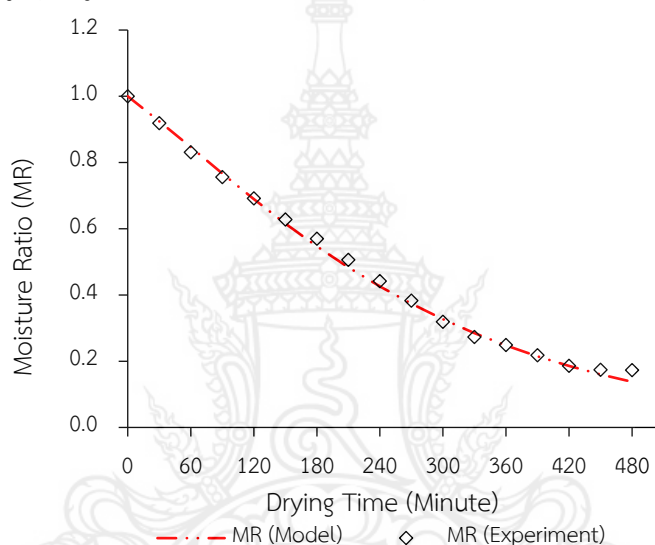
ลำดับ	ชื่อแบบจำลอง	สมการความสัมพันธ์	Constant	R ²	RMSE
1	Newton / Lewis	$MR = \exp(-kt)$	$k = 0.0062$	0.9830	0.0417
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	$k = 0.0017,$ $n = 1.2516$	0.9964	0.0198
3	Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	$k = -0.6340,$ $n = -0.0098$	0.9830	0.0430
4	Handerson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	$a = 1.0520,$ $k = 0.0065$	0.9862	0.0388
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	$a = 1.1410,$ $c = -0.1238,$ $k = 0.0049$	0.9967	0.0196
6	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	$a = 0.9873,$ $b = -0.0001,$ $k = 0.0021,$ $n = 1.1935$	0.9980	0.0159

จากตารางที่ 4.9 ผลการจำลองการอบแห้งดีป्लीที่อุณหภูมิ 80 °C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัล จากการพิจารณาค่า R² และค่า RMSE พบว่า แบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al. ได้ค่าเหมาะสมและแม่นยำที่สุด โดยค่า R² สูงสุดอยู่ที่ 0.9980 และค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.0159

4.5 ผลการทดลองการอบแห้งดีปลีด้วยลมร้อนแบบถาด เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัล

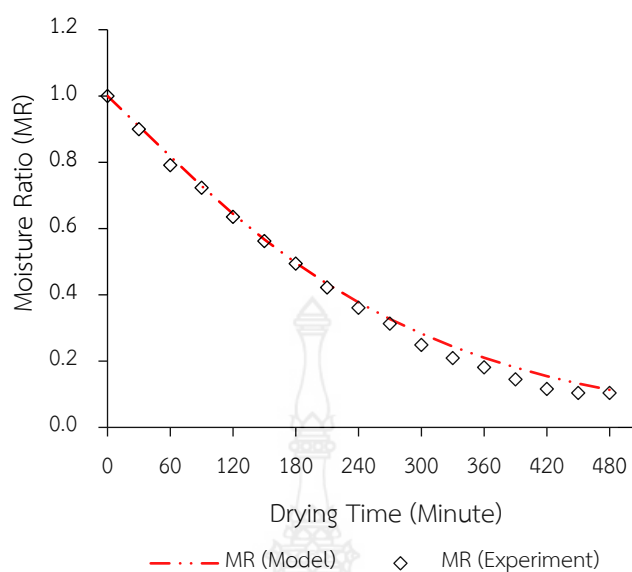
ผลการทดลองการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิลมร้อน 70 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 0.7 และ 1.0 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al. แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) กับเวลา อัตราส่วนความชื้นลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียล เมื่อระยะเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.25–4.33

ในรูปที่ 4.25 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น ของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al. ได้ค่า R^2 สูงสุดอยู่ที่ 0.9976 และค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.0149



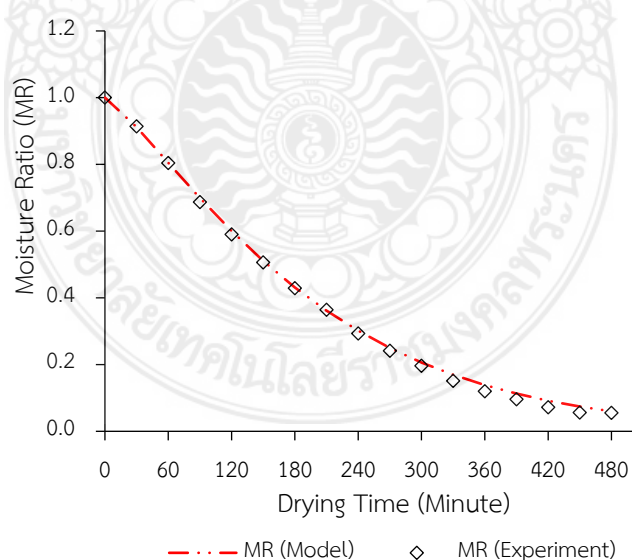
รูปที่ 4.25 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิลมร้อน 70 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al.

ในรูปที่ 4.26 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น ของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al. ได้ค่า R^2 สูงสุดอยู่ที่ 0.9987 และค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.0119



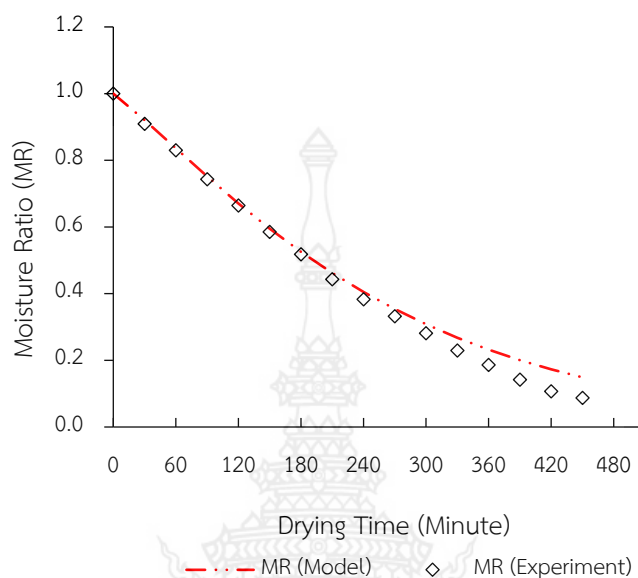
รูปที่ 4.26 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิความร้อน 70 °C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al.

ในรูปที่ 4.27 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น ของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิความร้อน 70°C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al. ได้ค่า R^2 สูงสุดอยู่ที่ 0.9997 และค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.0062



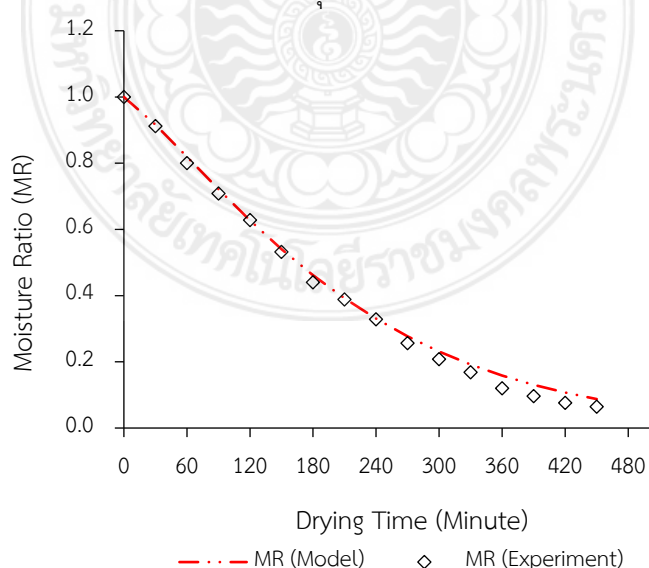
รูปที่ 4.27 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิความร้อน 70 °C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al.

ในรูปที่ 4.28 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น ของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิ 75°C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al. ได้ค่า R^2 สูงสุดอยู่ที่ 0.9993 และค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.0091



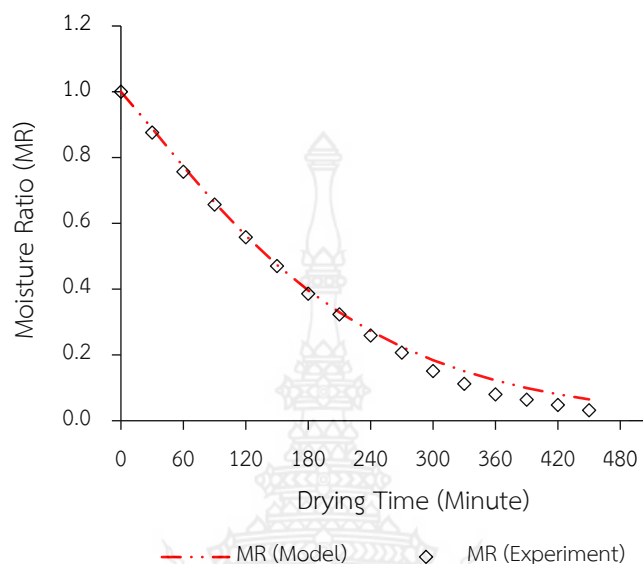
รูปที่ 4.28 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิ 75 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al.

ในรูปที่ 4.29 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น ของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิ 75°C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al. ได้ค่า R^2 สูงสุดอยู่ที่ 0.9989 และค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.0113



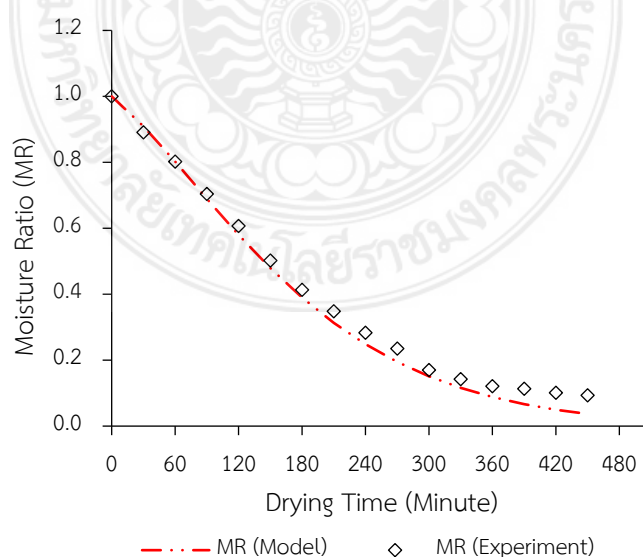
รูปที่ 4.29 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิ 75 °C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al.

ในรูปที่ 4.30 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น ของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิ 75°C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al. ได้ค่า R^2 สูงสุดอยู่ที่ 0.9992 และค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.0101



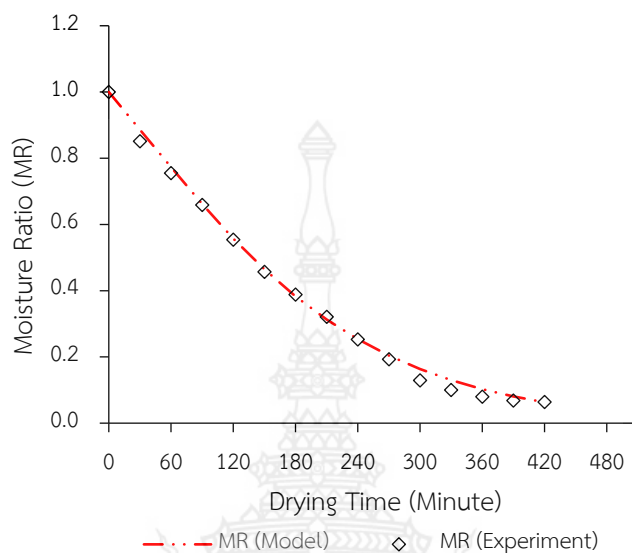
รูปที่ 4.30 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิ 75 °C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al.

ในรูปที่ 4.31 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น ของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิ 80°C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al. ได้ค่า R^2 สูงสุดอยู่ที่ 0.9988 และค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.0119



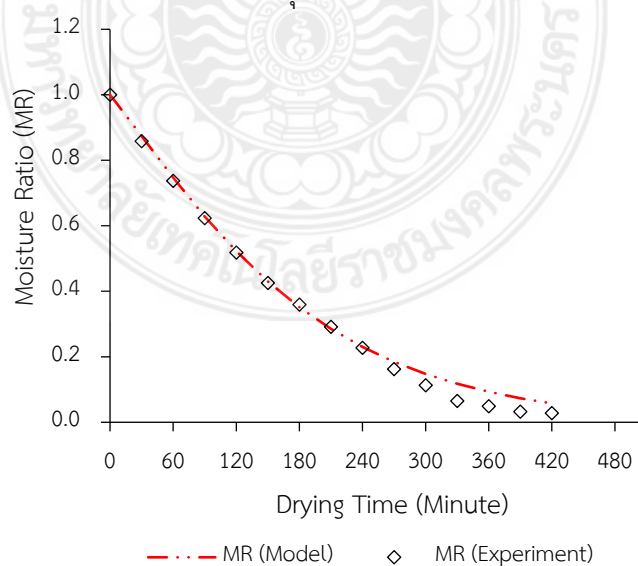
รูปที่ 4.31 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิ 80 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al.

ในรูปที่ 4.32 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น ของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิ 80°C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al. ได้ค่า R^2 สูงสุดอยู่ที่ 0.9969 และค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.0193



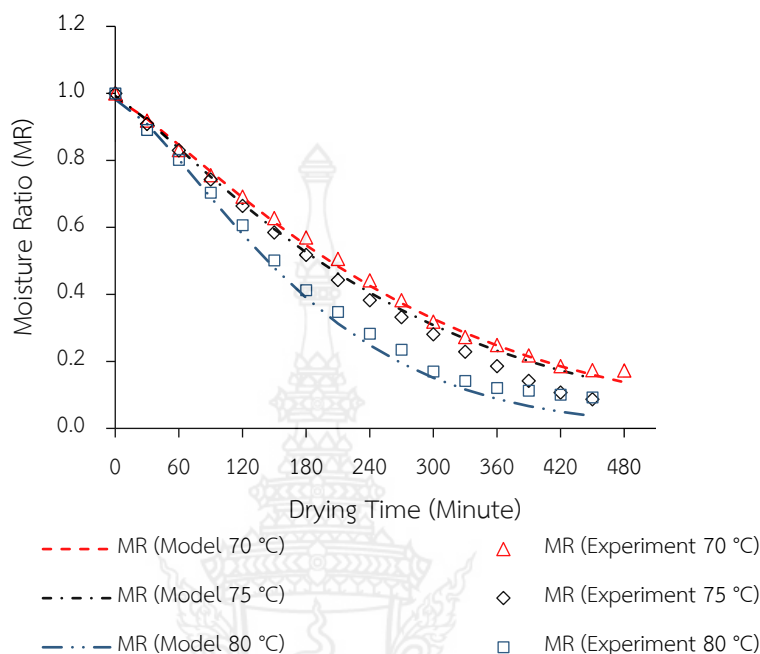
รูปที่ 4.32 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิ 80 °C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al.

ในรูปที่ 4.33 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น ของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิ 80°C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al. ได้ค่า R^2 สูงสุดอยู่ที่ 0.9980 และค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.0159

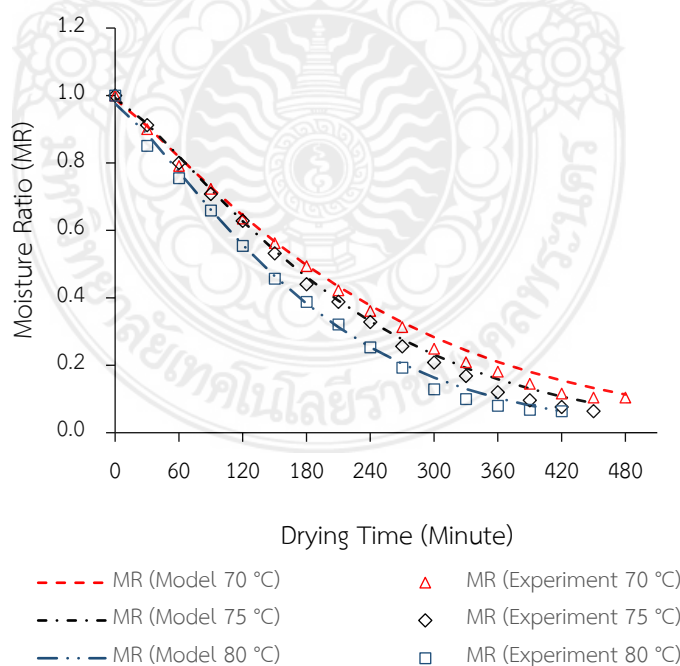


รูปที่ 4.33 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิ 80 °C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al.

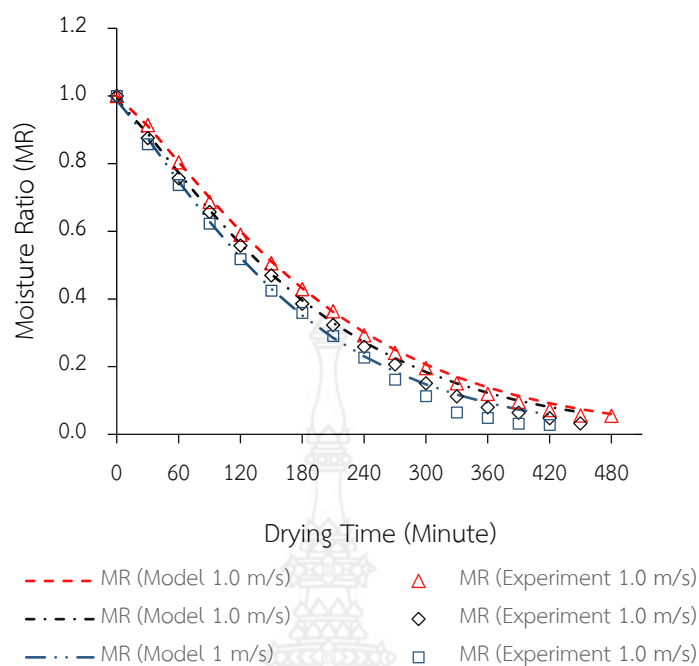
รูปที่ 4.34-4.36 แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) กับเวลา อัตราส่วนความชื้นลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียล เมื่อระยะเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยเมื่ออุณหภูมิลมร้อน สูงกว่าอัตราส่วนความชื้นจะลดลงได้ดีกว่า



รูปที่ 4.34 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีปลีที่ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s อุณหภูมิลมร้อน 70 75 และ 80 °C เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al.

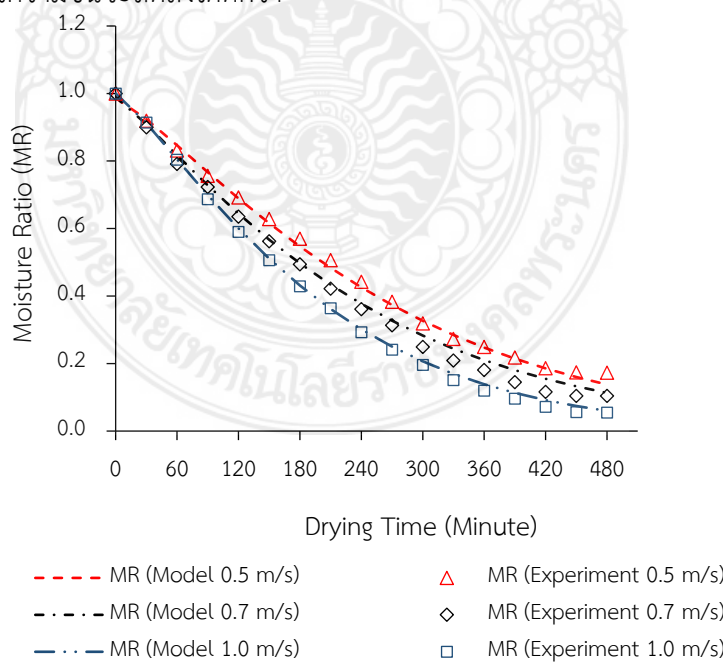


รูปที่ 4.35 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีปลีที่ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s อุณหภูมิลมร้อน 70 75 และ 80 °C เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al.

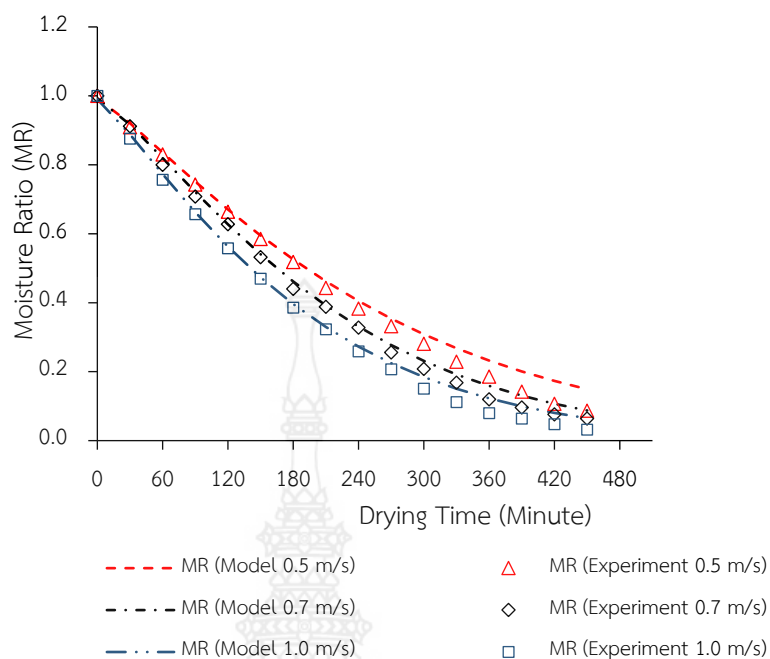


รูปที่ 4.36 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีปลีที่ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s อุณหภูมิลมร้อน 70 75 และ 80 °C เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al.

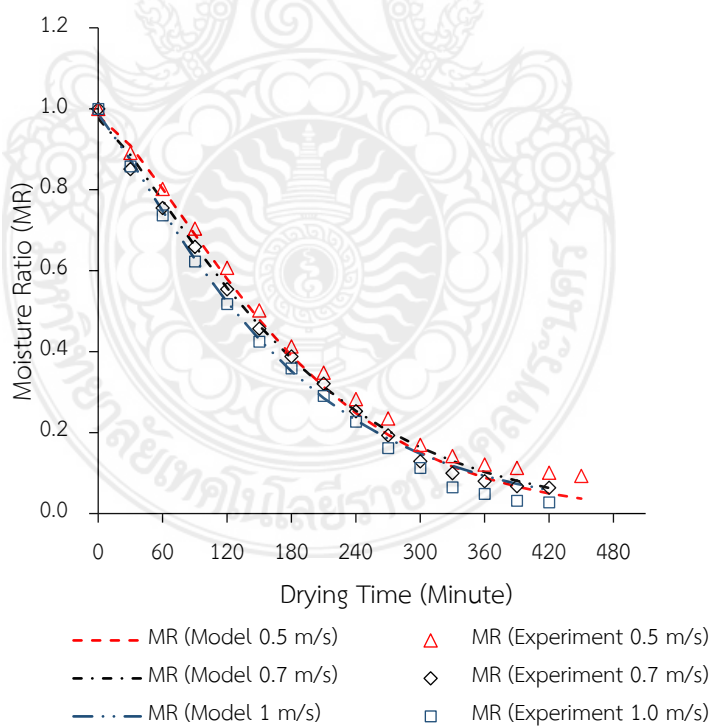
รูปที่ 4.37-4.39 แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) กับเวลา อัตราส่วนความชื้นลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียล เมื่อระยะเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยเมื่อความเร็วลมร้อนสูงกว่า อัตราส่วนความชื้นจะลดลงได้ดีกว่า



รูปที่ 4.37 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิลมร้อน 70 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 0.7 และ 1.0 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al.



รูปที่ 4.38 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดิลีที่อุณหภูมิร้อน 75 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 0.7 และ 1.0 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al.



รูป 4.39 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดิลีที่อุณหภูมิร้อน 80°C ความเร็วลมร้อน 0.5 0.7 และ 1.0 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli et al.

4.6 สรุปผลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอบแห้ง

จากการศึกษาการลดความชื้นดีปส์ด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด ได้ใช้แบบจำลองเอมพิริคัลที่นิยมใช้ในการจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง 6 สมการคือ Newton / Lewis, Page, Modified Page, Handerson and Pabis, Logarithmic, Midilli et al. ทุกการทดลองสรุปว่าแบบจำลองของ Midilli et al. มีค่าความแม่นยำและใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด โดยมีค่า R^2 ระหว่าง 0.9969 – 0.9997 และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) มีค่าต่ำสุด โดยมีค่า RMSE ระหว่าง 0.0062 – 0.0159 ดังนั้นสรุปได้ว่าแบบจำลองของ Midilli et al. เหมาะสมกับงานวิจัยนี้มากที่สุด



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการลดความชื้นดีปัสด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด โดยทำการศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิและความเร็วลมร้อน ต่อจลนพลศาสตร์ การเปลี่ยนแปลงความชื้น พลังงานและเอนโทรปี ของการอบแห้งดีปัสในเครื่องอบแห้งแบบถาด ในการทดลองใช้ดีปัสมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 246 - 253 % (d.b.) เงื่อนไขการทดลองใช้อุณหภูมิลมร้อน 70 75 และ 80 °C และความเร็วลมร้อน 0.5 0.7 และ 1.0 m/s จากการทดลองพบว่า ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นเมื่อระยะเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้นความชื้นจะลดลงอย่างช้า ๆ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนความชื้นดีปัสลดลงได้มากขึ้น อุณหภูมิลมร้อนที่สูงขึ้นความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิลมร้อนกับอุณหภูมิที่ผิวดีปัสจึงเพิ่มขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการระเหยน้ำจึงมากขึ้นตามไปด้วย เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากปริมาณน้ำที่อยู่ภายในดีปัสเริ่มน้อยลงและส่วนใหญ่จะอยู่ภายในเนื้อดีปัส ระยะเวลาที่ใช้สำหรับการแพร่ของน้ำจากภายในออกสู่ผิวด้านนอกจึงเพิ่มขึ้น ส่วนผลกระทบของความเร็วลมร้อนต่อการลดความชื้น การเพิ่มความเร็วลมร้อนทำให้มวลลมร้อนที่ไหลผ่านห้องอบแห้งเพิ่มขึ้น การระเหยน้ำจึงเพิ่มมากขึ้น ที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากัน ความเร็วลมร้อนสูงจึงมีผลให้ความชื้นดีปัสลดลงได้มากกว่าที่ความเร็วลมร้อนต่ำ สรุปผลการทดลองและวิจัยครั้งนี้ การอบแห้งดีปัสที่อุณหภูมิลมร้อน 80 °C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s ให้ความชื้นลดลงได้เร็วกว่าการอบแห้งที่เงื่อนไขอื่นๆ การลดลงของความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นความชื้นจะลดลงอย่างช้า ๆ

ผลการวิเคราะห์ค่าพลังงานและเอนโทรปีของระบบ การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนมีผลทำให้ประสิทธิภาพพลังงาน และประสิทธิภาพเอนโทรปีเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเร็วลมร้อนไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพพลังงาน และประสิทธิภาพเอนโทรปี ค่าประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดเท่ากับ 22.56 % และค่าประสิทธิภาพเอนโทรปีสูงสุดเท่ากับ 93.35 %

อัตราส่วนความชื้นที่ผ่านการทดลองการลดความชื้นดีปัสด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิลมร้อน 70 75 และ 80 °C และความเร็วลมร้อน 0.5 0.7 และ 1.0 m/s ได้ใช้แบบจำลองเอมพิริคัลที่นิยมใช้ในการจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง 6 สมการคือ Newton/Lewis, Page, Modified Page, Handerson and Pabis, Logarithmic, Midilli et al. โดยผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทุกการทดลองสรุปว่าแบบจำลองของ Midilli et al. มีค่าความแม่นยำและใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มีค่าสูงสุด โดยมีค่า R^2 ระหว่าง 0.9969 – 0.9997 และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) มีค่าต่ำ

สุด โดยมีค่า RMSE ระหว่าง 0.0062 – 0.0159 ดังนั้นสรุปได้ว่าแบบจำลองของ Midilli et al. เหมาะสมกับงานวิจัยนี้มากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรศึกษาเพิ่มเติมถึงผลกระทบของอุณหภูมิและความเร็วของลมร้อนอบแห้งที่มีต่อสีและคุณภาพของดีป्ली

5.3.2 ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการทดลอง การเปลี่ยนแปลงความชื้นทางเข้าของอากาศอบแห้งที่สภาวะความชื้นสูง เช่น ในหน้าฝน เพราะในสถานการณ์จริง การทำผลิตภัณฑ์ให้แห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งซึ่งต้องมีการใช้พลังงาน ควรจะเป็นสถานการณ์ที่ไม่มีแดด หรือสถานการณ์ที่ต้องเร่งทำผลิตภัณฑ์ให้แห้งโดยเร็ว

5.3.3 ควรศึกษาเพิ่มเติม การเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด เช่น ออกแบบเครื่องอบแห้งให้ทำความร้อนสุดท้ายที่ยังคงมีพลังงานสูงอยู่ (Waste heat recovery) กลับมาป้อนเป็นอากาศทางเข้าห้องอบแห้ง จะช่วยลดการใช้พลังงานความร้อน อีกวิธีการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Heat transfer coefficient) ของอากาศที่สูงขึ้น จะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น เช่น การทำให้กาศปั่นป่วน (Turbulent) จะช่วยเพิ่มค่า Reynolds number โดยอาจพิจารณาติดตั้งกลุ่มท่อและใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปบริเวณก่อนถึงถาดวางผลิตภัณฑ์

5.3.4 เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดต้นแบบ ที่ได้ออกแบบและทดลองในงานวิจัยนี้เป็นโมเดลขนาดเล็กที่ขนาดเหมาะสมกับการทดลองกับผลิตภัณฑ์จำนวนไม่มาก หากต้องการขับผลิตภัณฑ์จำนวนมาก ควรออกแบบขนาดเครื่องให้เหมาะสมรวมถึงควรพิจารณาค่าพลังงานที่ต้องใช้ทั้งระบบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://medthai.com/%e0%b8%94%e0%b8%b5%e0%b8%9b%e0%b8%a5%e0%b8%b5/>, ดีปลี่ สรรพคุณและประโยชน์ของดีปลี่, [10/5/2567]
- [2] <http://www.agriman.doe.go.th/home/news/2563/55-56.pdf>, ดีปลี่, กลุ่มส่งเสริมพืชสมุนไพรและเครื่องเทศ กรมส่งเสริมการเกษตร, [10/5/2567]
- [3] Akpinar E.K. “The effects of some exergetic indicators on the performances of thin layer drying process of long green pepper in a solar dryer” Heat Mass Tran. 5(2) : pp. 299–308. 2019
- [4] Castro M., Roman C., Echegaray M., Mazza G. and Rodriguez R. “Exergy analyses of onion drying by convection: Influence of dryer parameters on performance” Entropy, MDPI Publisher Switzerland, MDPI\Accepted: 16 April 2018; Published: 25 April 2018
- [5] Yogendrasasidhar D. and Setty Y.P. “Drying kinetics, exergy and energy analyses of kodo millet grains and fenugreek seeds using wall heated fluidized bed dryer. Energy. 151, pp. 799–811. 2018
- [6] Aviara N.A., Onuoha L.N., Falola O.E. and Igbeka J.C. “Energy and exergy analyses of native cassava starch drying in a tray dryer”. Energy. 73 (9), 809–817. 2014
- [7] Okunola A.A., Adekanye T.A. and Idahosa E. “Energy and exergy analyses of the okra drying process in a forced convection cabinet dryer” Res. Agric. Eng. 67 (1) : pp. 8–16. 2021
- [8] Arepally D., Ravula S.R., Malik K.G., Kamidi V. “Mathematical modelling. energy and exergy analysis of tomato slices in a mixed-mode natural convection solar dryer” Chem. Sci. Int. J. 20(4): pp. 1–11. 2017
- [9] Chang Chen, Zhang Weipeng, Chandrasekar Venkitasamy, Ragab Khir, Tara McHugh, Zhongli Pan, “Walnut structure and its influence on the hydration and drying characteristic” Dry. Technol. Published: 38 (8): pp. 975–986. 2020.
- [10] Kolaric L., Minarovicov L., Laukov M., Karovicov J. and Kohajdov Z. (2020). Pasta noodles enriched with sweet potato starch: impact on quality parameters and resistant starch content. J. Texture Stud. 51 (3): 464–474
- [11] Benhamza A., Boubekri A., Atia A., Ferouali H.E., Hadibi T., Arici M. and Abdenouri N.

- (2021). Multi-objective optimization of solar air heater for food drying based on energy. Exergy and improvement potential. *Renew. Energy* 169: 1190–1209
- [12] Zalazar-Garcia D., Roman C.M., Fernandez A., Asensio D., Zhang X., Fabani M.P., Rodriguez R. and Mazza G.(2022). Exergy, energy and sustainability assessments applied to RSM optimization of integrated convective air-drying with pretreatments to improve the nutritional quality of pumpkin seeds. *Sustain. Energy technol. Assessments*. 49 (101763).
- [13] สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ, สำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพมหานคร, ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1, 2555
- [14] Cengel Y.A. and Boles M.A. (2011) *Thermodynamics: an engineering approach*. 7th Edition. Mcgraw-hill international Enterprises
- [15] A.E. Ahern, 1980, *The Exergy Method of System Analysis*, John Wiley and Sons Inc., New York.
- [16] วสันต์ จินธาดา, บัญญัติ นิยมवास, อภิชาติ ศรีไชยรัตน์, “การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้งยางแผ่น”, ใน วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 31, ฉบับที่ 4. ต.ค.-ธ.ค. หน้า 638-650, 2564.
- [17] รัฐศักดิ์ พรหมมาศ, ไชยณรงค์ จักรธรานนท์ และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, “การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีในกระบวนการอบแห้งวัสดุพืชน้ำหลายชั้นโดยใช้ลมร้อน”, การประชุมวิชาการเครือข่ายทางวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 4-7 พฤศจิกายน 2552.
- [18] Akpınar E.K. “Energy and exergy analyses of drying of red pepper slices in a convective type dryer”, *Heat Mass Transfer*. Vol. 31, pp. 1165–1176, 2004.
- [19] J.B. Hussein, M.S. Sanusi, M.A. Usman. “Energy and exergy analysis during the dehydration of pretreated sweet potato via a conventional air dryer”, *Nigerian journal of engineering science and technology research*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-14. 2017
- [20] A. Midilli, H. Kucuk, “Energy and exergy analyses of solar drying process of Pistachio” *Energy* 28, pp. 539–556. 2003
- [21] Neslihan Colak, Ebru Kuzgunkaya, Arif Hepbasli, “Exergetic assessment of drying of mint leaves in a heat pump dryer” *Food Process Engineering* 31. pp. 281–298. 2008
- [22] Mohammad Kaveha, Yousef Abbaspour-Gilandeha, Guangnan Chenb, “Drying

- kinetic, quality, energy and exergyperformance of hot air-rotary drum drying of greenpeas using adaptive neuro-fuzzy inference system”, Food and Bioproducts Processing 124. pp. 168–183. 2020
- [23] วรณิ เอกศิลป์, การศึกษาพลังงานและเอ็กเซอร์ยีของกระบวนการอบแห้งวัสดุชีวภาพโดยใช้สเปาเต็ดเบตร่วมกับไมโครเวฟ, วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2550
- [24] รัฐศักดิ์ พรหมมาศ, พรทิพย์ แก่งอินทร์, ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, “การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์ยีในกระบวนการอบแห้งวัสดุพืชนโดยใช้ลมร้อน”, การประชุมวิชาการเครือข่ายทางวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ศูนย์รังสิต 15-17 ตุลาคม 2551., หน้า 448-455
- [25] AACCC., Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists. (1995). 9th Edition. St. Paul: American Association of Cereal.
- [26] Bootkote P., Soponronnarit S. and Prachayawarakorn S. (2016). Process of producing parboiled rice with different colors by fluidized bed drying technique including tempering. Food bioprocess technology. 2016. 9: 1574–1586.
- [27] Ndukwa M.C. (2009). Effect of drying temperature and drying air velocity on the drying rate and drying constant of cocoa bean. Agricultural engineering international. The CIGR Ejournal. 2009 (6).
- [28] Potapov V. and Yakushenko E. (2013). Modeling of the drying process with pre-heating. Journal of industrial technology and engineering. 2(07): 10 – 16.
- [29] Aviara, N. A., & Igbeka, J. C. (2016). Modeling for drying of thin layer of native cassava starch in tray dryer. Journal of Biosystems Engineering, 41(4), 342-356.
- [30] Akpınar, E. K., Y. Bicer and A. Midilli. 2003. Modeling and experimental study on drying of apple slices in a convective cyclone dryer. Journal of Food Process Engineering 26:515-541
- [31] Akpınar E.Kavak and Yasar Bicer (2006) “Mathematical modeling and experimental study on thin layer drying of strawberry” International Journal of Food Engineering
- [32] กิตติสถาพรประสาธน์ และ โพธิ์ทอง ประณิตพลกรัง (2560) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็ดเบต. วิศวกรรมลาดกระบัง, 34 (4), 22-29

ภาคผนวก ก
ผลการทดลอง



ตารางที่ ก.1 ผลการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s
น้ำหนักดีปลี่เริ่มต้น 500 g (0.50 kg)

เวลาอบแห้ง (นาที)	มวลความชื้นเริ่มต้น (กรัม)	ความชื้นฐานแห้ง (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น (MR)
0	500.00	252.49	1.000
30	470.82	231.92	0.919
60	439.57	209.89	0.831
90	412.49	190.79	0.756
120	389.57	174.64	0.692
150	366.66	158.48	0.628
180	345.83	143.80	0.570
210	322.91	127.64	0.506
240	300.00	111.49	0.442
270	279.16	96.80	0.383
300	256.24	80.64	0.319
330	239.58	68.90	0.273
360	231.18	62.98	0.249
390	219.84	54.97	0.218
420	208.49	47.00	0.186
450	204.24	43.98	0.174
480	203.95	43.78	0.173

ตารางที่ ก.2 ผลการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s
น้ำหนักดิบเริ่มต้น 500 g (0.50 kg)

เวลาอบแห้ง (นาที)	มวลความชื้นเริ่มต้น (กรัม)	ความชื้นฐานแห้ง (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น (MR)
0	500.00	248.02	1.000
30	464.19	223.10	0.900
60	425.51	196.17	0.791
90	401.16	179.22	0.723
120	369.64	157.28	0.635
150	343.85	139.33	0.562
180	319.49	122.38	0.494
210	293.70	104.43	0.422
240	272.21	89.47	0.361
270	255.02	77.50	0.313
300	232.10	61.55	0.249
330	217.77	51.58	0.209
360	207.74	44.60	0.181
390	194.85	35.62	0.145
420	184.82	28.64	0.116
450	180.52	25.65	0.104
480	180.23	25.45	0.104

ตารางที่ ก.3 ผลการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s
น้ำหนักดิบเริ่มต้น 500 g (0.50 kg)

เวลาอบแห้ง (นาที)	มวลความชื้นเริ่มต้น (กรัม)	ความชื้นฐานแห้ง (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น (MR)
0	500.00	251.25	1.000
30	469.13	229.56	0.914
60	429.85	201.96	0.804
90	388.25	172.74	0.687
120	353.58	148.39	0.590
150	323.54	127.28	0.506
180	295.81	107.80	0.429
210	272.70	91.57	0.364
240	247.28	73.71	0.293
270	228.79	60.72	0.241
300	212.61	49.36	0.196
330	196.43	37.99	0.151
360	185.19	30.09	0.120
390	176.64	24.09	0.096
420	168.09	18.10	0.072
450	162.39	14.08	0.056
480	162.11	13.88	0.055

ตารางที่ ก.4 ผลการอบแห้งที่อุณหภูมิ 75 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s
น้ำหนักดิบเริ่มต้น 500 g (0.50 kg)

เวลาอบแห้ง (นาที)	มวลความชื้นเริ่มต้น (กรัม)	ความชื้นฐานแห้ง (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น (MR)
0	500.00	252.86	1.000
30	467.42	229.87	0.909
60	439.09	209.84	0.830
90	407.93	187.90	0.743
120	379.60	167.89	0.664
150	351.27	147.90	0.585
180	327.20	130.91	0.518
210	300.28	111.91	0.443
240	279.04	96.92	0.383
270	260.62	83.93	0.332
300	242.21	70.93	0.281
330	223.8	57.96	0.229
360	208.22	46.92	0.186
390	192.63	35.95	0.142
420	179.89	26.95	0.107
450	172.80	21.90	0.087

ตารางที่ ก.5 ผลการอบแห้งที่อุณหภูมิร้อน 75 °C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s
น้ำหนักดิบเริ่มต้น 500 g (0.50 kg)

เวลาอบแห้ง (นาที)	มวลความชื้นเริ่มต้น (กรัม)	ความชื้นฐานแห้ง (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น (MR)
0	500.00	250.19	1.000
30	468.57	228.18	0.912
60	428.57	200.16	0.800
90	395.71	177.15	0.708
120	367.14	157.14	0.628
150	332.86	133.13	0.532
180	300.00	110.11	0.440
210	281.43	97.11	0.388
240	260.00	82.10	0.328
270	234.29	64.09	0.256
300	217.14	52.08	0.208
330	202.86	42.10	0.168
360	185.71	30.09	0.120
390	177.14	24.07	0.096
420	170.00	19.06	0.076
450	165.71	16.06	0.064

ตารางที่ ก.6 ผลการอบแห้งที่อุณหภูมิ 75 °C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s
น้ำหนักดิบเริ่มต้น 500 g (0.50 kg)

เวลาอบแห้ง (นาที)	มวลความชื้นเริ่มต้น (กรัม)	ความชื้นฐานแห้ง (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น (MR)
0	500.00	250.73	1.000
30	455.84	219.75	0.876
60	413.11	189.78	0.757
90	377.49	164.80	0.657
120	341.88	139.81	0.558
150	310.54	117.83	0.470
180	280.63	96.85	0.386
210	257.83	80.86	0.323
240	235.04	64.87	0.259
270	216.52	51.88	0.207
300	196.58	37.89	0.151
330	182.34	27.90	0.112
360	170.94	19.91	0.080
390	165.24	15.87	0.064
420	159.54	11.90	0.048
450	153.85	7.92	0.032

ตารางที่ ก.7 ผลการอบแห้งที่อุณหภูมิร้อน 80 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s
น้ำหนักดิบเริ่มต้น 500 g (0.50 kg)

เวลาอบแห้ง (นาที)	มวลความชื้นเริ่มต้น (กรัม)	ความชื้นฐานแห้ง (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น (MR)
0	500.00	246.67	1.000
30	461.12	219.71	0.891
60	429.42	197.73	0.802
90	394.83	173.75	0.704
120	360.25	149.77	0.607
150	322.78	123.80	0.502
180	291.08	101.82	0.413
210	268.03	85.83	0.348
240	244.97	69.85	0.283
270	227.68	57.86	0.235
300	204.62	41.87	0.170
330	194.54	34.90	0.142
360	187.33	29.88	0.121
390	184.45	27.88	0.113
420	180.13	24.91	0.101
450	177.24	22.89	0.093

ตารางที่ ก.8 ผลการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 °C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s
น้ำหนักดิบเริ่มต้น 500 g (0.50 kg)

เวลาอบแห้ง (นาที)	มวลความชื้นเริ่มต้น (กรัม)	ความชื้นฐานแห้ง (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น (MR)
0	500.00	248.75	1.000
30	447.00	211.78	0.851
60	412.62	187.80	0.755
90	378.23	163.82	0.659
120	340.98	137.83	0.554
150	306.25	113.61	0.457
180	281.82	96.57	0.388
210	257.89	79.87	0.321
240	233.53	62.89	0.253
270	212.04	47.90	0.193
300	189.12	31.91	0.129
330	179.09	24.91	0.100
360	171.92	19.92	0.080
390	167.63	16.89	0.068
420	166.19	15.94	0.064

ตารางที่ ก.9 ผลการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 °C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s
น้ำหนักดิบเริ่มต้น 500 g (0.50 kg)

เวลาอบแห้ง (นาที)	มวลความชื้นเริ่มต้น (กรัม)	ความชื้นฐานแห้ง (% d.b.)	อัตราส่วนความชื้น (MR)
0	500.00	247.58	1.000
30	449.59	212.54	0.858
60	406.36	182.49	0.737
90	366.01	154.44	0.623
120	328.55	128.40	0.518
150	295.41	105.36	0.425
180	272.03	89.10	0.359
210	247.81	72.27	0.291
240	224.8	56.27	0.227
270	201.74	40.24	0.162
300	184.45	28.22	0.113
330	167.16	16.20	0.065
360	161.39	12.19	0.049
390	155.63	8.21	0.032
420	154.19	7.18	0.028

ตารางที่ ก.10 ผลการจำลองอัตราส่วนความชื้นตึปสี่ ที่อุณหภูมิความร้อน 70 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s โมเดล Midilli et al. เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

เวลาอบแห้ง (นาทึ)	MR (Model)	MR (Experiment)
0	1.000	1.000
30	0.924	0.919
60	0.846	0.831
90	0.767	0.756
120	0.689	0.692
150	0.616	0.628
180	0.547	0.570
210	0.484	0.506
240	0.426	0.442
270	0.374	0.383
300	0.327	0.319
330	0.285	0.273
360	0.248	0.249
390	0.215	0.218
420	0.186	0.186
450	0.160	0.174
480	0.138	0.173

ตารางที่ ก.11 ผลการจำลองอัตราส่วนความชื้นดีปลี ที่อุณหภูมิความร้อน 70 °C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s โมเดล Midilli et al. เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

เวลาอบแห้ง (นาที)	MR (Model)	MR (Experiment)
0	1.000	1.000
30	0.909	0.900
60	0.817	0.791
90	0.728	0.723
120	0.644	0.635
150	0.567	0.562
180	0.497	0.494
210	0.433	0.422
240	0.377	0.361
270	0.327	0.313
300	0.283	0.249
330	0.244	0.209
360	0.210	0.181
390	0.181	0.145
420	0.155	0.116
450	0.133	0.104
480	0.113	0.104

ตารางที่ ก.12 ผลการจำลองอัตราส่วนความชื้นตึปลี ที่อุณหภูมิความร้อน 70 °C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s โมเดล Midilli et al. เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

เวลาอบแห้ง (นาทึ)	MR (Model)	MR (Experiment)
0	1.000	1.000
30	0.912	0.914
60	0.805	0.804
90	0.699	0.687
120	0.600	0.590
150	0.511	0.506
180	0.431	0.429
210	0.362	0.364
240	0.302	0.293
270	0.250	0.241
300	0.206	0.196
330	0.170	0.151
360	0.139	0.120
390	0.113	0.096
420	0.092	0.072
450	0.074	0.056
480	0.060	0.055

ตารางที่ ก.13 ผลการจำลองอัตราส่วนความชื้นตึปลี ที่อุณหภูมิความร้อน 75 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s โมเดล Midilli et al. เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

เวลาอบแห้ง (นาทึ)	MR (Model)	MR (Experiment)
0	1.000	1.000
30	0.921	0.909
60	0.836	0.830
90	0.751	0.743
120	0.671	0.664
150	0.595	0.585
180	0.525	0.518
210	0.462	0.443
240	0.405	0.383
270	0.354	0.332
300	0.308	0.281
330	0.268	0.229
360	0.232	0.186
390	0.201	0.142
420	0.173	0.107
450	0.149	0.087

ตารางที่ ก.14 ผลการจำลองอัตราส่วนความชื้นตึปลี ที่อุณหภูมิความร้อน 75 °C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s โมเดล Midilli et al. เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

เวลาอบแห้ง (นาทึ)	MR (Model)	MR (Experiment)
0	1.000	1.000
30	0.916	0.912
60	0.820	0.800
90	0.721	0.708
120	0.627	0.628
150	0.540	0.532
180	0.462	0.440
210	0.392	0.388
240	0.330	0.328
270	0.277	0.256
300	0.231	0.208
330	0.192	0.168
360	0.159	0.120
390	0.131	0.096
420	0.107	0.076
450	0.087	0.064

ตารางที่ ก.15 ผลการจำลองอัตราส่วนความชื้นดีปลี ที่อุณหภูมิความร้อน 75 °C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s โมเดล Midilli et al. เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

เวลาอบแห้ง (นาที)	MR (Model)	MR (Experiment)
0	0.990	1.000
30	0.888	0.876
60	0.773	0.757
90	0.663	0.657
120	0.563	0.558
150	0.474	0.470
180	0.396	0.386
210	0.330	0.323
240	0.273	0.259
270	0.225	0.207
300	0.184	0.151
330	0.151	0.112
360	0.123	0.080
390	0.099	0.064
420	0.080	0.048
450	0.065	0.032

ตารางที่ ก.16 ผลการจำลองอัตราส่วนความชื้นตึปลี ที่อุณหภูมิความร้อน 80 °C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s โมเดล Midilli et al. เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

เวลาอบแห้ง (นาทึ)	MR (Model)	MR (Experiment)
0	1.000	1.000
30	0.909	0.891
60	0.803	0.802
90	0.689	0.704
120	0.580	0.607
150	0.479	0.502
180	0.390	0.413
210	0.313	0.348
240	0.248	0.283
270	0.195	0.235
300	0.151	0.170
330	0.116	0.142
360	0.088	0.121
390	0.067	0.113
420	0.050	0.101
450	0.037	0.093

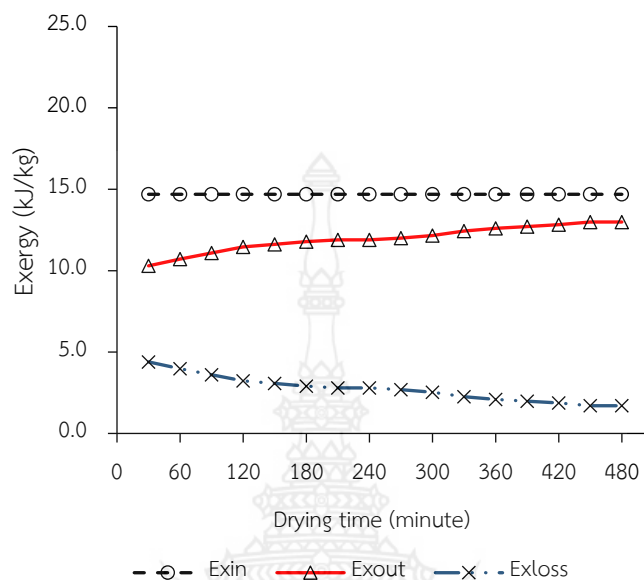
ตารางที่ ก.17 ผลการจำลองอัตราส่วนความชื้นตึปลี ที่อุณหภูมิความร้อน 80 °C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s โมเดล Midilli et al. เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

เวลาอบแห้ง (นาทึ)	MR (Model)	MR (Experiment)
0	1.000	1.000
30	0.886	0.851
60	0.773	0.755
90	0.662	0.659
120	0.558	0.554
150	0.464	0.457
180	0.383	0.388
210	0.313	0.321
240	0.254	0.253
270	0.204	0.193
300	0.163	0.129
330	0.130	0.100
360	0.103	0.080
390	0.081	0.068
420	0.063	0.064

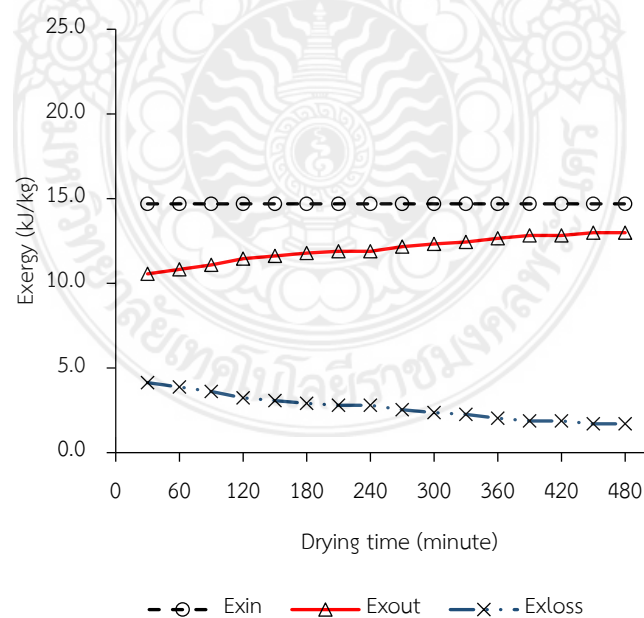
ตารางที่ ก.18 ผลการจำลองอัตราส่วนความชื้นตึปสี่ ที่อุณหภูมิความร้อน 80 °C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s โมเดล Midilli et al. เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

เวลาอบแห้ง (นาที)	MR (Model)	MR (Experiment)
0	0.987	1.000
30	0.874	0.858
60	0.747	0.737
90	0.629	0.623
120	0.522	0.518
150	0.430	0.425
180	0.352	0.359
210	0.285	0.291
240	0.230	0.227
270	0.185	0.162
300	0.148	0.113
330	0.118	0.065
360	0.093	0.049
390	0.073	0.032
420	0.058	0.028

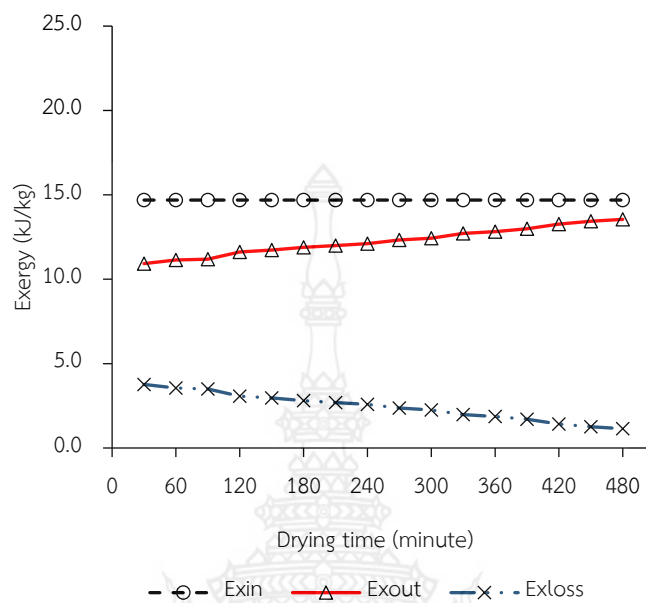
รูปที่ ก.1 ผลกระทบต่อเอ็กเซอร์จีไหลเข้า เอ็กเซอร์จีไหลออก เอ็กเซอร์จีสูญเสีย
ที่อุณหภูมิร้อน 70°C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s



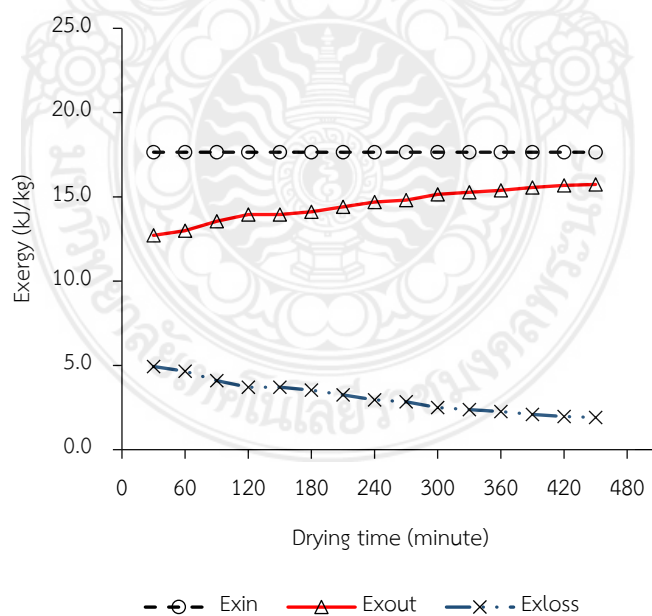
รูปที่ ก.2 ผลกระทบต่อเอ็กเซอร์จีไหลเข้า เอ็กเซอร์จีไหลออก เอ็กเซอร์จีสูญเสีย
ที่อุณหภูมิร้อน 70°C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s



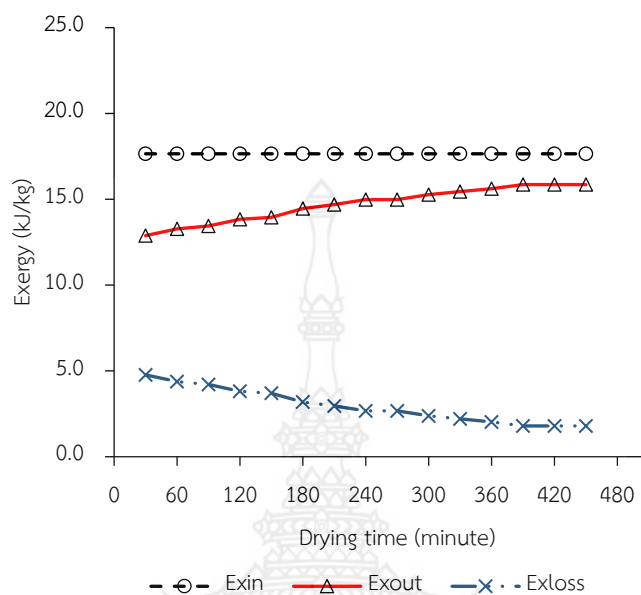
รูปที่ ก.3 ผลกระทบต่อเอ็กเซอร์จีไหลเข้า เอ็กเซอร์จีไหลออก เอ็กเซอร์จีสูญเสีย
ที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s



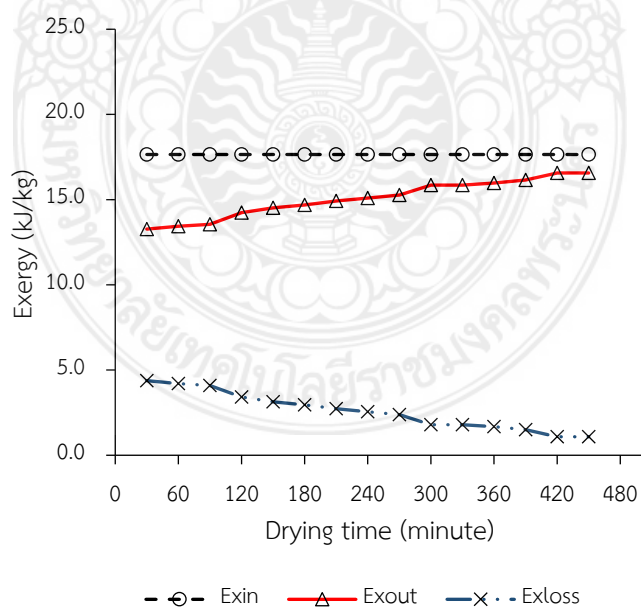
รูปที่ ก.4 ผลกระทบต่อเอ็กเซอร์จีไหลเข้า เอ็กเซอร์จีไหลออก เอ็กเซอร์จีสูญเสีย
ที่อุณหภูมิลมร้อน 75°C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s



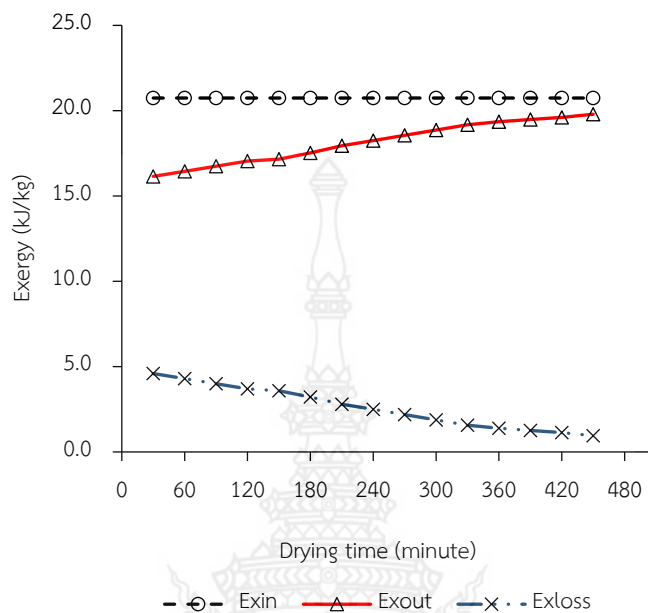
รูปที่ ก.5 ผลกระทบต่อเอ็กเซอร์จีไหลเข้า เอ็กเซอร์จีไหลออก เอ็กเซอร์จีสูญเสีย
ที่อุณหภูมิร้อน 75°C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s



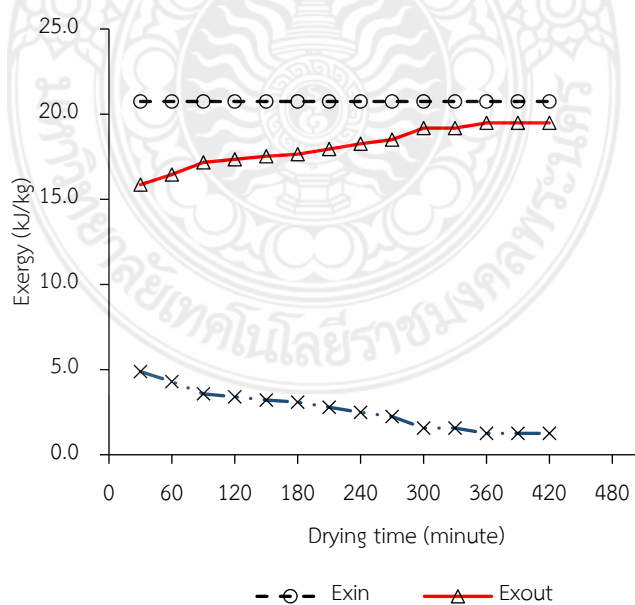
รูปที่ ก.6 ผลกระทบต่อเอ็กเซอร์จีไหลเข้า เอ็กเซอร์จีไหลออก เอ็กเซอร์จีสูญเสีย
ที่อุณหภูมิร้อน 75°C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s



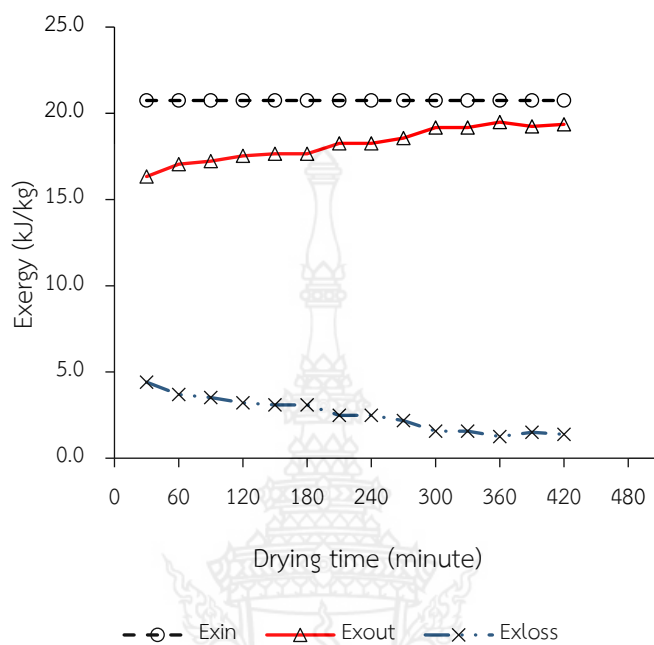
รูปที่ ก.7 ผลกระทบต่อเอ็กเซอร์จีไหลเข้า เอ็กเซอร์จีไหลออก เอ็กเซอร์จีสูญเสีย
ที่อุณหภูมิร้อน 80°C ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s



รูปที่ ก.8 ผลกระทบต่อเอ็กเซอร์จีไหลเข้า เอ็กเซอร์จีไหลออก เอ็กเซอร์จีสูญเสีย
ที่อุณหภูมิร้อน 80°C ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s



รูปที่ ก.9 ผลกระทบต่อเอ็กเซอร์จีไหลเข้า เอ็กเซอร์จีไหลออก เอ็กเซอร์จีสูญเสีย
ที่อุณหภูมิร้อน 80°C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s





ภาคผนวก ข

บทความตีพิมพ์เผยแพร่และใบรับรองการนำเสนอ

1.การศึกษาการลดความชื้นดีปลีและวิเคราะห์การใช้พลังงานด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด
การประชุมวิชาการระดับชาติราชชมงคลสุรินทร์ ครั้งที่ 14 “วิจัยและนวัตกรรมเพื่อเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน” ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ ระหว่างวันที่ 23-24 พฤศจิกายน 2566





รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ
Conference Proceedings
The 14th Rajamangala Surin National Conference

การประชุมวิชาการระดับชาติราชมงคลสุรินทร์ ครั้งที่ **14**
"วิจัยและนวัตกรรม เพื่อเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน" + + +
 ระหว่างวันที่ 23-24 พฤศจิกายน 2566
 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์





@R.MUTI SURIN

การประชุมวิชาการระดับชาติราชภัฏสงขลา ครั้งที่ 14
 “วิจัยและนวัตกรรมเพื่อเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน” ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์



211CORL2	ศึกษาการใช้อากาศยานไร้คนขับ(Drone) ในงานตรวจสอบอาคาร วสันต์ ประไพ เสรีย์ ตู๊ประกาย ชัยวัฒน์ ภูวกรกุลชัย อีรเดช สอนทองทวีพร และมงคล รัชชะ	B249
223AORL2	การพัฒนาเครื่องกะเทาะเนื้อในเมล็ดยางพาราเพื่อทำอาหารผสมครบส่วนหมัก ณรงค์ หุชัยภูมิ นิรุต อ่อนสูง บัญชา ลำเลิศ และ เขตพงศ์ อินทรชัยศรี	B259
253CORL2	การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการแตกตัวของท่อประธานของการประปานครหลวง เดชพล ทองคำ ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลิ และสรวิศ สุกเวชัย	B271
255CORL2	เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อัตโนมัติสำหรับหน่วยฝึกทหาร ณัฐกุล ไทยโกษา ปริญญญา ปันคล้าย และธรรบ อักษร	B285
257AORL2	การพัฒนาเครื่องคัดแยกเมล็ดพันธุ์ข้าวเพื่อผลิตพันธุ์ข้าวชุมชน ณรงค์ หุชัยภูมิ นิรุต อ่อนสูง บัญชา ลำเลิศ และคุณานันต์ ศักดิ์กำบัง	B294
267AORL2	ภาพนามธรรมข้อมูล กรณีศึกษา ผลิตภัณฑ์วิสาหกิจชุมชนและวิสาหกิจขนาดกลางและขนาด ย่อมกลุ่มจังหวัดอีสานล่าง 1 (นครชัยบุรีรินทร์) ภาควณิ หนีเงิน	B302
270AORS2	การศึกษาการอบแห้งใบกระเทียมด้วยการพาความร้อน คมเพชร อินลา อภิชาติ ยิ่งรุ่งโรจน์ อภิวัฒน์ เพชรวงษ์ วิวัฒน์ อภิลิทธิภิญโญ อธิพิณ วรพันธ์ นิติศักดิ์ หนูมาน้อย และรัตนันท์ เหลือมพล	B311
272CORL2	การศึกษาการลดความชื้นดีเอสและวิเคราะห์การใช้พลังงานด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด พิสิฐ ช่อลมกรต ปวิวัติ คมวชิรกุล พลกฤษณ์ คุ้มกล้า และศิริพล ทองอ่อน	B321
273CORS2	อิทธิพลของจำนวนขดเกลียวที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้ง แบบพาหะลมที่มีท่ออบแห้งแบบเกลียว นันทุช อนุพันธ์ นิติศักดิ์ หนูมาน้อย รัตนันท์ เหลือมพล อธิพิณ วรพันธ์ บัณฑิต กฤดาคม ปวิวัติ วรามิตร และรพีพงษ์ เปี่ยมสุวรรณ	B329
287BORS2	การสร้างมูลค่าเพิ่มไข่กกระทาด้วยการดองเค็มระบบสุญญากาศ ชัยรัตน์ หงษ์ทอง ธวัชชัย คำแดง อภิรมย์ ชูเมฆา และ เรวัต ช่อมสุข	B338
295AORS2	การเพิ่มสมรรถนะการอบแห้งเส้นก๋วยเตี๋ยวด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อน ประพันธ์พงษ์ สมศิลา วินัย บุญมนัส ธนกร หอมจำปา ประทีป ตุ่มทอง อำไพศักดิ์ ที่บุญมา	B346
300AORS2	การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมการฆ่าเชื้อ E.coli ในน้ำด้วยไฮโดรไดนามิกส์ควาเวชั่น โดยใช้วิธี พื้นผิวตอบสนองแบบ Box Behnken ธนภฤต นนทชนะ อธิพิณ วรพันธ์	B357
312AORS2	การสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมโดยเครื่องอัดสกรูเดียว จริญ มงคลวัย สมพร หงษ์กง เขตพงศ์ อินทรชัยศรี และศรายุทธ พลสีลา	B369
321CORL2	ปัจจัยที่มีผลต่อการปฏิบัติตามกฎหมายของบั้งจันชนิดเคลื่อนที่ตามกฎหมายกระทรวงกำหนด มาตรฐานในการบริหารและจัดการด้านความปลอดภัยอาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมใน การทำงานเกี่ยวกับเครื่องจักรบั้งจัน หม่อน้ำ พ.ศ. 2564 ในเขตพื้นที่ จังหวัดระยอง พงษ์ศักดิ์ คุ้มวงษ์ อีรเดช สอนทองทวีพร วรณนธ์ คงสง และชัยวัฒน์ ภูวกรกุลชัย	B376

การศึกษาการลดความชื้นดิบและวิเคราะห์การใช้พลังงานด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด Study of dehydration and energy utilization analysis of long pepper using tray dryer

พิสิฐ ชองลมกรต^{1*}, ปฏิวดี คมวชิรกุล¹, พลกฤษณ์ คุ่มเกล้า² และ ศิริพล ทองอ่อน¹
 Pisit Chonglomgrod^{1*}, Patiwat Khomwachirakul¹, Ponlakrit Kumklam²
 and Siripol Tongorn¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร

²สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร

*Corresponding Author E-mail Address : ch.pisit@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความเร็วอากาศอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น และอัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ของการอบแห้งดิบลิ้นเครื่องอบแห้งแบบถาด เงื่อนไขการทดลองใช้อุณหภูมิอบแห้ง 70, 75 และ 80 °C และความเร็วอากาศอบแห้ง 0.5, 0.7 และ 1 m/s การวิเคราะห์อัตราส่วนใช้ประโยชน์อาศัยกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ ผลจากการทดลองพบว่า การอบแห้งดิบลิ้นที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 °C ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s ทำให้ความชื้นลดลงได้เร็วกว่าการอบแห้งที่เงื่อนไขอื่นๆ การลดลงของความชื้นสูงสุดอยู่ในช่วง 360 นาทีแรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นความชื้นจะลดลงอย่างช้าๆ ค่าอัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์สูงสุดเท่ากับ 5.9 -6.9 ในช่วง 80-210 นาทีของการอบแห้ง การเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งมีผลให้ค่าอัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ลดลง ความเร็วอากาศอบแห้งไม่มีผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ จากการวิเคราะห์พลังงานสามารถนำผลที่ได้ไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการอบแห้งดิบลิ้นให้มีประสิทธิภาพสูงสุดต่อไป

คำสำคัญ: อบแห้ง เครื่องอบลมร้อน ดิบลิ้น พลังงานใช้ประโยชน์

Abstract

The objective of this research is to study the effects of drying air temperature and drying air velocity to change of the moisture content and the energy utilization ratio of long pepper drying in tray dryer, the drying air temperature of 70, 75 and 80 °C and drying air velocity of 0.5, 0.7, 1 m/s is the drying condition of this research. The energy utilization ratio was analyzed based on the first law of thermodynamic. The results showed that drying long pepper at drying air temperature of 80 °C and drying air velocity of 1 m/s resulted the moisture content decreased faster than under others drying conditions. The moisture content was mostly decreased at the first 360 minutes of drying period after that the moisture content was slowly decreased. The highest energy utilization ratio was 5.9- 6.9 at 80 – 210 minutes of drying period. Increasing of drying air temperature resulted the decreasing energy utilization ratio, the drying air velocity was not effected to the energy utilization ratio. From energy analysis, the result can be used for improving the drying long pepper process to maximum efficiency

Keywords: Drying, Hot air dryer, Long pepper, Energy utilization

บทนำ

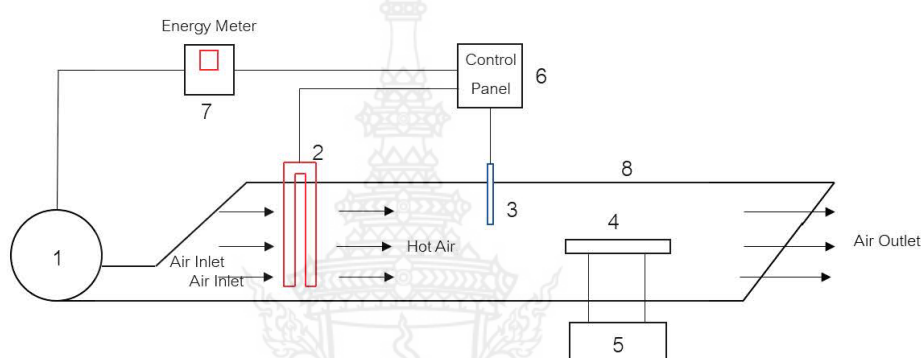
ติปปี (Long pepper) ชื่อวิทยาศาสตร์ Piper Retrofractum Vahl ในประเทศไทยติปปีเป็นพืชสมุนไพรที่นิยมปลูกใช้แทนเครื่องเทศ เช่น พริก หรือ พริกไทย เนื่องจากมีความเผ็ดร้อนคล้ายกัน สรรพคุณของติปปีในด้านการใช้เป็นยาสมุนไพรช่วยขับลม ลดอาการไอ ระคายเคืองจากเสมหะ ลดอาการท้องอืดท้องเฟ้อ แก้อาการท้องเสีย อาเจียน เป็นต้น การเพาะปลูกติปปีสามารถให้ผลผลิตได้ตลอดทั้งปี หลังจากปลูกประมาณ 6 เดือน ถึง 1 ปี สามารถเก็บผลผลิตได้ โดยสามารถเก็บผลผลิตได้ตลอดปี และเมื่อนำผลติปปีมาตากแห้งนั้นสามารถนำมาขายได้ อย่างไรก็ตามหลังการเก็บเกี่ยว ผลผลิตยังคงมีความชื้นสูง ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายจากการเก็บรักษาและขนส่ง ปกติเกษตรกรมักจะนำไปตากแดดตามธรรมชาติ แต่มีข้อจำกัดในเรื่องฤดูกาลที่มีความชื้นอากาศสูง รวมไปถึงการควบคุมความสะอาด เพื่อความสะดวกและป้องกันความเสียหายในกระบวนการเก็บรักษา การอบแห้ง (Drying) จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับลดความชื้นติปปี การอบแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ที่มีเป้าหมายเพื่อคงความชื้นที่อยู่มากในวัสดุออกสู่ภายนอกโดยอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนซึ่งต้องใช้พลังงานจากภายนอก ซึ่งการอบแห้งเป็นกระบวนการทางด้านเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว ที่มีความสำคัญยิ่งต่อการรักษาคุณภาพลดความสูญเสีย และยืดอายุการเก็บรักษาสินผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์แปรรูปทางการเกษตรมีมูลค่าเพิ่มมากขึ้น การอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เพราะสามารถทำการลดความชื้นให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว โดย (Castro et al., 2018) วิเคราะห์เอกเซอร์จีของการอบแห้งหัวหอมของเครื่องอบแห้งสายพาน การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลอากาศเป็นการเพิ่มเอกเซอร์จีเข้าห้องอบแห้ง การเพิ่มประสิทธิภาพเอกเซอร์จีทำได้โดยการเพิ่มอัตราการไหลอากาศ ในขณะที่เดียวกันอัตราการไหลอากาศที่สูงเกินไปจะส่งผลให้ระบบมีการสูญเสียความร้อนเพิ่มขึ้น (Yogendrasasidhar and Setty, 2018) ทดลองอบแห้งเมล็ดข้าวฟ่างด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไบรด์ พบว่าเอกเซอร์จีสูญเสียเกิดจากปัจจัยด้านอุณหภูมิอากาศอบแห้ง อัตราการไหลอากาศ ความหนาเบต และความชื้นเริ่มต้นตัวอย่างอบแห้ง นอกจากนี้ค่าเอกเซอร์จีลดลงเมื่ออัตราการไหลอากาศและระยะเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพเอกเซอร์จีเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง อัตราการไหลอากาศ และระยะเวลาการอบแห้ง ในขณะที่การเพิ่มความหนาเบตและความชื้นเริ่มต้นตัวอย่างอบแห้งมีผลให้ประสิทธิภาพเอกเซอร์จีลดลง มีบทความวิจัยหลากหลายที่ทำการศึกษาวเคราะห์ประสิทธิภาพเอกเซอร์จีของการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร เช่น พริกไทย (Akpınar, 2019) แป้งมันสำปะหลัง (Aviara et al., 2014) กระเจี๊ยบ (Okunola et al., 2021) มันฝรั่ง (Arepally et al., 2017) วอลนัต (Chen et al., 2020) และ มันหวาน (Kolaric et al., 2020) ผลจากการศึกษาจากบทความเหล่านี้พบว่า ค่าดัชนีความยั่งยืนด้านการผลิตเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกับค่าประสิทธิภาพเอกเซอร์จี เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรโดยทั่วไปได้ (Benhamza et al., 2021; Zalazar-Garcia et al., 2022) จากข้อดีของเครื่องอบแห้งแบบถาด หากนำมาใช้ในการอบแห้งติปปี น่าจะเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อการลดความชื้นของการอบแห้งติปปี โดยคาดว่าข้อมูลดังกล่าวนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการออกแบบกระบวนการอบแห้งติปปีด้วยลมร้อนสำหรับเกษตรกรได้ในอนาคต

ทฤษฎี อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. เครื่องอบแห้ง

รูปที่ 1 แสดงแผนผังเครื่องอบแห้งลมร้อนที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ 1.) พัดลม (Blower) ทำหน้าที่ป้อนอากาศเข้าสู่ระบบเพื่อเป็นตัวกลางในการพาความร้อน ซึ่งสามารถปรับความเร็วรอบเพื่อเพิ่มลดปริมาณลมโดยใช้อินเวอร์เตอร์ 2.) ชุดทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (Electric Heater) ขนาด 3.5 kW 220 V/3Ph/50Hz ทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศที่ใช้

ในการอบแห้ง 3.) เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งทำหน้าที่ส่งค่าอุณหภูมิที่วัดได้ไปที่ชุดควบคุมอุณหภูมิ 4.) ชั้นวางถาดที่ใช้ใส่วัสดุที่ใช้ในการอบแห้งขนาด 200x200x50 mm. 5.) เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล ซึ่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการอบ 6.) ชุดควบคุมและทำงานโดยอาศัยอุณหภูมิอบแห้ง (Drying Temperature) ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากชุดทำความร้อนที่วัดได้จากตำแหน่งหมายเลข 3 เพื่อควบคุมการทำงานของชุดทำความร้อน 7.) ชุดวัดการใช้พลังงานไฟฟ้า (Energy Meter) ใช้วัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งด้วยลมร้อน 8.) ห้องอบแห้ง (Drying Chamber) ขนาดพื้นที่หน้าตัด 240x210 cm. ซึ่งห้องอบแห้งทำการหุ้มฉนวนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน



รูปที่ 1 แสดงแผนผังเครื่องอบแห้งลมร้อนที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ใช้ตีสปีลมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 240 - 250 % (d.b.) ขนาดความยาวเฉลี่ย 45 mm และเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 7 mm เป็นวัสดุในการทดลอง ก่อนทำการทดลองจะนำตีสปีลสะอาดมวล 0.5 kg มาพักไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที โดยขั้นตอนการทดลองในขั้นแรกทำการเปิดสวิตช์เดินเครื่องพัดลมก่อนเพื่อป้องกันชุดทำความร้อนขาด ต่อไปเปิดสวิตช์ชุดทำความร้อนปรับค่าจนได้อุณหภูมิอบแห้งตามต้องการ เดินเครื่องอบแห้งประมาณ 5 นาที จนเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) หลังจากนั้นทำการนำตีสปีล มวล 0.5 kg ใส่เข้าสู่เครื่องอบแห้ง และทำการอบตามเงื่อนไขที่กำหนด ระหว่างการทดลองจะทำการจดบันทึกน้ำหนักของตีสปีลทุก 30 นาทีเพื่อนำมาคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงความชื้น จนกระทั่งความชื้นของตีสปีลไม่เปลี่ยนแปลง ในการทดลองใช้อุณหภูมิอบแห้ง 3 ค่า คือ 70 75 และ 80 °C โดยทดลองที่ความเร็วลม 3 ค่า 0.5 0.7 และ 1 m/s ทำการวัดและจดบันทึกอุณหภูมิและความชื้นลมร้อนทางเข้าก่อนการอบแห้ง และทางออกหลังการอบแห้ง หลังจากนั้นการหาค่าความชื้นสุดท้าย ทำโดยการนำตีสปีลไปอบที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง (AACC., 1995) โดยอุณหภูมิอ้างอิงการทดลองนี้ใช้ 30 °C

2. การหาความชื้นในวัสดุ

ความชื้นในวัสดุนั้นเป็นค่าความชื้นที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่อยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับวัสดุที่ขึ้นหรือแห้ง การวัดความชื้นในวัสดุสามารถที่จะวัดได้สองแบบคือ ความชื้นมาตรฐานเปียก นิยมใช้กับองค์การค้าโดยอ้างอิงในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ และความชื้นมาตรฐานแห้ง นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งในทางทฤษฎีเนื่องจากช่วยในการคำนวณที่สะดวกเพราะมวลของวัตถุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ในระหว่างการอบแห้งซึ่งที่ว่าเกือบคงที่นี้เป็นเพราะผลผลิตทางเกษตรมีความชื้นสูงซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการ

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

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

โดยที่ M_{db} = ความชื้นมาตรฐานแห้ง (% d.b.)

M_{wb} = ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)

w = มวลของวัสดุชิ้น (kg)

d = มวลของวัสดุแห้ง (kg)

สำหรับความสัมพันธ์ของความชื้นมาตรฐานเปียกและความชื้นมาตรฐานแห้ง เป็นไปตามสมการ

$$M_{wb} = \frac{M_{db}}{1 + M_{db}} \quad (3)$$

3. การวิเคราะห์พลังงาน

การวิเคราะห์พลังงานจากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ ในกระบวนการอบแห้งเกี่ยวข้องกับกระบวนการทำความร้อน กระบวนการทำความเย็น และกระบวนการลดความชื้น ซึ่งกระบวนการเหล่านี้สามารถพิจารณาให้เป็นกระบวนการไหลแบบ สภาวะคงตัว และทำการวิเคราะห์โดยการประยุกต์ใช้กฎการอนุรักษ์มวล (สำหรับอากาศแห้งและความชื้น) และหลักการ อนุรักษ์พลังงาน สมการทั่วไปของการอนุรักษ์มวลของอากาศแห้ง (ไม่มีความชื้น) ดังสมการต่อไปนี้ (Cengel Y.A. and Boles M.A., 2011)

$$\sum \dot{m}_{ai} = \sum \dot{m}_{ao} \quad (4)$$

โดยที่ $\dot{m}_{ai}$ (kg/s) คืออัตราการไหลของมวลอากาศทางเข้า และ $\dot{m}_{ao}$ (kg/s) คืออัตราการไหลของมวลอากาศทาง ออกของ กระบวนการอบแห้ง จากสมการที่ (4) สำหรับอากาศที่แห้ง (ไม่มีความชื้น) แต่สำหรับในกระบวนการอบแห้งด้วยกระบวนการ พาคความร้อนโดยทั่วไปนั้นจะมีความชื้นภายในวัสดุระเหยผสมกับลมร้อนที่ไหลผ่านกระบวนการอบแห้ง ดังนั้นสามารถอธิบาย ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\sum (\dot{m}_{wi} + \dot{m}_{mp}) = \sum \dot{m}_{wo} \quad \text{หรือ} \quad \sum (\dot{m}_{ai} w_i + \dot{m}_{mp}) = \sum \dot{m}_{ao} w_o \quad (5)$$

โดยที่ $\dot{m}_{wi}$ และ $\dot{m}_{wo}$ คืออัตราการไหลของมวลความชื้นของอากาศทางเข้าและทางออกของกระบวนการอบแห้ง

ตามลำดับ $\dot{m}_{mp}$ คืออัตราการไหลของมวลความชื้นที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ w_i และ w_o คืออัตราส่วนความชื้นความชื้นที่ ไหลเข้าและทางออกของกระบวนการอบแห้ง (g/kg)

สำหรับการวิเคราะห์พลังงานนั้นจะมีการวิเคราะห์อยู่ 2 ส่วน คือ ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ (Energy Utilization : EU, kW.) ได้จากสมการต่อไปนี้

$$EU = m(h_i - h_o) \quad (6)$$

เมื่อ m (kg/s) คืออัตราการไหลเชิงมวล ส่วน h_i คือเอนทัลปีขาเข้าและ h_o คือเอนทัลปีขาออก (kJ/kg) และในการ วิเคราะห์พลังงานส่วนที่ 2 จะพิจารณาค่าอัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ (Energy Utilization Ratio : EUR, %) สามารถ คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

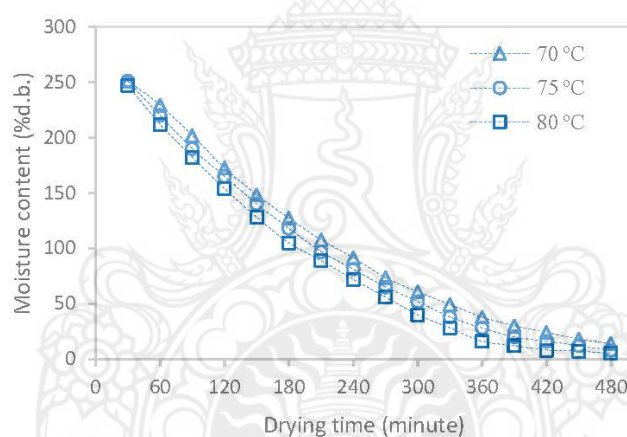
$$EUR = \left(\frac{h_i - h_o}{h_i} \right) \times 100 \quad (7)$$

โดยเอนทัลปีขาเข้าหาได้จากสมการ
$$h_i = mc_p T_i \quad (8)$$

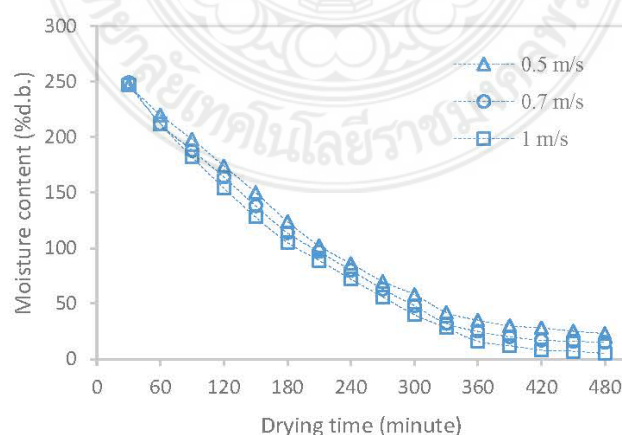
และเอนทัลปีขาออกหาได้จากสมการ
$$h_o = (mc_p T_o) + (wh_{fg}) \quad (9)$$

เมื่อ m (kg/s) คืออัตราการไหลเชิงมวล ส่วน h_i (kJ/kg) คือเอนทัลปีขาเข้าและ h_o (kJ/kg) คือเอนทัลปีขาออก ส่วน h_{fg} (kJ/kg) คือความร้อนแฝงของการระเหย (latent heat of vaporization) C_p (kJ/kg-°C) คือค่าความจุความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิใดๆ T (°C) คืออุณหภูมิใดๆ

ผลการทดลอง



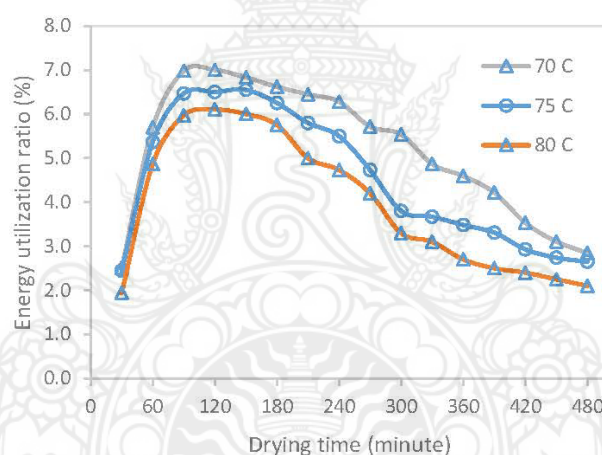
รูปที่ 2 ผลกระทบของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่อการลดความชื้นดิบลิ ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s



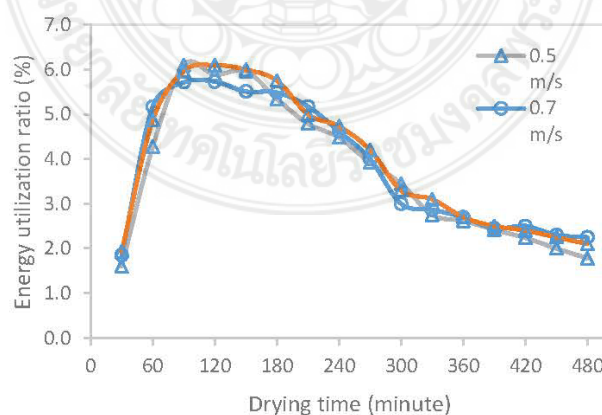
รูปที่ 3 ผลกระทบของความเร็วอากาศอบแห้งต่อการลดความชื้นดิบลิ ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 °C

ผลกระทบของอุณหภูมิอบแห้งต่อการลดความชื้นแสดงในรูปที่ 2 อัตราการอบแห้งคงที่ในช่วงเวลา 360 นาทีแรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นอัตราการอบแห้งจึงเริ่มลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งความชื้นที่ลดลงได้มากขึ้น อุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้นความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศอบแห้งกับอุณหภูมิที่ผิวตึปลีจึงเพิ่มขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการระเหยน้ำจึงมากขึ้นตามไปด้วย (Bootkote et al., 2016)

ผลกระทบของความเร็วอากาศอบแห้งต่อการลดความชื้นแสดงในรูปที่ 3 การเพิ่มความเร็วอากาศอบแห้งทำให้มวลอากาศร้อนที่ไหลผ่านห้องอบแห้งเพิ่มขึ้น การระเหยของน้ำจึงเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งเท่ากัน ความเร็วอากาศอบแห้งสูงจึงมีผลให้ความชื้นที่ลดลงได้มากกว่าที่ความเร็วอากาศอบแห้งต่ำ (Ndukwu, 2009) เมื่อพิจารณารูปที่ 2 และ 3 พบว่าความชื้นที่ลดลงได้รวดเร็วในช่วงเวลา 360 นาทีแรก หลังจากนั้น ความชื้นจึงลดลงอย่างช้าๆ เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากปริมาณน้ำที่อยู่ภายในตึปลีเริ่มน้อยลงและส่วนใหญ่จะอยู่ด้านในเนื้อตึปลี ระยะเวลาที่ใช้สำหรับการแพร่ของน้ำจากภายในออกสู่ผิวด้านนอกจึงเพิ่มขึ้น (Potapov and Yakushenko, 2013)



รูปที่ 4 ผลกระทบของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่ออัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s



รูปที่ 5 ผลกระทบของความเร็วอากาศอบแห้งต่ออัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 °C

อุณหภูมิอากาศอบแห้งมีผลกระทบต่ออัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์อย่างมีนัยสำคัญ แสดงดังรูปที่ 4 เมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งเพิ่มขึ้นอัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการระเหยของน้ำเพิ่มขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อค่าประสิทธิภาพการอบแห้ง รูปที่ 5 แสดงผลกระทบของความเร็วอากาศอบแห้งต่ออัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 °C จะเห็นได้ว่า ความเร็วอากาศอบแห้งไม่มีผลต่ออัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ แม้การเพิ่มความเร็วอากาศอบแห้งจะทำให้มวลอากาศไหลผ่านห้องอบแห้งเพิ่มขึ้น แต่อัตราการระเหยน้ำที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ทำให้การเพิ่มความเร็วอากาศอบแห้งไม่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ เมื่อพิจารณารูปที่ 4 และ 5 จะเห็นว่าค่าอัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ค่อนข้างต่ำที่เวลาการอบแห้ง 90 นาทีแรก เนื่องจากในช่วง แรกของการอบแห้ง อุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม การอบแห้งช่วงแรก ความร้อนส่วนหนึ่งจึงถ่ายเทเข้าไปยังเนื้อดิบลิ อีกทั้งเปลือกของดิบลิที่แห้งและหนา ทำให้ความต้านทานการอบแห้งมีค่ามาก น้ำจึงใช้ระยะเวลาในการแพร่ ด้วยปัจจัยดังกล่าว จึงมีผลให้อัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ของการอบแห้งในช่วงแรกมีค่าที่ต่ำ ค่าอัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์สูงสุดมีค่าเท่ากับ 5.9-6.9 ที่เวลา 80-210 นาที ของการอบแห้ง หลังจากนั้นลดลงตามอัตราการอบแห้งที่ลดลง

สรุปผลและเสนอแนะ

งานวิจัยนี้จากการทดลองใช้ดิบลิมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 240 -250 % (d.b.) เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความเร็วอากาศอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของการอบแห้ง ในเครื่องอบแห้งแบบถาด เงื่อนไขการทดลองใช้อุณหภูมิอบแห้ง 70, 75 และ 80 °C และความเร็วอากาศอบแห้ง 0.5, 0.7 และ 1 m/s อุณหภูมิอากาศแวดล้อมเท่ากับ 30 °C พบว่าการอบแห้งดิบลิที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 °C ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 m/s ทำให้ความชื้นลดลงได้เร็วกว่าการอบแห้งที่เงื่อนไขอื่นๆ ความชื้นลดลงได้ดีในช่วง 360 นาทีแรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นความชื้นจะลดลงอย่างช้าๆ ค่าอัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์สูงสุดอยู่ระหว่าง 5.9 -6.9 ในช่วง 80-210 นาที ของการอบแห้ง อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงมีผลให้อัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ลดลง ความเร็วอากาศอบแห้งไม่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์

เอกสารอ้างอิง

- AACC., Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists. (1995). 9th Edition. St. Paul: American Association of Cereal.
- Akpinar E.K. (2019). The effects of some exergetic indicators on the performances of thinlayer drying process of long green pepper in a solar dryer. Heat Mass Tran. 55(2): 299–308.
- Arepally D., Ravula S.R., Malik K.G. and Kamidi V. (2017). Mathematical modelling. energy and exergy analysis of tomato slices in a mixed-mode natural convection solar dryer. Chem. Sci. Int. J. 20(4): 1–11.
- Aviara N.A., Onuoha L.N., Falola O.E. and Igbeka J.C. (2014). Energy and exergy analyses of native cassava starch drying in a tray dryer. Energy. 73 (9), 809–817.
- Benhamza A., Boubekri A., Atia A., Ferouali H.E., Hadibi T., Arici M. and Abdenouri N. (2021). Multi-objective optimization of solar air heater for food drying based on energy. Exergy and improvement potential. Renew. Energy 169: 1190–1209

- Bootkote P., Soponronnarit S. and Prachayawarakorn S. (2016). Process of producing parboiled rice with different colors by fluidized bed drying technique including tempering. *Food bioprocess technology* 2016. 9: 1574–1586.
- Castro M., Roman C., Echegaray M., Mazza G. and Rodriguez R. (2018). Exergy analyses of onion drying by convection: influence of dryer parameters on performance. *Entropy* 20 (5): 310.
- Cengel Y.A. and Boles M.A. (2011) *Thermodynamics: an engineering approach*. 7th Edition. McGraw-hill International Enterprises
- Chen C., Weipeng Z., Venkitasamy C., Khir R., McHugh T. and Pan Z. (2020). Walnut structure and its influence on the hydration and drying characteristics. *Dry. Technol.* 38 (8): 975–986.
- Kolaric L., Minarovicov L., Laukov M., Karovicov J. and Kohajdov Z. (2020). Pasta noodles enriched with sweet potato starch: impact on quality parameters and resistant starch content. *J. Texture Stud.* 51 (3): 464–474
- Ndukwu M.C. (2009). Effect of drying temperature and drying air velocity on the drying rate and drying constant of cocoa bean. *Agricultural engineering international. The CIGR Ejournal* 2009 (6).
- Okunola A.A., Adekanye T.A. and Idahosa E. (2021). Energy and exergy analyses of the okra drying process in a forced convection cabinet dryer. *Res. Agric. Eng.* 67 (1): 8–16.
- Potapov V. and Yakushenko E. (2013). Modeling of the drying process with pre-heating. *Journal of industrial technology and engineering.* 2(07): 10 – 16.
- Yogendrasasidhar D. and Setty Y.P. (2018). Drying kinetics. Exergy and energy analyses of kodo millet grains and fenugreek seeds using wall heated fluidized bed dryer. *Energy* 151(2018): 799–811
- Zalazar-Garcia D., Roman C.M., Fernandez A., Asensio D., Zhang X., Fabani M.P., Rodriguez R. and Mazza G. (2022). Exergy, energy and sustainability assessments applied to RSM optimization of integrated convective air-drying with pretreatments to improve the nutritional quality of pumpkin seeds. *Sustain. Energy technol. Assessments* 49 (101763).

2. การวิเคราะห์พลังงานใช้ประโยชน์และประสิทธิภาพเอกเซอร์จีของการอบแห้งดีปลีด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด วิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม การประชุมวิชาการระดับชาตินานาชาติ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ประจำปี 2566 ครั้งที่ 2 หัวข้อ “นวัตกรรมและเทคโนโลยีทางสังคมเพื่อการพัฒนาเชิงพื้นที่สู่การพัฒนาท้องถิ่นอย่างยั่งยืน” ณ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ระหว่างวันที่ 17-19 ธันวาคม 2566

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ขอมอบเกียรติบัตรฉบับนี้ให้ไว้เพื่อแสดงว่า

**พิสิฐ ช่องลมกรด* ปฏิวัติ คมวชิรกุล,
ศิริพล ทองอ่อน และ พลกฤษณ์ คุ้มกล้า**

ได้นำเสนอผลงานวิจัยแบบบรรยาย
เรื่อง “การวิเคราะห์พลังงานใช้ประโยชน์และประสิทธิภาพเอกเซอร์จี
ของการอบแห้งดีปลีด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด”

ในการประชุมวิชาการระดับชาตินานาชาติ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ประจำปี 2566 ครั้งที่ 2 หัวข้อ “นวัตกรรมสังคมและเทคโนโลยี
การพัฒนาเชิงพื้นที่ เพื่อการพัฒนาชุมชนที่ยั่งยืน
ระหว่างวันที่ 17-19 ธันวาคม พ.ศ. 2566
ณ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ จังหวัดกาฬสินธุ์

(รองศาสตราจารย์จรินทร์ ห้วยแสน)
อธิการบดีมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

KSUC^{2nd} SINTECH
Social Innovation and Technology for Area Based Development for
Sustainable Community Development: SINtech 2023 for ADSCD

สารบัญ

	หน้า
สารจากนายกสภามหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์	i
สารจากอธิการบดีมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์	ii
กำหนดการจัดงานการประชุมวิชาการระดับชาตินานาชาติมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ครั้งที่ 2 ประจำปี 2566	iii
การนำเสนอผลงานวิจัยภาคบรรยาย	vi
การนำเสนอผลงานวิจัยภาคโปสเตอร์	xxvi
สารบัญ	xxviii
ภาคบรรยาย	
กลุ่ม 1 : วิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม	
KSUC-O-001 การศึกษาลานอัดแท่งจากกากมะพร้าว สุรศักดิ์ ใจดี	1
KSUC-O-002 การประยุกต์ใช้เทคนิคโคเซ็นเพื่อลดเวลากระบวนการปรับตั้งเครื่องจักรสำหรับการผลิตนอตตัวเมีย วรัญญู ทิพย์โพธิ์	9
KSUC-O-003 การพัฒนาต้นแบบตู้เพาะชำและดูแลต้นกล้าผักแบบอัตโนมัติ วิวรรณรัตน์ สารมาตย์	17
KSUC-O-004 การศึกษาอุณหภูมิผิวจราจรในสภาพแวดล้อมใช้งานจริงที่มีอิทธิพลต่อค่าความผิดของผิวทาง แอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อเป็นแนวทางรองรับงานบำรุงทางในอนาคต ภัทรพล สีดอกบวบ	31
KSUC-O-005 การศึกษาการพิจารณาใช้ค่าดัชนีความผิดสากล (International Friction Index, IFI) ของผิวทาง แอสฟัลต์คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมช่วงฤดูฝนเพื่อเป็นแนวทางรองรับงานบำรุงทางพัฒนาโครงข่าย ถนนที่เหมาะสมสำหรับทางหลวง ภัทรพล สีดอกบวบ	41
KSUC-O-006 การศึกษาการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนการสะท้อนแสงบนผิวทางสำหรับหลอดไฟประเภท High Pressure Sodium (HPS) เพื่อพัฒนางานทางที่เหมาะสมสำหรับทางหลวง ภัทรพล สีดอกบวบ	50
KSUC-O-007 การพัฒนาเครื่องกวนขนมเปียกปูนสำหรับชุมชน สมพล มะสีกะ	61
KSUC-O-008 การวิเคราะห์พลังงานใช้ประโยชน์และประสิทธิภาพเอกเซอร์จีของการอบแห้งดิบลิด้วยเครื่อง อบแห้งแบบถาด พิสิฐ ช่อลมกรด	70
กลุ่ม 2 : วิทยาศาสตร์สุขภาพและเทคโนโลยีสุขภาพ	
KSUC-O-009 การประเมินคุณภาพน้ำทิ้งของโรงไฟฟ้าประเภทเผาไหม้เชื้อเพลิง จักรพันธ์ เมณท์กุล	81

KSUC-O-008

การวิเคราะห์พลังงานใช้ประโยชน์และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีของการอบแห้งดีปลีด้วย เครื่องอบแห้งแบบถาด

Energy utilization and exergy efficiency analysis of long pepper drying with tray dryer

พิสิฐ ช่อกลมกรุด^{1*} ปฏิวดี คมวชิรกุล¹ ศิริพล ทองอ่อน¹ และ พลกฤษณ์ คุ้มกล้า²

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร¹

สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร²

*Corresponding author: ch.pisit@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความเร็วอากาศอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นอัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ และเอ็กเซอร์จีของการอบแห้งดีปลีในเครื่องอบแห้งแบบถาด เงื่อนไขการทดลองใช้อุณหภูมิอบแห้ง 70 75 และ 80 องศาเซลเซียส และความเร็วอากาศอบแห้ง 0.5 0.7 และ 1 เมตร/วินาที การวิเคราะห์อัตราส่วนใช้ประโยชน์อาศัยกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ และประยุกต์ใช้กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้า เอ็กเซอร์จีที่ไหลออก เอ็กเซอร์จีสูญเสีย และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้ง ผลจากการทดลองพบว่า การอบแห้งดีปลีที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 เมตร/วินาที ทำให้ความชื้นลดลงได้เร็วกว่าการอบแห้งที่เงื่อนไขอื่น ๆ การลดลงของความชื้นสูงสุดอยู่ในช่วง 360 นาทีแรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นความชื้นจะลดลงอย่างช้า ๆ ค่าอัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์สูงสุดเท่ากับ 5.9 -6.9 ในช่วง 80-210 นาทีของการอบแห้ง การเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งมีผลให้ค่าอัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ลดลง ความเร็วอากาศอบแห้งไม่มีผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ การเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งมีผลให้ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีลดลง ความเร็วอากาศอบแห้งไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีและเอ็กเซอร์จีสูญเสีย

คำสำคัญ: เครื่องอบลมร้อน, ดีปลี, พลังงานใช้ประโยชน์, ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี

Abstract

The objective of this research is to study the effects of drying air temperature and drying air velocity on the change in moisture content and the energy utilization ratio of long pepper drying in a tray dryer. The drying air temperatures of 70, 75 and 80 °C and the drying air velocities of 0.5, 0.7 and 1 m/s is the drying conditions of this research. The energy utilization ratio was analyzed based on the first law of thermodynamics. The results showed that drying long pepper at a drying air temperature of 80°C and a drying air velocity of 1 m/s resulted in the moisture content decreasing faster than under other drying conditions. The moisture content was mostly decreased at the first 360 minutes of drying period after that the moisture content was slowly decreased. The highest energy utilization ratio was 5.9- 6.9 at 80 – 210

minutes of drying period. Increasing drying air temperature resulted in a decreasing energy utilization ratio, the drying air velocity was not affected to the energy utilization ratio. The exergy efficiency was decreased with increasing drying air temperature. The drying air temperature was not affected by exergy efficiency and exergy loss.

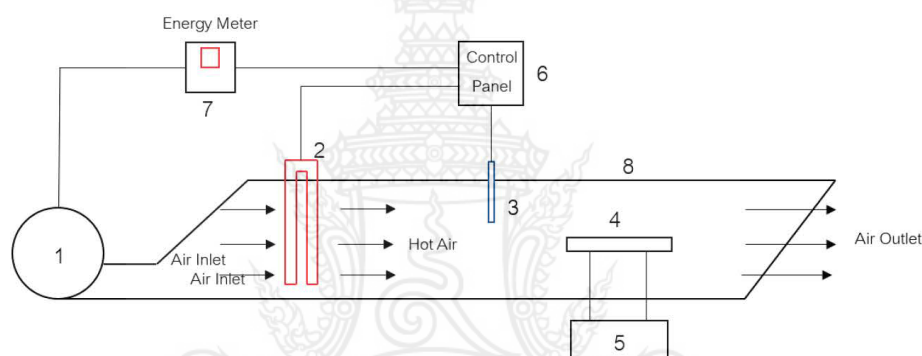
Keywords: Hot air dryer, Long pepper, Energy utilization, Exergy efficiency

บทนำ

ติปลี (Long pepper) ชื่อวิทยาศาสตร์ Piper Retrofractum Vahl ในประเทศไทยติปลีเป็นพืชสมุนไพรที่นิยมปลูกใช้แทนเครื่องเทศ เช่น พริก หรือ พริกไทย เนื่องจากมีความเผ็ดร้อนคล้ายกัน สรรพคุณของติปลีในด้านการใช้เป็นยาสมุนไพร ช่วยขับลม ลดอาการไอ ระคายคอจากเสมหะ ลดอาการท้องอืดท้องเฟ้อ แก้กลิ้นไส้ อาเจียน เป็นต้น การเพาะปลูกติปลีสามารถให้ผลผลิตได้ตลอดทั้งปี ติปลีเป็นพืชสมุนไพรที่มีความขึ้นสูง จึงทำให้เกิดความเสียหายจากการเก็บรักษาและขนส่ง ปกติเกษตรกรมักจะลดความชื้นด้วยการตากแดดตามธรรมชาติ ซึ่งวิธีดังกล่าวมีข้อจำกัดในเรื่องฤดูกาลที่มีความชื้นอากาศสูง รวมไปถึงการควบคุมความสะอาด เพื่อความสะดวกและป้องกันความเสียหายในกระบวนการเก็บรักษา การอบแห้ง (Drying) จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับลดความชื้นติปลี การอบแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ที่มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุออกสู่ภายนอกโดยอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนซึ่งต้องใช้พลังงานจากภายนอก การอบแห้งเป็นกระบวนการทางด้านเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว ที่มีความสำคัญต่อการรักษาคุณภาพลดความสูญเสีย และยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์แปรรูปทางการเกษตรมีมูลค่าเพิ่มมากขึ้น การอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เพราะสามารถทำการลดความชื้นให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว ประสิทธิภาพของระบบอบแห้งสามารถประเมินได้หลากหลายวิธี การประเมินค่าอัตราส่วนพลังงานการใช้ประโยชน์และการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย อัตราส่วนพลังงานการใช้ประโยชน์ในระบบอบแห้งเป็นตัวชี้วัดหนึ่งแสดงถึงการใช้พลังงานที่ส่วนต่างๆ ของระบบ การพิจารณาอัตราส่วนพลังงานการใช้ประโยชน์จะแสดงถึงประสิทธิภาพทางพลังงานของระบบอบแห้ง (Akpinar, 2019) การวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีโดยทั่วไปมักใช้ข้อมูลในแง่จุดของระบบเป็นข้อมูลเพื่อประเมินประสิทธิภาพการอบแห้ง โดย Castro et al.(2018) วิเคราะห์เอ็กเซอร์จีของการอบแห้งหัวหอมของเครื่องอบแห้งสายพานการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลอากาศเป็นการเพิ่มเอ็กเซอร์จีเข้าห้องอบแห้ง การเพิ่มประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีทำได้โดยการเพิ่มอัตราการไหลอากาศ ในขณะที่อัตราการไหลอากาศที่สูงเกินไปจะส่งผลให้ระบบมีการสูญเสียความร้อนเพิ่มขึ้น Yogendrasasidhar and Setty (2018) ทดลองอบแห้งเมล็ดข้าวฟ่างด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบด พบว่าเอ็กเซอร์จีสูญเสียเกิดจากปัจจัยด้านอุณหภูมิอากาศอบแห้ง อัตราการไหลอากาศ ความหนาเบด และความชื้นเริ่มต้นตัวอย่างอบแห้ง นอกจากนั้นค่าเอ็กเซอร์จีลดลงเมื่ออัตราการไหลอากาศและระยะเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง อัตราการไหลอากาศ และระยะเวลาการอบแห้ง ในขณะที่การเพิ่มความหนาเบดและความชื้นเริ่มต้นตัวอย่างอบแห้งมีผลให้ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีลดลง มีบทความวิจัยหลากหลายที่ทำการศึกษาวเคราะห์ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีของการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร เช่น พริกไทย (Akpinar, 2019) แป้งมันสำปะหลัง (Aviara et al., 2014) กระเจี๊ยบ (Okunola et al., 2021) มันฝรั่ง (Arepally et al., 2017) วอลนัต (Chen et al., 2020) และ มันหวาน (Kolaric et al., 2020) ผลจากการศึกษาจากบทความเหล่านี้พบว่า ค่าดัชนีความยั่งยืนด้านการผลิตเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกับค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรโดยทั่วไปได้ (Benhamza et al., 2021; Zalazar-Garcia et al., 2022) จากข้อมูลข้างต้น จะเห็นว่าประสิทธิภาพระบบอบแห้งมีความสำคัญมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อการลดความชื้นของการอบแห้งติปลี อัตราส่วนพลังงานการใช้ประโยชน์ และการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี

1. วิธีการทดลอง

ภาพที่ 1 แสดงแผนผังเครื่องอบแห้งลมร้อนที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วยอุปกรณ์ 1) พัดลม (Blower) ทำหน้าที่ป้อนอากาศเข้าสู่ระบบเพื่อเป็นตัวกลางในการพาความร้อน ซึ่งสามารถปรับความเร็วรอบเพื่อเพิ่มลดปริมาณลมโดยใช้อินเวอร์เตอร์ 2) ชุดทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (Electric Heater) ขนาด 3.5 kW 220 V/3PH/50Hz ทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง 3) เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งทำหน้าที่ส่งค่าอุณหภูมิที่วัดได้ไปที่ชุดควบคุมอุณหภูมิ 4) ชั้นวางลาดที่ใช้ใส่วัสดุที่ใช้ในการอบแห้งขนาด 200x200x50 mm. 5) เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล ซึ่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการอบ 6) ชุดควบคุมและทำงานโดยอาศัยอุณหภูมิอบแห้ง (Drying Temperature) ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากชุดทำความร้อนที่วัดได้จากตำแหน่งหมายเลข 3 เพื่อควบคุมการทำงานของชุดทำความร้อน 7) ชุดวัดการใช้พลังงานไฟฟ้า (Energy Meter) ใช้วัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งด้วยลมร้อน 8) ห้องอบแห้ง (Drying Chamber) ขนาดพื้นที่หน้าตัด 24 x21 cm ซึ่งห้องอบแห้งทำการหุ้มฉนวนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน



ภาพที่ 1: แสดงแผนผังเครื่องอบแห้งลมร้อนที่ใช้ในงานวิจัย

2. การทดลอง

ในงานวิจัยนี้ใช้ดิบลิมีความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละโดยน้ำหนัก 240-250 ฐานแห้ง ขนาดความยาวเฉลี่ย 45 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 7 มิลลิเมตร เป็นวัสดุในการทดลอง ก่อนทำการทดลองจะนำดิบลิสะอาดมวล 0.5 กิโลกรัม มาพักไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที โดยขั้นตอนการทดลองในขั้นแรกทำการเปิดสวิตช์เดินเครื่องพัดลมก่อนเพื่อป้องกันชุดทำความร้อนขนาด ต่อไปเปิดสวิตช์ชุดทำความร้อนปรับค่าจนได้อุณหภูมิอบแห้งตามต้องการ เดินเครื่องอบแห้งประมาณ 5 นาที จนเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) หลังจากนั้นทำการนำดิบลิ มวล 0.5 กิโลกรัม ใส่เข้าสู่เครื่องอบ และทำการอบตามเงื่อนไขที่กำหนด ระหว่างการทดลองจะทำการจดบันทึกน้ำหนักของดิบลิทุก 30 นาที เพื่อนำมาคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงความชื้น จนกระทั่งความชื้นของดิบลิไม่เปลี่ยนแปลง ในการทดลองใช้อุณหภูมิอบแห้ง 3 ค่า คือ 70 75 และ 80 องศาเซลเซียส โดยทดลองที่ความเร็วลม 3 ค่า 0.5 0.7 และ 1 เมตร/วินาที ทำการวัดและจดบันทึกอุณหภูมิและความชื้นลมร้อนทางเข้าก่อนการอบแห้ง และทางออกหลังการอบแห้ง หลังจากนั้นการหาค่าความชื้นสุดท้าย ทำโดยการนำดิบลิไปอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง (AACC., 1995) โดยอุณหภูมิอ้างอิงการทดลองนี้ใช้ 30 องศาเซลเซียส

3. ทฤษฎีการคำนวณ

3.1 การหาความชื้นในวัสดุ

ความชื้นในวัสดุนั้นเป็นค่าความชื้นที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่อยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับวัสดุที่ขึ้นหรือแห้ง การวัดความชื้นในวัสดุสามารถที่จะวัดได้สองแบบ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก นิยมใช้กับองค์การการค้าโดยอ้างอิงในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์และความชื้นมาตรฐานแห้ง นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งในทางทฤษฎีเนื่องจากช่วยในการคำนวณที่สะดวกเพราะมวลของวัตถุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ในระหว่างกระบวนการอบแห้งซึ่งถือว่าเกือบคงที่นี้เป็นเพราะผลผลิตทางเกษตรมีความชื้นสูง ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการ

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

โดยที่ M_{db} = ความชื้นมาตรฐานแห้ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก, ฐานแห้ง)

w = มวลของวัสดุขึ้น (กิโลกรัม)

d = มวลของวัสดุแห้ง (กิโลกรัม)

3.2 การวิเคราะห์พลังงาน

การวิเคราะห์พลังงานจากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ ในกระบวนการอบแห้งเกี่ยวข้องกับกระบวนการทำความร้อน กระบวนการทำความเย็น และกระบวนการลดความชื้น ซึ่งกระบวนการเหล่านี้สามารถพิจารณาให้เป็นกระบวนการไหลแบบสภาวะคงตัว และทำการวิเคราะห์โดยการประยุกต์ใช้กฎการอนุรักษ์มวล (สำหรับอากาศแห้งและความชื้น) และหลักการอนุรักษ์พลังงาน สมการทั่วไปของการอนุรักษ์มวลของอากาศแห้ง (ไม่มีความชื้น) ดังสมการต่อไปนี้ (Cengel Y.A. and Boles M.A., 2011)

$$\sum \dot{m}_{ai} = \sum \dot{m}_{ao} \quad (2)$$

โดยที่ $\dot{m}_{ai}$ (กิโลกรัม/วินาที) คืออัตราการไหลของมวลอากาศทางเข้า และ $\dot{m}_{ao}$ (กิโลกรัม/วินาที) คืออัตราการไหลของมวลอากาศทางออกของกระบวนการอบแห้ง จากสมการที่ (2) สำหรับอากาศที่แห้ง (ไม่มีความชื้น) แต่สำหรับในกระบวนการอบแห้งด้วยกระบวนการพาความร้อนโดยทั่วไปนั้นจะมีความชื้นภายในวัสดุระเหยผสมกับลมร้อนที่ไหลผ่านกระบวนการอบแห้ง ดังนั้นสามารถอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้ (Cengel Y.A. and Boles M.A., 2011)

$$\sum (\dot{m}_{wi} + \dot{m}_{mp}) = \sum \dot{m}_{wo} \quad \text{หรือ} \quad \sum (\dot{m}_{ai} w_i + \dot{m}_{mp}) = \sum \dot{m}_{ao} w_o \quad (3)$$

โดยที่ $\dot{m}_{wi}$ และ $\dot{m}_{wo}$ คืออัตราการไหลของมวลความชื้นของอากาศทางเข้าและทางออกของกระบวนการอบแห้ง ตามลำดับ $\dot{m}_{mp}$ คืออัตราการไหลของมวลความชื้นที่ระเหยออกจากแพคเกจวัสดุพูน w_i และ w_o คืออัตราส่วนความชื้นความชื้นที่ไหลเข้าและทางออกของกระบวนการอบแห้ง (กรัม/กิโลกรัม)

สำหรับการวิเคราะห์พลังงานนั้นจะมีการวิเคราะห์อยู่ 2 ส่วน คือ ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ (Energy Utilization : EU, kW.) ได้จากสมการต่อไปนี้ (Wongkumhoom et al., 2012)

$$EU = m(h_i - h_o) \quad (4)$$

□

เมื่อ m (กิโลกรัม/วินาที) คืออัตราการไหลเชิงมวล ส่วน h_i คือเอนทัลปีขาเข้าและ h_o คือเอนทัลปีขาออก (กิโลจูล/กิโลกรัม) และในการวิเคราะห์พลังงานส่วนที่ 2 จะพิจารณา ค่าอัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ (Energy Utilization Ratio : EUR, %) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (Wongkumhoom et al., 2012)

$$EUR = \left(\frac{h_i - h_o}{h_i} \right) \times 100 \quad (5)$$

□

โดยเอนทัลปีขาเข้าหาได้จากสมการ

$$h_i = m c_p T_i \quad (6)$$

□

และเอนทัลปีขาออกหาได้จากสมการ

$$h_o = (m c_p T_o) + (w h_{fg}) \quad (7)$$

□

เมื่อ m (กิโลกรัม/วินาที) คืออัตราการไหลเชิงมวลส่วน h_i (กิโลจูล/กิโลกรัม) คือเอนทัลปีขาเข้าและ h_o (กิโลจูล/กิโลกรัม) คือเอนทัลปีขาออก ส่วน h_{fg} (กิโลจูล/กิโลกรัม) คือความร้อนแฝงของการระเหย (latent heat of vaporization) C_p (กิโลจูล/กิโลกรัม องศาเซลเซียส) คือค่าความจุความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิใด ๆ w คือ humidity ratio of drying air และ T (องศาเซลเซียส) คือ อุณหภูมิใด ๆ

3.3 การวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี

ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้งดีปลีน้อยบนพื้นฐานของกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ เพื่อให้ง่ายในการวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องกำหนดสถานะและขอบเขตทางเข้าและทางออกของกระบวนการอบแห้ง เพื่อนำไปคำนวณหาเอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้า (Exergy Inflow) เอ็กเซอร์จีที่ไหลออก (Exergy Outflow) และเอ็กเซอร์จีสูญเสีย (Exergy Loss) โดยเอ็กเซอร์จีที่คำนวณได้นั้นจะเป็นเอ็กเซอร์จีที่พิจารณาให้อยู่ในสภาวะแบบคงตัว (Steady State) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (Cengel Y.A. and Boles M.A., 2011)

$$Exergy = \bar{c}_p \left[(T - T_\infty) - T \ln \frac{T}{T_\infty} \right] \quad (8)$$

โดยที่เอ็กเซอร์จีสูญเสีย (Exergy Loss) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Exergy\ loss = Exergy\ inflow - Exergy\ outflow$$

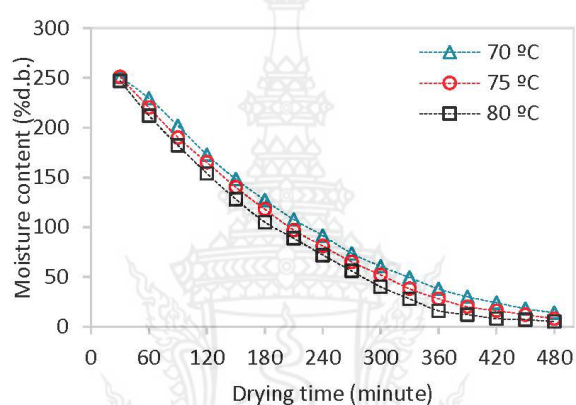
$$\sum Ex_L = \sum Ex_i - \sum Ex_o \quad (9)$$

สำหรับการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพเอกซ์เซอจี(Exergy Efficiency) หาได้จากสมการ

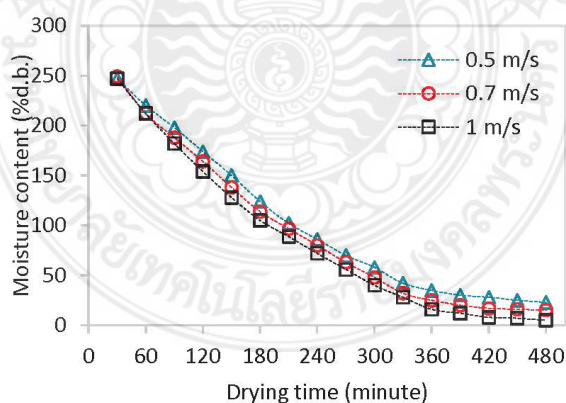
$$\text{Exergy Efficiency} = \frac{\text{Exergy}_{out}}{\text{Exergy}_{in}} \times 100$$

(10)

4. ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงความชื้น



ภาพที่ 2: ผลกระทบของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่อการลดความชื้นดิบสั ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 เมตร/วินาที



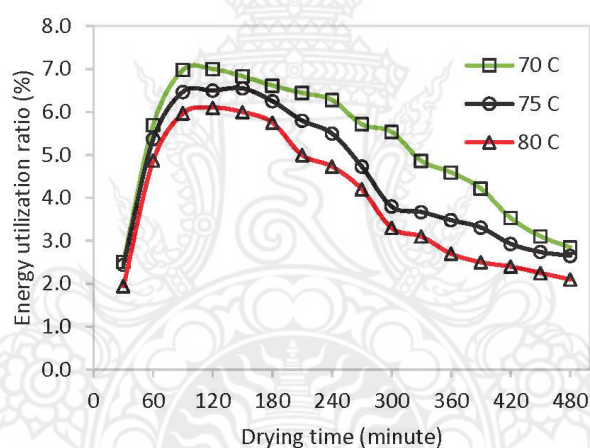
ภาพที่ 3: ผลกระทบของความเร็วอากาศอบแห้งต่อการลดความชื้นดิบสั ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส

ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการลดความชื้นแสดงในภาพที่ 2 อัตราการอบแห้งคงที่ในช่วงเวลา 360 นาทีแรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นอัตราการอบแห้งจึงเริ่มลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อการลดความชื้นดิบสัลดลงได้มากขึ้น

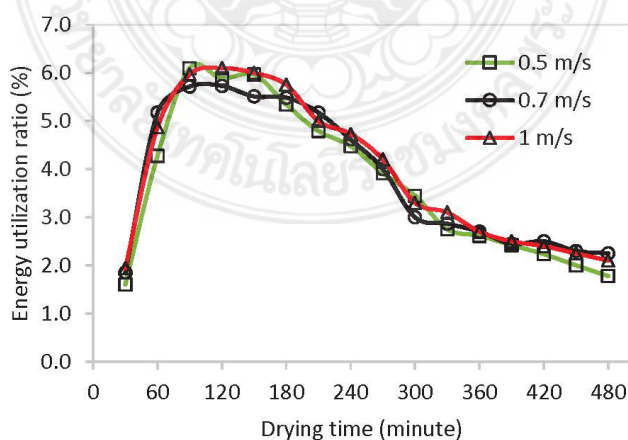
อุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้นความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศอบแห้งกับอุณหภูมิที่ผิวตึบลิ้งเพิ่มขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการระเหยน้ำจึงมากขึ้นตามไปด้วย (Bootkote et al., 2016)

ผลกระทบของความเร็วอากาศอบแห้งต่อการลดความชื้นแสดงในภาพที่ 3 การเพิ่มความเร็วอากาศอบแห้งทำให้มวลอากาศร้อนที่ไหลผ่านห้องอบแห้งเพิ่มขึ้น การระเหยของน้ำจึงเพิ่มมากขึ้น ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งเท่ากัน ความเร็วอากาศอบแห้งสูงจึงมีผลให้ความชื้นตึบลิ้งลดลงได้มากกว่าที่ความเร็วอากาศอบแห้งต่ำ (Ndukwu, 2009) เมื่อพิจารณาภาพที่ 2 และ 3 พบว่า ความชื้นตึบลิ้งลดลงได้รวดเร็วในช่วงเวลา 360 นาทีแรก หลังจากนั้นความชื้นจึงลดลงอย่างช้าๆ เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ปริมาณน้ำที่อยู่ภายในตึบลิ้งเริ่มน้อยลงและส่วนใหญ่จะอยู่ภายในเนื้อตึบลิ้ง ระยะเวลาที่ใช้สำหรับการแพร่ของน้ำจากภายในออกสู่ผิวด้านนอกจึงเพิ่มขึ้น (Potapov and Yakushenko, 2013)

5. ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์



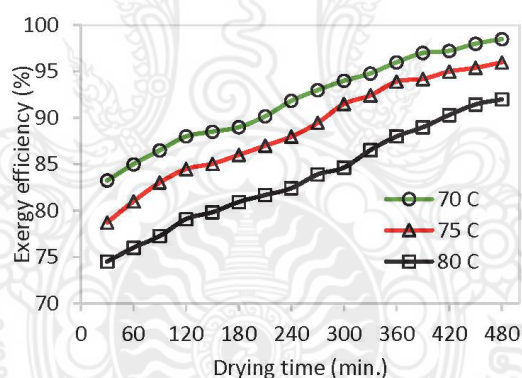
ภาพที่ 4: ผลกระทบของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่ออัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 เมตร/วินาที



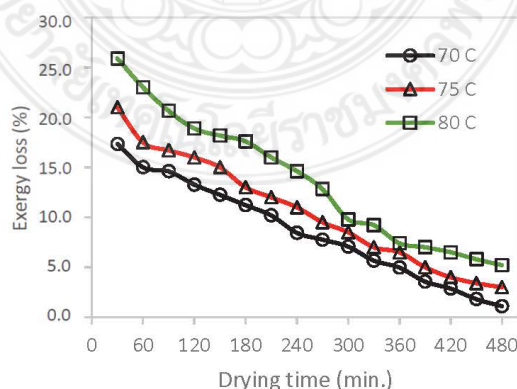
ภาพที่ 5: ผลกระทบของความเร็วอากาศอบแห้งต่ออัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิอากาศอบแห้งมีผลกระทบต่ออัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์อย่างมีนัยสำคัญ แสดงดังภาพที่ 4 เมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งเพิ่มขึ้นอัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์จะลดลง เนื่องจากการระเหยของน้ำเพิ่มขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อค่าประสิทธิภาพ การอบแห้ง ภาพที่ 5 แสดงผลกระทบของความเร็วอากาศอบแห้งต่ออัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่า ความเร็วอากาศอบแห้งไม่มีผลต่ออัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ แม้การเพิ่มความเร็วอากาศอบแห้งจะทำให้มวลอากาศไหลผ่านห้องอบแห้งเพิ่มขึ้น แต่อัตราการระเหยน้ำที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ทำให้การเพิ่มความเร็วอากาศอบแห้งไม่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ เมื่อพิจารณาภาพที่ 4 และ 5 จะเห็นว่าค่าอัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ค่อนข้างต่ำที่เวลาการอบแห้ง 90 นาทีแรก เนื่องจากในช่วง แรกของการอบแห้ง อุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม การอบแห้งช่วงแรก ความร้อนส่วนหนึ่งจึงถ่ายเทเข้าไปยังเนื้อดิบลิ อีกทั้งเปลือกของดิบลิที่แห้งและหนา ทำให้ความต้านทานการอบแห้งมีค่ามาก น้ำจึงใช้ระยะเวลาในการแพร่ ด้วยปัจจัยดังกล่าว จึงมีผลให้อัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ของการอบแห้งในช่วงแรกมีค่าที่ต่ำ ค่าอัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์สูงสุดมีค่าเท่ากับ 5.9-6.9 ที่เวลา 80-210 นาที ของการอบแห้ง หลังจากนั้นลดลงตามอัตราการอบแห้งที่ลดลง

6. ผลการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีของระบบอบแห้ง

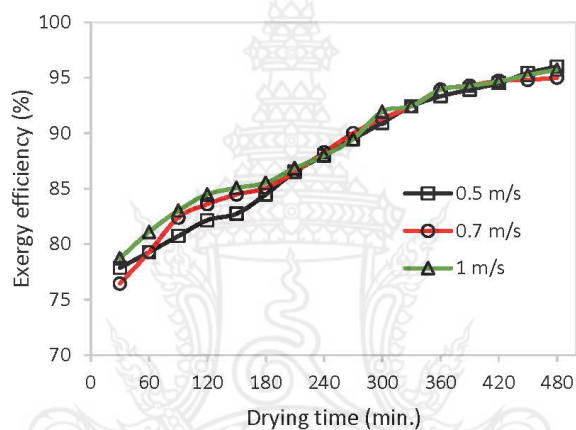


ภาพที่ 6: ผลกระทบของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่อประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 เมตร/วินาที

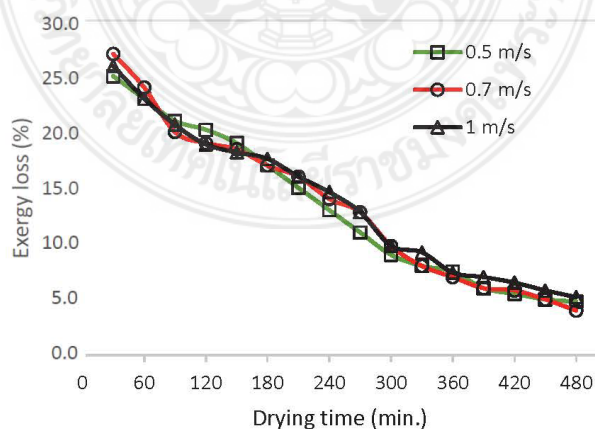


ภาพที่ 7: ผลกระทบของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่อเอ็กเซอร์จีสูญเสีย ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 6 แสดงผลกระทบของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่อประสิทธิภาพเอกเซอร์จี ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 เมตร/วินาที จะเห็นได้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งมีผลให้ประสิทธิภาพเอกเซอร์จีลดลง แสดงว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่สูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิอากาศที่ทางออกห้องอบแห้งเพิ่มขึ้น แต่ความชื้นของตัวอย่างลดลงไม่เป็นไปตามสัดส่วนการเพิ่มของอุณหภูมิ สอดคล้องกับผลการทดลองในรูปที่ 7 ที่แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งทำให้ค่าเอกเซอร์จีสูญเสียเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 70 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพเอกเซอร์จีมากกว่า ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ 6-10 การใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่สูงจึงเป็นข้อควรระวังในการคงไว้ซึ่งประสิทธิภาพของระบบ



ภาพที่ 8: ผลกระทบของความเร็วอากาศอบแห้งต่อประสิทธิภาพเอกเซอร์จี ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 9: ผลกระทบของความเร็วอากาศอบแห้งต่อเอกเซอร์จีสูญเสีย ที่ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 เมตร/วินาที



ผลกระทบของความเร็วอากาศอบแห้งต่อประสิทธิภาพเอกเซอร์จีและเอกเซอร์จีสูญเสีย แสดงดังภาพที่ 8 และ 9 ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศอบแห้งไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพเอกเซอร์จีและเอกเซอร์จีสูญเสีย เนื่องจากความเร็วอากาศอบแห้ง 0.5 – 1 เมตร/วินาที ถือได้ว่าเป็นเป็นค่าความเร็วอากาศอบแห้งที่ต่ำกว่าเครื่องอบแห้งโดยทั่วไปเช่น เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด ที่ใช้ความเร็วอากาศอบแห้ง 3-10 เมตร/วินาที เมื่ออัตราการไหลของมวลอากาศผ่านห้องอบแห้งน้อย การเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศอบแห้งจึงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพเอกเซอร์จีและเอกเซอร์จีสูญเสีย ความเร็วอากาศอบแห้งที่ 0.5 m/s จึงเพียงพอสำหรับการอบแห้งดิบลิ เมื่อพิจารณาระยะเวลาอบแห้งที่มีผลต่อการวิเคราะห์เอกเซอร์จีพบว่าค่าประสิทธิภาพเอกเซอร์จีเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่าเอกเซอร์จีสูญเสียที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้น แสดงว่าอัตราการระเหยน้ำของตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการอบแห้ง

7. อภิปรายผลผลการทดลอง

การอบแห้งดิบลิที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 เมตร/วินาที ทำให้ความชื้นลดลงได้เร็วกว่าการอบแห้งที่เงื่อนไขอื่นๆ ความชื้นลดลงได้ดีในช่วง 360 นาทีแรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นความชื้นจะลดลงอย่างช้าๆ ค่าอัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์สูงสุดอยู่ระหว่าง 5.9 -6.9 ในช่วง 80-210 นาที ของการอบแห้ง อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงมีผลให้อัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ลดลง ความเร็วอากาศอบแห้งไม่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนพลังงานใช้ประโยชน์ การเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งมีผลให้ประสิทธิภาพเอกเซอร์จีลดลง ความเร็วอากาศอบแห้งไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพเอกเซอร์จีและเอกเซอร์จีสูญเสีย ในการศึกษาครั้งนี้ประสิทธิภาพเอกเซอร์จีเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- AACC., *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists*. (1995). 9th Edition. St. Paul: American Association of Cereal.
- Akpınar E.K. (2019). The effects of some exergetic indicators on the performances of thinlayer drying process of long green pepper in a solar dryer. *Heat Mass Tran.* 55(2): 299–308.
- Arepally D., Ravula S.R., Malik K.G. and Kamidi V. (2017). Mathematical modelling, energy and exergy analysis of tomato slices in a mixed-mode natural convection solar dryer. *Chem. Sci. Int. J.* 20(4): 1–11.
- Aviara N.A., Onuoha L.N., Falola O.E. and Igbeka J.C. (2014). Energy and exergy analyses of native cassava starch drying in a tray dryer. *Energy*. 73 (9), 809–817.
- Benhamza A., Boubekri A., Atia A., Ferouali H.E., Hadibi T., Arici M. and Abdenouri N. (2021). Multi-objective optimization of solar air heater for food drying based on energy. *Exergy and improvement potential. Renew. Energy* 169: 1190–1209
- Bootkote P., Soponronnarit S. and Prachayawarakom S. (2016). Process of producing parboiled rice with different colors by fluidized bed drying technique including tempering. *Food bioprocess technology*. 2016. 9: 1574–1586.

- Castro M., Roman C., Echegaray M., Mazza G. and Rodriguez R. (2018). Exergy analyses of onion drying by convection: influence of dryer parameters on performance. *Entropy*. 20 (5): 310.
- Cengel Y.A. and Boles M.A. (2011) *Thermodynamics: an engineering approach*. 7th Edition. Mcgraw-hill International Enterprises
- Chen C., Weipeng Z., Venkitasamy C., Khir R., McHugh T. and Pan Z. (2020). Walnut structure and its influence on the hydration and drying characteristics. *Dry. Technol.* 38 (8): 975–986.
- Wongkumhoom J., Wiset L. and Poomsa-ad N. (2012). Energy and Exergy Analyses of Drying with Heat Pump. *J Sci Technol MSU*. 32 (5): 709-712
- Kolaric L., Minarovicov L., Laukov M., Karovicov J. and Kohajdov Z. (2020). Pasta noodles enriched with sweet potato starch: impact on quality parameters and resistant starch content. *J. Texture Stud.* 51 (3): 464–474
- Ndukwu M.C. (2009). Effect of drying temperature and drying air velocity on the drying rate and drying constant of cocoa bean. *Agricultural engineering international. The CIGR Ejournal*. 2009 (6).
- Okunola A.A., Adekanye T.A. and Idahosa E. (2021). Energy and exergy analyses of the okra drying process in a forced convection cabinet dryer. *Res. Agric. Eng.* 67 (1): 8–16.
- Potapov V. and Yakushenko E. (2013). Modeling of the drying process with pre-heating. *Journal of industrial technology and engineering*. 2(07): 10 – 16.
- Yogendrasasidhar D. and Setty Y.P. (2018). Drying kinetics. Exergy and energy analyses of kodo millet grains and fenugreek seeds using wall heated fluidized bed dryer. *Energy*. 151(2018): 799–811
- Zalazar-Garcia D., Roman C.M., Fernandez A., Asensio D., Zhang X., Fabani M.P., Rodriguez R. and Mazza G. (2022). Exergy, energy and sustainability assessments applied to RSM optimization of integrated convective air-drying with pretreatments to improve the nutritional quality of pumpkin seeds. *Sustain. Energy technol. Assessments*. 49 (101763).

ประวัติการศึกษาและการทำงาน



ชื่อ นามสกุล จำสืบทรีพิสิฐ ช่องลมกรด
วัน เดือน ปีเกิด 13 พฤศจิกายน 2522
ภูมิลำเนา ตำบลกลัดหลวง อำเภอยาย่าง จังหวัดเพชรบุรี

ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ปวช.ช่างยนต์	วิทยาลัยเทคนิคเพชรบุรี	2541
ปวส.ช่างยนต์	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล	2543
(เทคโนโลยีเครื่องกลต้นกำลัง)	วิทยาเขตพระนครศรีอยุธยา	
ค.อ.บ.วิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2545
วศ.บ.วิศวกรรมเครื่องกล	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน	2549
วศ.บ.วิศวกรรมอุตสาหการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2554
วศ.บ.วิศวกรรมโยธา	มหาวิทยาลัยสยาม	2565
วศ.บ.วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์	2566
วศ.ม.วิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2567

ผลงานเผยแพร่

Modelling of Mechanical Vapor Recompression System Performance in Sugar Process, The 9th TSME International Conference on Mechanical Engineering, Thai Society of Mechanical Engineers (TSME-ICOME 2018) ระหว่างวันที่ 11-14 ธันวาคม 2561 จ.ภูเก็ต

การศึกษาลดความชื้นดีปส์และวิเคราะห์การใช้พลังงานด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด การประชุมวิชาการระดับชาติราชมงคลสุรินทร์ ครั้งที่ 14 “วิจัยและนวัตกรรมเพื่อเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน” ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ ระหว่างวันที่ 23-24 พฤศจิกายน 2566

การวิเคราะห์พลังงานใช้ประโยชน์และประสิทธิภาพเอกเซอร์จีของการอบแห้งดีปัสต์ด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด วิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม การประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ประจำปี 2566 ครั้งที่ 2 หัวข้อ “นวัตกรรมและเทคโนโลยีทางสังคมเพื่อการพัฒนาเชิงพื้นที่สู่การพัฒนาท้องถิ่นอย่างยั่งยืน” ณ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ระหว่างวันที่ 17-19 ธันวาคม 2566

ประวัติการทำงาน

- 2549-2566 วิศวกรเครื่องกลและอุตสาหกรรมอาวุธ แผนกออกแบบโรงงานอุตสาหกรรม
Chuchawal-Royal Haskoning Ltd. อโศก กรุงเทพมหานคร
- 2558-ปัจจุบัน กรรมการผู้จัดการ/วิศวกรโครงการ บริษัท แพลนท์ ดีไซน์ จำกัด
63/1 หมู่ที่ 2 ต.ต้นมะม่วง อ.เมืองเพชรบุรี จ.เพชรบุรี 76000

ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม

1. สามัญวิศวกรเครื่องกล เลขทะเบียน สก.3582 ได้รับเมื่อวันที่ 21 เม.ย. พ.ศ. 2554
2. สามัญวิศวกรอุตสาหกรรม เลขทะเบียน สอ.940 ได้รับเมื่อวันที่ 16 ก.ย. พ.ศ. 2558
3. ภาควิศวกรสิ่งแวดล้อม เลขทะเบียน ภส.227 ได้รับเมื่อวันที่ 10 ก.พ. พ.ศ. 2552
4. ภาควิศวกรโยธา เลขทะเบียน ภย.89524 ได้รับเมื่อวันที่ 15 มี.ค. พ.ศ. 2565

