

การสร้างอัลกอริทึมควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการ
เปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์



ณัฐวิทย์ ทองมงคล

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการพลังงานและสมาร์ตกริดเทคโนโลยี

มิถุนายน 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

การสร้างอัลกอริทึมควบคุมอัตราการใช้พลังงานของอาคารที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและ
อุณหภูมิของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการพลังงานและสมาร์ตกริดเทคโนโลยี

มิถุนายน 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

CREATING AN AIR FLOW RATE CONTROL ALGORITHM AFFECTS CHANGES IN HUMIDITY
AND TEMPERATURE OF THE SOLAR DRYING PLANT



NATTAWIT TONGMONGKON

A Dissertation Submitted to University of Phayao
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Doctor of Philosophy Degree in Energy Management and Smart Grid Technology
June 2023

Copyright 2023 by University of Phayao

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การสร้างอัลกอริทึมควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและ
อุณหภูมิของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

ของ ญัฐวิทย์ ทองมงคล

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการพลังงานและสมาร์ตกริดเทคโนโลยี

ของมหาวิทยาลัยพะเยา

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร. วัฒนพงศ์ รักษ์วิเชียร)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีชระ วงศ์ปัญญา)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร. บุญวัฒน์ วิจารย์พล)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร. ประเมษฐ์ สิทธิสันต์)

..... อาจารย์บัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยพะเยา
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประพิচারี ธารักษ์)

..... อาจารย์บัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยพะเยา
(ดร. สุรัตน์ เศษโพธิ์)

..... คณบดีคณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม
(รองศาสตราจารย์ ดร. ต่อพงศ์ กวีธาดา)

- เรื่อง:** การสร้างอัลกอริทึมควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์
- ผู้วิจัย:** ณัฐวิทย์ ทองมงคล, วิทยานิพนธ์: ปร.ด. (การจัดการพลังงานและสมาร์ตกริดเทคโนโลยี), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2566
- อาจารย์ที่ปรึกษา:** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วังระ วงศ์ปัญญา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.บุญวัฒน์ วิจารย์ผล ดร.ปรเมษฐ์ สิทธิสันต์
- คำสำคัญ:** อบแห้งแบบอัตโนมัติ, อัลกอริทึม, อัตราการไหลของอากาศ, การไหลแบบไม่ต่อเนื่อง, ชุดควบคุม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างอัลกอริทึมควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิ ของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และเสนอแนะแนวทางการจัดการพลังงาน เพื่อความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยมีการออกแบบชุดควบคุมการทำงานของพัดลม โดยอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมภายในโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ออกแบบบอร์ด Raspberry pi 3B+ ทำงานร่วมกับ Smart Phone Display และทำการเขียนคำสั่งระบบควบคุมสั่งงานอุปกรณ์ภายใน ติดตั้งอุปกรณ์ภายในโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และทดสอบการทำงานของชุดควบคุม โดยใช้วัตถุใบในการทดลอง 2 ชนิด คือกล้วยน้ำว้าและผักตบชวา โดยกำหนดอัตราการไหลของอากาศ 3 ค่าคือ 0.35, 0.70 และ 1.05 m³/s จากผลการทดลองพบว่า ที่อัตราการไหลของอากาศที่ 0.35 m³/s ส่งผลให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงได้ดีที่สุด ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการไหลแบบไม่ต่อเนื่อง (intermittent flow) โดยการปรับอัตราการไหลของทั้ง 3 ค่า โดยขึ้นอยู่กับอัลกอริทึมโดยมีเงื่อนไขคือ ที่อุณหภูมิ 50 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 35% โดยฟังก์ชันการทำงานของอัตราการไหลที่ 0.35 , 0.70 และ 1.05 m³/s ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 1,7 และ 10 °C จากผลการทดลอง ทำให้ได้สมการของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับความชื้นสัมพัทธ์อุณหภูมิ และอัตราการไหลของอากาศ การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ ของโรงอบแห้งแบบอัตโนมัตินี้มีจุดคุ้มทุนคือ 1 ปี 5 เดือน ซึ่งถือว่ามีระยะเวลาที่สั้น และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ เท่ากับ 24,241.90 บาท ทั้งนี้สามารถลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก 0.67859kgCO₂e ต่อเดือนเมื่อเทียบกับแบบระบบเดิม

Title: CREATING AN AIR FLOW RATE CONTROL ALGORITHM AFFECTS CHANGES IN HUMIDITY AND TEMPERATURE OF THE SOLAR DRYING PLANT

Author: NATTAWIT TONGMONGKON, Dissertation: Ph.D. (Energy Management and Smart Grid Technology), University of Phayao, 2023

Advisor: Assistant Professor Dr. Watchara Wongpanyo Co–advisor Dr.Bunyawat Vichanpol
Dr.Poramate Sittisun

Keywords: Automatic drying, Algorithm, Airflow rate, Intermittent flow, Controlling system

ABSTRACT

This research aims to create an algorithm to control the air flow that affects changes in humidity and temperature of the solar drying plant. Also, it suggests energy management guidelines for economic value. The research was designing a controlling system of fans inside the dryer, creating a Raspberry Pi 3B+ board that works with a Smart Phone Display, and writing a command to control the internal equipment. The equipment was installed inside the dryer and tested for dryer operation. The two materials for the drying system were banana and water hyacinth. Air flow rates were controlled at 0.35 , 0.70 , and 1.05 m³/s. The results showed that moisture content could be decreased best at an airflow rate of 0.35 m³/s compared with other air flow rates. In addition, an intermittent flow was also investigated by determining on 50 °C temperature and 35% relative humidity which the functional control algorithm of 3 air flow rates (0.35, 0.7 and 1.05 m³/s) was depended on the increasing temperature of 1, 7 and 10 °C, respectively. The results showed that the correlation equation between drying rate with relative humidity, temperature, and air flow rates. The economic analysis showed a viable investment in using an automatic solar drying system at 1.42 year of break even, considered a short period. The net present value (NPV) equals 24,241.90 baht, which was also suitable for reducing the amount of greenhouse gas emissions equaled to 0.67859kgCO₂ e/month comparing with old system.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความตั้งใจของผู้เขียน พร้อมด้วยความกรุณาชี้แนะจาก และความช่วยเหลืออย่างดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชระ วงศ์ปัญญา ประธานที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ดร.บุญวัฒน์ วิจารณ์พล และดร.ปรเมษฐ์ ลิทธิสันดี กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และสละเวลาเป็นที่ปรึกษา ให้คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางการเขียน วิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังคอยช่วยเหลือกำกับดูแลและติดตามการดำเนินการวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วัฒน์พงศ์ รักษ์วิเชียร ประธานคณะกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพิฑารีย์ ธนารักษ์ ผู้ทรงคุณวุฒิ ดร.สุรัตน์ เศษโพธิ์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะและตรวจสอบในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับ นี้ให้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์รวมทั้งเจ้าหน้าที่ สาขาวิชาการจัดการพลังงานและสมาร์ต กริดเทคโนโลยี คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมชั้นเรียนสาขาวิชาการจัดการพลังงานและสมาร์ตกริดเทคโนโลยี คอยดูแลให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร.ทรงพล ผัดวงศ์ ที่ช่วยแก้ไข ปัญหา ให้คำแนะนำต่าง ๆ และกำลังใจตลอดระยะเวลาการเรียนจนถึงการเขียนบทความวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ กลุ่มจัดการฝึกตบชวา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลการทำวิจัยในครั้งนี้ ของข้าพเจ้า

สุดท้ายนี้ขอขอบพระ มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน เป็นอย่างยิ่งสูงที่คอยให้กำลังใจ และคอยสนับสนุนการเรียนในวันที่เจอปัญหาจนสามารถผ่านพ้นอุปสรรคต่าง ๆ มาได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีได้กล่าวมาในที่นี้ด้วย

ณัฐวิทย์ ทองมงคล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
ขอบเขตการวิจัย	4
สมมติฐานของการวิจัย.....	5
ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย.....	5
กรอบแนวคิดการวิจัย	5
นิยามศัพท์เฉพาะ	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
ระบบกักเก็บพลังงาน	7
ทฤษฎีการอบแห้ง	12
ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์.....	22
ประสิทธิภาพทางความร้อน.....	38
พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	41
ผักตบชวา.....	45

กล้วยน้ำว้า	46
การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนและระยะเวลาคืนทุน	47
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	48
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	59
แนวคิดการดำเนินงานวิจัย	59
วิธีทำดำเนินการวิจัย	61
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	62
การประยุกต์ใช้โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart solar drying) แบบเรือนกระจก.....	66
การพัฒนาระบบการทำงานแบบอัตโนมัติ ในลักษณะแบบเรือนกระจก ของระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart solar drying).....	70
การเพิ่มสมรรถนะของระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart solar drying) แบบเรือนกระจกด้วยพัดลมร้อน.....	74
การเก็บรวบรวมข้อมูล	76
การวิเคราะห์ข้อมูล	76
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	78
การประยุกต์ใช้โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying) แบบเรือนกระจก.....	78
ผลการศึกษาการไหลของลมร้อนที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้ง	86
ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอิทธิพลอัตราการไหลของอากาศ 1.05 m ³ /s.....	99
การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตและความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์.....	115
การวิเคราะห์ทางสิ่งแวดล้อมของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีระบบอัลกอริทึมควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิ	118
บทที่ 5 สรุปผล	120
สรุปผล	120

อภิปรายผล.....	122
ข้อเสนอแนะ.....	124
บรรณานุกรม	125
ประวัติผู้วิจัย	130



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 การเปรียบเทียบความแตกต่างของสมรรถนะระหว่างโรงอบระบบอบแห้งอัจฉริยะกับโรงอบแบบเดิม	86
ตาราง 2 ข้อมูลการอบผักตบชวาโดยมีการเก็บข้อมูล Drying rate, DR อุณหภูมิ, T ความชื้น, RH ในช่วงเวลาต่าง ๆ.....	88
ตาราง 3 ความสัมพันธ์ DRpredict เทียบกับค่า DR	90
ตาราง 4 ข้อมูลการอบผักตบชวาโดยมีการเก็บข้อมูล Drying rate, DR อุณหภูมิ, T ความชื้น, RH ในช่วงเวลาต่าง ๆ.....	95
ตาราง 5 ความสัมพันธ์ DRpredict เทียบกับค่า DR	97
ตาราง 6 ข้อมูลการอบผักตบชวาโดยมีการเก็บข้อมูล Drying rate, DR อุณหภูมิ, T ความชื้น, RH ในช่วงเวลาต่าง ๆ.....	102
ตาราง 7 ความสัมพันธ์ DRpredict เทียบกับค่า DR	104
ตาราง 8 ข้อมูลการอบผักตบชวาโดยมีการเก็บข้อมูล Drying rate, DR อุณหภูมิ, T ความชื้น, RH การทำงานอัตราการไหลของอากาศ, AFR ในช่วงเวลาต่าง ๆ.....	110
ตาราง 9 ความสัมพันธ์ DRpredict เทียบกับค่า DR	113
ตาราง 10 แสดงรายการราคาต้นทุนของชุดควบคุมระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์	115
ตาราง 11 แสดงรายการราคาต้นทุนแปรผันของชุดควบคุมระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์	116
ตาราง 12 แสดงการวิเคราะห์ต้นทุนและจุดคุ้มทุนของชุดควบคุมระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์	116
ตาราง 13 แสดงการวิเคราะห์ต้นทุนผันแปร ณ จุดคุ้มทุนของชุดควบคุมระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์	117
ตาราง 14 แสดงหน่วยการขายผักตบชวาแจ้งจากการใช้ชุดควบคุมระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์	117

ตาราง 15 แสดงการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนของการใช้ชุดควบคุมระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์118

ตาราง 16 แสดงการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์118

ตาราง 17 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีระบบอัลกอริทึมควบคุมอัตราการไหลของอากาศกับแบบเดิม119



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย.....	6
ภาพ 2 sorption isotherm ของผลผลิตผลการเกษตรทั่วไป	19
ภาพ 3 แผนภูมิอากาศชื้นและการเปลี่ยนแปลงสมบัติของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง.....	22
ภาพ 4 เครื่องอบแห้งแบบรับแสงอาทิตย์โดยตรง	23
ภาพ 5 เครื่องอบแห้งแบบรับแสงอาทิตย์ทางอ้อม.....	24
ภาพ 6 เครื่องอบแห้งแบบรับแสงอาทิตย์โดยตรงและใช้พัดลม	25
ภาพ 7 แสดงเครื่องอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม	25
ภาพ 8 แบบของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์.....	27
ภาพ 9 โครงสร้างของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก.....	28
ภาพ 10 การทำงานของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก	28
ภาพ 11 การเปลี่ยนแปลงของอัตราความชื้นกับอุณหภูมิของวัตถุดิบ.....	30
ภาพ 12 เส้นกราฟอัตราเร็วในการอบในช่วงอัตราเร็วลดลง	32
ภาพ 13 เครื่องอบ Tray Dryer.....	33
ภาพ 14 สมการเวลา E ในหน่วยนาที	37
ภาพ 15 หน้าที่ของส่วนต่าง ๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์.....	40
ภาพ 16 ผักตบชวา	45
ภาพ 17 กลัวย่นน้ำว่า.....	47
ภาพ 18 แสดงแนวคิดการดำเนินงานวิจัย.....	60
ภาพ 19 ไดอะแกรมขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	61
ภาพ 20 Raspberry pi 3B+.....	66
ภาพ 21 Sensor AM2302 (ASAIR) เซ็นเซอร์วัด อุณหภูมิและความชื้น	67

ภาพ 22 พัดลมร้อน ขนาด 3,000 วัตต์.....	67
ภาพ 23 พัดลมระบายอากาศ.....	68
ภาพ 24 โซลาร์เซลล์ขนาด 50 Wp.....	68
ภาพ 25 แบตเตอรี่ 100 AH.....	69
ภาพ 26 Solar charge.....	69
ภาพ 27 แสดงระบบควบคุมการทำงานของระบบอบแห้งแบบอัจฉริยะ.....	70
ภาพ 28 ฟังก์ชันการทำงานควบคุมระบบ.....	71
ภาพ 29 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งระบบตรวจวัด.....	72
ภาพ 30 ไดอะแกรมการทำงานของระบบควบคุมอัจฉริยะ.....	72
ภาพ 31 แสดงการติดตั้งพัดลม.....	73
ภาพ 32 แสดงส่วนประกอบการทำงานของระบบ.....	73
ภาพ 33 ไดอะแกรมระบบการควบคุม.....	74
ภาพ 34 การออกแบบระบบควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying).....	75
ภาพ 35 โปรไฟล์อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้ง.....	79
ภาพ 36 โปรไฟล์ความชื้นภายในเครื่องอบแห้ง.....	79
ภาพ 37 โปรไฟล์การลดลงของน้ำหนักผลิตภัณฑ์.....	80
ภาพ 38 ผลต่างอุณหภูมิภายนอกกับภายในตู้อบแห้ง.....	80
ภาพ 39 ความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบแห้งลดลงและมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ.....	81
ภาพ 40 โปรไฟล์อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งที่ใช้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์.....	82
ภาพ 41 โปรไฟล์ความชื้นภายในเครื่องอบแห้งที่ใช้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์.....	82
ภาพ 42 โปรไฟล์การลดลงของน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ใช้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ในการ.....	83
ภาพ 43 ผลต่างอุณหภูมิภายนอกกับภายในตู้อบแห้งที่ใช้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์.....	84
ภาพ 44 ความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบแห้งลดลงและมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ.....	85
ภาพ 45 เปรียบเทียบผลของ Drying rate การอบแห้ง 2 วัน.....	86

ภาพ 46 เปรียบเทียบผลของ Temperature กับ Relative humidity การอบแห้ง 2 วัน.....	87
ภาพ 47 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) และค่าความเชื่อมั่น (Significance)	89
ภาพ 48 การเปรียบเทียบค่าจริงกับค่าจากการพยากรณ์ด้วยตัวแปร.....	92
ภาพ 49 เปรียบเทียบผลของ Drying rate การอบแห้ง 2 วัน.....	93
ภาพ 50 เปรียบเทียบผลของ Temperature กับ Relative humidity การอบแห้ง 2 วัน.....	94
ภาพ 51 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) และค่าความเชื่อมั่น (Significance)	96
ภาพ 52 การเปรียบเทียบค่าจริงกับค่าจากการพยากรณ์ด้วยตัวแปร Regression	99
ภาพ 53 เปรียบเทียบผลของ Drying rate การอบแห้ง 2 วัน.....	100
ภาพ 54 เปรียบเทียบผลของ Temperature กับ Relative humidity การอบแห้ง 2 วัน.....	101
ภาพ 55 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์(Coefficient)และค่าความเชื่อมั่น (Significance)	103
ภาพ 56 การเปรียบเทียบค่าจริงกับค่าจากการพยากรณ์ด้วยตัวแปร Regression	106
ภาพ 57 อิทธิพลของอัตราการไหลอากาศที่มีผลต่อ Drying rate.....	107
ภาพ 58 อิทธิพลของอัตราการไหลอากาศที่มีผลต่อ Temperature	107
ภาพ 59 อิทธิพลของอัตราการไหลอากาศที่มีผลต่อ Relative Humidity	108
ภาพ 60 ภาพแสดงสภาวะการทำงานของพัดลม 3 ตัว.....	109
ภาพ 61 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) และค่าความเชื่อมั่น (Significance)	112
ภาพ 62 การเปรียบเทียบค่าจริงกับค่าจากการพยากรณ์ด้วยตัวแปร Regression	115

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตเส้นศูนย์สูตรมีค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รวมรายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศ $18.0 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ หรือ $5.0 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ เพียงพอสำหรับการพัฒนาและประโยชน์ด้านความร้อนและผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ โดยปัจจุบันประเทศไทยประสบความสำเร็จเป็นอย่างดีในการนำเอาความร้อนที่เกิดจากรังสีอาทิตย์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ เมื่อเทคโนโลยีมีความก้าวหน้ามากขึ้น ความต้องการของมนุษย์ก็ย่อมมีสูงขึ้นซึ่งส่งผลความต้องการทางด้านการใช้พลังงานด้วย จึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ให้เกิดประสิทธิภาพ และหลากหลายมากขึ้น เช่น การใช้เครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับโรงพยาบาลหรือโรงแรม การต้มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ การทำเตาพลังงานแสงอาทิตย์ การกลั่นน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น (กระทรวงพลังงาน, 2554)

พลังงานแสงอาทิตย์ ถือได้ว่าเป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่มีขนาดใหญ่ที่สุด เป็นพลังงานสะอาดและมีอยู่ทั่วไป และจัดเป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนที่ใช้แล้วไม่หมดไป ทำให้ปัจจุบันมีวิธีการสร้างระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์อย่างมากมาย เพื่อให้สามารถนำพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้งานได้

พลังงานแสงอาทิตย์อาจจำแนกเป็น 2 รูปแบบตามประโยชน์หรือการใช้ได้แก่ การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ และการผลิตพลังงานความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ (กระทรวงพลังงาน, 2554) ซึ่งการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ได้นั้นจะต้องมีอุปกรณ์ที่เป็นตัวกลางสำหรับเปลี่ยนรูปพลังงานทางแสงให้กลายเป็นพลังงาน และเนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่มีอยู่ทั่วไป ในการนำมาใช้ในภาคเกษตรกรรมจึงมีความนิยมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านของการ “เพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตร”

การพัฒนาพลังงานทดแทนจากพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับผลิตผลทางการเกษตรของไทย จึงเป็นแนวคิดหนึ่งที่น่าหวังแก้ปัญหาต่าง ๆ ให้กับเกษตรกร เนื่องจากผลิตผลทางการเกษตรในประเทศไทยส่วนใหญ่ อันได้แก่ ข้าว ผัก และผลไม้ ที่มีอยู่จำนวนมากในช่วงฤดูการมักเกิดปัญหามาโดยตลอด เช่น สินค้าล้นตลาด หรือบางฤดูกาลพืชผลทางการเกษตรมีมาก

เกินความต้องการของตลาด เป็นผลทำให้ราคาพืชผลในบางฤดูกาลมีราคาตกต่ำ ซึ่งในส่วนนี้ยังพบปัจจัยหลายประการ เช่น คุณภาพของสินค้าที่ไม่ได้มาตรฐาน ปัจจัยรวมด้านการจัดการทางการตลาดและการจำหน่าย ด้วยเหตุนี้เองเมื่อมองในมุมมองของเศรษฐศาสตร์แล้วย่อมส่งผลต่ออำนาจการต่อรองเพิ่มขึ้น และเกิดชะลอการซื้อผลผลิตเพื่อกตราคาสินค้า ซึ่งการหาแนวทางเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวประการหนึ่ง คือ การถนอมอาหารและการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร ด้วยวิธีการอบแห้งจากพลังงานแสงอาทิตย์

การอบแห้งจากพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรโดยใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อระเหยน้ำจากผลผลิตซึ่งจะอาศัยการพาความร้อน โดยทั่วไปสามารถแบ่งการอบแห้งจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อน ได้เป็น 3 แบบ แบบแรก คือ การพาความร้อนตามธรรมชาติ เป็นระบบที่เครื่องอบแห้งทำงานโดยอาศัยพลังงานแสงอาทิตย์และกระแสลมที่พัดผ่าน แบบที่สอง คือ การพาความร้อนแบบบังคับอากาศ เป็นระบบอบแห้งที่มีเครื่องช่วยให้อากาศไหลเวียนในทิศทางที่ต้องการ และแบบที่สาม คือ การอบแห้งแบบผสมผสาน เป็นระบบอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และยังต้องอาศัยพลังงานในรูปแบบอื่น ๆ ช่วยในเวลาที่มีแสงอาทิตย์ไม่สม่ำเสมอ หรือต้องการให้ผลผลิตทางการเกษตรแห้งเร็วขึ้น ซึ่งการพาความร้อนแบบบังคับอากาศ จะใช้พัดลมเป็นตัวสร้างความดันทำให้มีความแตกต่างของความดันมากพอที่จะทำให้อากาศร้อนปริมาณพอเหมาะไหลผ่านชั้นของวัสดุที่นำมาอบแห้ง เครื่องอบชนิดนี้เหมาะกับงานทั้งขนาดเล็ก และใหญ่ ต้องลงทุนมากขึ้น สร้างยากขึ้น แต่สามารถออกแบบให้การทำงานของระบบมีประสิทธิภาพและความเชื่อถือสูง (อนิรุทธ์ ต่ายขาว และสมบัติ ทิฆมทรัพย์, 2557)

ซึ่งการเก็บรักษาด้วยวิธีการแปรรูปในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อให้ผลผลิตสามารถนำไปจำหน่ายได้นั้น วิธีการหนึ่งที่เป็นที่ได้รับความนิยมอย่างมาก คือ การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ในการเก็บรักษาและแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร โดยการนำพลังงานธรรมชาตินี้มาใช้กับการถนอมรักษาอาหาร จึงได้มีการพัฒนาเครื่องอบแห้งในรูปแบบต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อให้สามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ให้มีอายุในการบริโภคได้ในระยะและมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะมีการนำเอาประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในกระบวนการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งมีความนิยมอย่างมาก แต่ด้วยเกษตรกรส่วนใหญ่เป็นเกษตรกรรุ่นหลังที่ยังมีแนวทางการจัดการผลผลิตในรูปแบบเดิม จึงทำให้ส่งผลกระทบต่อ การเข้าถึงเทคโนโลยีน้อยมาก อีกทั้งยังขาดความรู้ความเข้าใจในการนำพลังงานแสงอาทิตย์ไปใช้ให้เกิดประสิทธิผลอย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยส่วนใหญ่มักจะมองว่าการใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ ในการเข้ามาผสมผสานกับวิธีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบเดิมนั้น เป็นการเพิ่มต้นทุนใน

กระบวนการผลิต ยกตัวอย่างเช่น ในการถนอมอาหารด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นั้น จะต้องมีการสร้างอุปกรณ์ และการจัดหาเครื่องมือต่าง ๆ ทำให้เกิดความยุ่งยาก จึงมักจะถูกมองเป็นต้นทุน และความสูญเสียด้านเวลา ความเข้าใจในเรื่องของการถนอมอาหารของเกษตรกรในยุคแรกๆ จะเป็นการใช้เครื่องอบแห้งที่มีการนำพาความร้อนแบบธรรมชาติ หรือเรียกว่า “กล่องอบแห้ง” ซึ่งเป็นเครื่องอบแห้งที่ไม่มีการใช้ระบบระบายอากาศ และปัญหาที่เกิดขึ้นในช่วงแรกคือ ปัญหาด้านความชื้นสัมพัทธ์ เนื่องจากขาดการถ่ายเทความชื้น และมีพลังงานความร้อนไม่คงที่ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ในเครื่องอบแห้งดังกล่าวไม่มีคุณภาพ ต่อมาได้ถูกพัฒนาโดยใช้อุปกรณ์แผงรับรังสีรวม ในอุปกรณ์นี้ถูกออกแบบในลักษณะของเต็นท์ ใช้วัสดุทาสีดำนำไปไว้ใต้ถาดบรรจุผลิตภัณฑ์ และเพิ่มช่องระบายอากาศ แต่กระนั้นก็ยังพบว่าอุปกรณ์ดังกล่าวไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการอบแห้ง จึงทำให้การพัฒนาอุปกรณ์ในเวลาต่อมาจึงมองว่าควรหาวิธีที่จะช่วยเพิ่มอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งให้สูงขึ้น เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการอบแห้งที่มากขึ้น โดยใช้แผงรับรังสีจากแสงอาทิตย์มาเป็นตัวช่วยในการเพิ่มการติดตั้งพัดลมระบายอากาศในการพัฒนาดังกล่าว ก็ยังพบปัญหาด้านการควบคุมความร้อน และการใช้พื้นที่ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องติดตั้งส่วนของแผงรับรังสีแยกจากตัวเครื่องอบแห้ง

จากการพัฒนาการอบแห้งที่ผ่านมา ยังพบอีกว่า เมื่อมีการแปรรูปแล้ว ผลผลิตที่ได้จะมีการปนเปื้อนจากการรบกวนของแมลง ฝุ่นละออง ซึ่งไม่ได้มาตรฐาน จนทำให้ผลผลิตบางส่วนไม่สามารถนำออกจำหน่ายได้ นอกจากนี้ยังไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดระยะเวลาในการใช้ความร้อนได้ รวมทั้งไม่สามารถควบคุมระดับความร้อนตามที่ต้องการได้ ส่งผลให้ผลผลิตมีสีสันทึบที่ไม่สวยงาม และมีความชื้น ด้วยข้อจำกัดบางประการในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นปัญหาในการอบแห้ง ที่ส่งผลต่อการปนเปื้อน อันเนื่องมาจากปัจจัยด้านสภาพอากาศที่ไม่เอื้ออำนวยในฤดูฝน จึงเป็นอุปสรรคในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้ง ทำให้การใช้งานความร้อนจากแสงอาทิตย์ จึงยังไม่สามารถทำได้อย่างเต็มประสิทธิภาพเท่าที่ควร

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาระบบการควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อให้สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้น และคงไว้ซึ่งการเพิ่มมูลค่าของพืชผลทางการเกษตรด้วยหลักการใช้พลังงานสะอาดอย่างแท้จริง อีกประการหนึ่งคือ การใช้ระบบอุปกรณ์ควบคุม ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มที่ใช้สำหรับการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับสิ่งแวดล้อมทางกายภาพและรวมถึงผู้ใช้ มักถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายมากในปัจจุบัน ซึ่งในกรณีศึกษาครั้งนี้ การนำระบบดังกล่าวเข้ามาประยุกต์ใช้ร่วมกับ อุปกรณ์ดังกล่าว จะสามารถอ่านค่าเซ็นเซอร์และส่งข้อมูลไปเก็บไว้ ดังนั้นการสร้างชุดคำสั่งเพื่อใช้สำหรับการควบคุมตู้อบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ จะทำให้ตรงตาม

คุณลักษณะและหลักการใช้งานที่ตรงกับการใช้งานอย่างแท้จริง โดยช่วงเวลากลางวันจะใช้พลังงานความร้อนจากรังสีแสงอาทิตย์ และในช่วงเวลากลางคืนหรือช่วงที่ไม่มีแสงอาทิตย์จะใช้ความร้อนจากไฟฟ้า โดยทั้งหมดจะควบคุมและแสดงผลผ่านระบบสารสนเทศ และทำการสร้างอัลกอริทึม เพื่อให้สามารถอธิบายขั้นตอนต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจน เช่น การนำเข้าข้อมูลผลลัพธ์ของข้อมูล ซึ่งจะต้องทำเป็นขั้นตอน และมีส่วนที่จะต้องทำซ้ำ จนกระทั่งเสร็จสิ้นกระบวนการทำงาน

ดังนั้น การควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ จึงถือเป็นการพัฒนาโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เพิ่มกำลังผลิต และเพิ่มความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ อีกทั้งยังสามารถช่วยแก้ปัญหาให้กับเกษตรกร ด้วยการใช้พลังงานทดแทนที่ผนวกกับเทคโนโลยีที่ทันสมัย ซึ่งเป็นระบบสารสนเทศในการควบคุมการใช้พลังงาน เพื่อให้ผลผลิตที่ออกมานั้นมีคุณภาพ สามารถลดต้นทุนในกระบวนการแปรรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสร้างอัลกอริทึมควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิ ของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์
2. เพื่อเสนอแนะแนวทางการจัดการพลังงานเพื่อความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ขอบเขตการวิจัย

1. ขอบเขตด้านเนื้อหา

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา แนวคิด ทฤษฎี ตำรา และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในเรื่องของระบบกักเก็บพลังงาน ทฤษฎีการอบแห้ง ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) การเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน และการสร้างอัลกอริทึม

2. ขอบเขตด้านพื้นที่การวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา โดยเก็บที่ข้อมูลกลุ่มกล้วยอบราชสาส์น อำเภอราชสาส์น จังหวัดฉะเชิงเทราและกลุ่มจักสารผักตบชวา อำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา

3. ขอบเขตด้านระยะเวลาของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดระยะเวลาที่ใช้ในการทำวิจัยทั้งสิ้น เริ่มตั้งแต่ เดือน ตุลาคม 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2566

สมมติฐานของการวิจัย

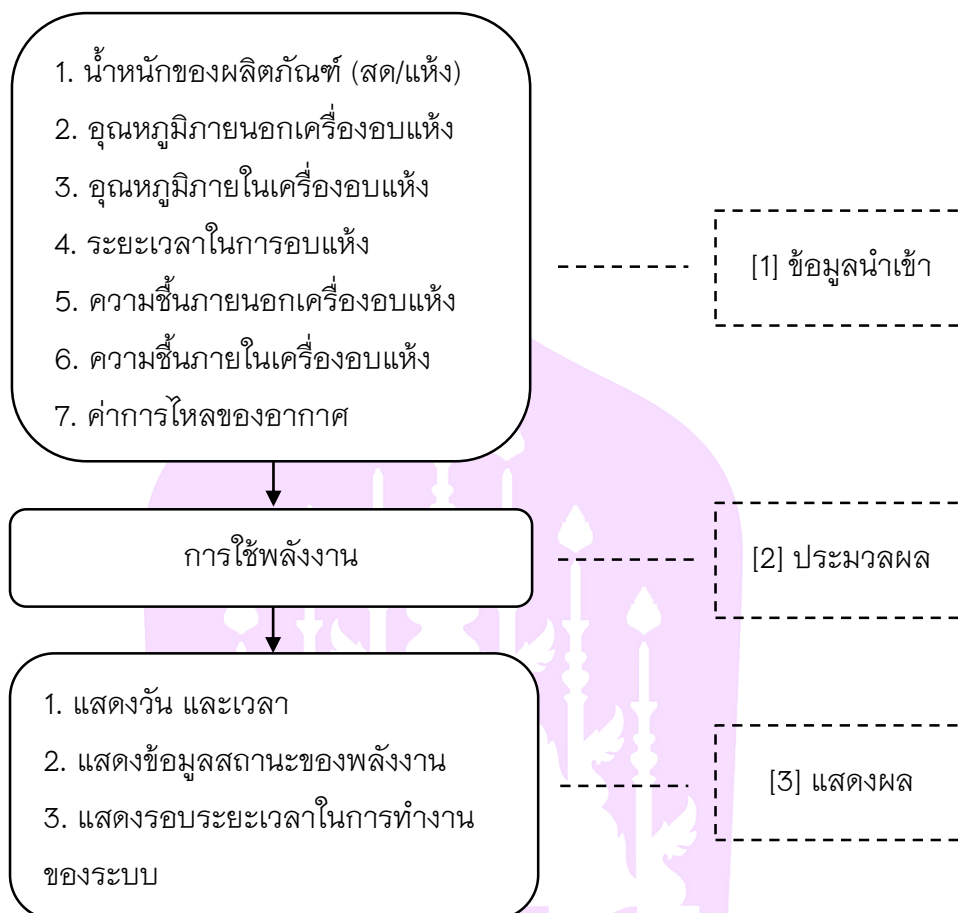
อัตราการไหลของอากาศมีผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยสัมพันธ์ต่อความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิของอากาศ

ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย

1. สามารถนำโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ไปใช้เพื่อเพิ่มมูลค่าของสินค้าที่ก่อให้เกิดการสูญเสียโดยเปล่าประโยชน์ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มผลกำไร ลดต้นทุน และเพิ่มประสิทธิภาพให้กับพืชผลทางการเกษตร
2. สามารถนำโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ไปใช้ในกระบวนการถนอมอาหาร เพื่อช่วยลดระยะเวลาในการติดตามระดับของแสงอาทิตย์ และความชื้นของผลิตภัณฑ์ และยังสามารถควบคุมระยะเวลา และความต่อเนื่องในการใช้พลังงานจากการจัดการของระบบสารสนเทศ
3. เป็นแนวทางให้กับผู้ที่สนใจและเพิ่มทางเลือกให้กับผู้ประกอบการธุรกิจอาหารอบแห้ง และการอบไล่ความชื้นต่าง ๆ ที่สามารถลดการใช้พลังงาน และมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพได้มากขึ้น

กรอบแนวคิดการวิจัย

ผู้วิจัยกำหนดกรอบแนวคิดการวิจัยเพื่อเป็นแนวทางการศึกษาเป็นลำดับขั้นตอน ในการสร้างอัลกอริทึมควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ดังแสดงตามภาพ 1



ภาพ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

นิยามศัพท์เฉพาะ

โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก หมายถึง โรงอบแห้ง ที่ใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก โดยใช้หลักการของปรากฏการณ์เรือนกระจก เมื่อรังสีดวงอาทิตย์ส่องผ่านเรือนกระจกหรือพลาสติก เข้าไปภายในจะถูกผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบต่าง ๆ ภายในเรือนกระจกดูดกลืนรังสีแล้วเปลี่ยนเป็นความร้อน วัสดุภายในโรงเรือนจะแผ่รังสีอินฟราเรดออกมา แต่ไม่สามารถผ่านกระจกออกมาภายนอกได้ ทำให้อุณหภูมิในเรือนกระจกสูงขึ้น และถ่ายเทความร้อนให้กับผลผลิต ซึ่งจะช่วยให้ น้ำในผลผลิตระเหยออกมาได้เร็วกว่าการตากแห้งแบบธรรมดา

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยครั้งนี้ เป็นการสร้างอัลกอริทึมควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ในบทนี้ผู้วิจัย ได้ทำการรวบรวมแนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำไปใช้ประกอบการศึกษา และการอภิปรายผล ดังต่อไปนี้ ระบบกักเก็บพลังงาน ทฤษฎีการอบแห้ง ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพทางความร้อน ไมโครคอนโทรลเลอร์ การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนและระยะเวลาคืนทุน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบกักเก็บพลังงาน

1. ความหมายของระบบกักเก็บพลังงาน

ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy storage system: ESS) หมายถึง การกักเก็บพลังงานไว้เพื่อการใช้งานในเวลาอื่นที่จำเป็น เพื่อระบบและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่สามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยระบบกักเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพต้องอยู่ภายใต้ความสูญเสียในกระบวนการแปลงรูปที่น้อยที่สุด มีการศึกษาของนักการศึกษาที่ชี้ให้เห็นว่า ระบบกักเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพมีประโยชน์ต่อการใช้งานในอนาคต ดังนี้

ระบบกักเก็บพลังงานนั้นมีหลากหลายรูปแบบและมีตั้งแต่ขนาดเล็ก เช่น แบตเตอรี่ โทรศัพท์ ไปจนถึงขนาดใหญ่ เช่น โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบสูบกลับ (Pumped-Storage Hydropower Plant) เป็นต้น อุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่เห็นได้ชัดและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายคือแบตเตอรี่ (กระทรวงพลังงาน, 2554) การศึกษาของ ชีระภัทร์ แมนมิตร (2558) ที่ได้ศึกษาระบบกักเก็บพลังงานโดยใช้แบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับผู้บริโภคที่มีการคิดอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาการใช้งาน และได้ข้อสรุปว่า ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น พิกัดการชาร์จ, ชนิดของแบตเตอรี่ที่นำมาใช้ให้ และการเลือกใช้อัตราค่าไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟ จะส่งผลกับค่าผลตอบแทนทางการเงินที่ได้จากการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน ดังนั้นในการนำไปใช้โปรแกรมที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นไปใช้งาน ควรมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในแต่ละกรณี

ปิติภัทร ธีระเกียรติ (2560) ได้ศึกษาโครงสร้างค่าไฟฟ้าสำหรับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีระบบกักเก็บพลังงาน พบว่า การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อใช้เอง

ในบ้านร่วมกับการกักเก็บพลังงาน (PV-Storage Hybrid) เป็นทางเลือกที่น่าสนใจมากขึ้นสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้า และการใช้โครงสร้างค่าไฟฟ้าแบบพิเศษ ทำให้ค่าใช้จ่ายไฟฟ้าช่วงเวลา 25 ปี ประหยัด 433,277 บาท หรือ คิดเป็น 22 % จากโครงสร้างค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาปกติในปัจจุบัน และเมื่อเปรียบเทียบผลตอบแทนทางการเงิน พบว่าการใช้โครงสร้างค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาแบบพิเศษมีระยะเวลาคืนทุนลดลงจากเดิม 2.2 ปี และมีอัตราผลตอบแทนภายในเพิ่มขึ้น 2 % โดยอธิบายว่า ประโยชน์ของ เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานไฟฟ้า (Electrical energy storage) คือสามารถใช้ได้กับทุกส่วนของระบบในการผลิตไฟฟ้า สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าสำรองในภาวะไฟฟ้าขัดข้อง หรือเป็น Standby reserve
2. การจัดเก็บพลังงานในเวลากลางคืน เพื่อไว้ใช้ในเวลากลางวัน ด้วยการซื้อและสะสมพลังงานไฟฟ้าราคาถูกในช่วง Off-Peak และนำไปขายคืนในช่วง On-Peak
3. ลดหรือเลื่อนความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak-Demand) และรักษาคุณภาพไฟฟ้าที่ให้บริการผู้ใช้โดยการรักษารูปคลื่น (Peak Shave)

4. เพิ่มเสถียรภาพของระบบผลิตไฟฟ้า ด้วยการควบคุมแรงดันทางไฟฟ้า และชะลอการลงทุนสำหรับการสร้างโรงไฟฟ้าเพิ่ม

2. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเก็บพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ

การเปรียบเทียบการเก็บพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ (กิตติมา งามสาย และอมรชัย อภรณ์วิชานพ, 2556) สามารถเปรียบเทียบเทคโนโลยีการเก็บพลังงานโดยพิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

ความก้าวหน้าของเทคโนโลยี แบ่งเป็น 3 ประเภท

1. เทคโนโลยีที่สมบูรณ์แบบแล้ว ได้แก่ การเก็บพลังงานโดยใช้การปั้มน้ำเก็บไว้และแบตเตอรี่ตะกั่ว ซึ่งมีการใช้งานมากกว่า 100 ปี

2. เทคโนโลยีที่พัฒนาแล้ว ได้แก่ การเก็บพลังงานโดยการอัดอากาศเก็บไว้ แบตเตอรี่นิเกิล-แคดเมียม แบตเตอรี่โซเดียมซัลเฟอร์ แบตเตอรี่โซเดียม-นิเกิล-คลอไรด์ แบตเตอรี่ลิเทียม แบตเตอรี่ที่มีการไหลของส่วนเก็บพลังงาน การเก็บพลังงานโดยใช้สนามแม่เหล็กของตัวนำยิ่งยวด ล้อตุ้มกำลัง ตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุแบบพิเศษ และการเก็บพลังงานความร้อน เทคโนโลยีเหล่านี้ได้รับการพัฒนาและเป็นสินค้าแล้ว แต่ยังไม่แพร่หลายเนื่องจากยังต้องการความมั่นใจในการทดสอบมากกว่านี้

3. เทคโนโลยีที่กำลังพัฒนา ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิง ยังอยู่ในขั้นตอนของการพัฒนา แต่มีศักยภาพที่สามารถใช้งานได้ในทางอุตสาหกรรมในอนาคต เนื่องจากมีความหนาแน่นของพลังงานสูงและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ

ความเหมาะสมในการใช้งาน แบ่งเป็น 3 ลักษณะ

1. สำหรับการจัดการพลังงาน ระบบที่นิยมใช้งานในลักษณะนี้ ได้แก่ การเก็บพลังงานโดยใช้การปั้มน้ำเก็บไว้ การเก็บพลังงานโดยการอัดอากาศเก็บไว้ ซึ่งสามารถใช้กับระบบขนาดใหญ่โดยใช้เป็นตัวปรับระดับของโหลด (Load Leveling) ตัวตามโหลด (Ramping/load Following) และตัวสำรองการหมุน (Spinning Reserve)

2. สำหรับการปรับคุณภาพของพลังงาน ระบบที่นิยมใช้งานในลักษณะนี้ ได้แก่ ล้อตุ่นกำลัง แบตเตอรี่ การเก็บพลังงานโดยใช้สนามแม่เหล็กของตัวนำยิ่งยวด ตัวเก็บประจุและตัวเก็บประจุแบบพิเศษ เนื่องจากมีการตอบสนองที่รวดเร็ว (มิลลิวินาที)

3. ตัวเชื่อมต่อนพลังงาน ระบบที่นิยมใช้งานในลักษณะนี้ ได้แก่ แบตเตอรี่ แบตเตอรี่ที่มีการไหลของส่วนเก็บพลังงาน เซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากการตอบสนองที่รวดเร็ว (< 1 วินาที) และมีช่วงเวลาของการคายประจุที่นาน (เป็นชั่วโมง)

ช่วงเวลาการเก็บพลังงาน พิจารณาจากช่วงเวลาของการเกิดการคายพลังงานออกเอง(Self-Discharge) ถ้าเกิดได้ต่ำแสดงว่าสามารถเก็บพลังงานได้นาน แต่ถ้าเกิดได้สูงแสดงว่าสามารถเก็บพลังงานไว้ได้แค่ช่วงเวลาสั้น ๆ

1. อัตราการเกิดการคายพลังงานออกเองที่ต่ำ ได้แก่ การเก็บพลังงานโดยใช้การปั้มน้ำเก็บไว้ การเก็บพลังงานโดยการอัดอากาศเก็บไว้ เซลล์เชื้อเพลิงและแบตเตอรี่ที่มีการไหลของส่วนเก็บพลังงาน

2. อัตราการเกิดการคายพลังงานออกเองปานกลาง ได้แก่ แบตเตอรี่ตะกั่ว นิกเกิล-แคดเมียม ลิเทียม และการเก็บพลังงานความร้อน เหมาะสำหรับการเก็บพลังงานที่ไม่ยาวนานกว่า 10 วัน

3. อัตราการเกิดการคายพลังงานออกเองสูง ประมาณ 10-40 % ต่อวัน ได้แก่ แบตเตอรี่โซเดียมซัลเฟอร์ แบตเตอรี่ โซเดียม-นิกเกิล-คลอไรด์ การเก็บพลังงานโดยใช้สนามแม่เหล็กของตัวนำยิ่งยวด ตัวเก็บประจุและตัวเก็บประจุแบบพิเศษ ในส่วนของล้อตุ่นกำลัง จะเกิดการคายพลังงานออกเอง 100 % ใน 1 วัน

4. ราคาต้นทุน ประกอบด้วย ราคาต้นทุนการก่อสร้างและราคาต่อจำนวนรอบของการใช้งาน โดยราคาต้นทุนการก่อสร้างจะคิดเทียบกับปริมาณพลังงาน (Wh) หรือกำลังไฟฟ้า (W) ซึ่งพบว่า การเก็บพลังงานโดยการอัดอากาศเก็บไว้ มีต้นทุนการก่อสร้างต่ำ

ที่สุด รองลงมาคือ การเก็บพลังงานโดยใช้การปั้มน้ำเก็บไว้ แบตเตอรี่และแบตเตอรี่ที่มีการไหลของส่วนเก็บพลังงาน ส่วนการเก็บพลังงานโดยใช้สนามแม่เหล็กของตัวนำยิ่งยวด ล้อตุนกำลังตัวเก็บประจุและตัวเก็บประจุแบบพิเศษ มีราคาค่อนข้างสูง เมื่อคิดเทียบกับความสามารถในการเก็บพลังงาน แต่มีราคาถูกเมื่อคิดเทียบกับการประยุกต์ใช้สำหรับกำลังไฟฟ้าที่สูงและระยะเวลาสั้น ๆ เมื่อพิจารณาเป็นราคาต่อจำนวนรอบของการใช้งาน พบว่า การเก็บพลังงานโดยใช้การปั้มน้ำเก็บไว้และการเก็บพลังงานโดยการอัดอากาศเก็บไว้ มีราคาต่ำที่สุด รองลงมาคือ แบตเตอรี่และแบตเตอรี่ที่มีการไหลของส่วนเก็บพลังงานและเซลล์เชื้อเพลิงมีราคาสูงที่สุด

5. ประสิทธิภาพของการจ่ายและเก็บพลังงานในแต่ละรอบของการทำงาน ประสิทธิภาพในแต่ละรอบของการทำงานหาได้จากสัดส่วนของพลังงานที่เก็บได้จากระบบและพลังงานที่จ่ายให้แก่ระบบ โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มได้ดังนี้

5.1 ประสิทธิภาพสูงมาก นั่นคือ ประสิทธิภาพในแต่ละรอบของการทำงานสูงกว่า 90% ได้แก่ การเก็บพลังงานโดยใช้สนามแม่เหล็กของตัวนำยิ่งยวด ล้อตุนกำลังตัวเก็บประจุแบบพิเศษและแบตเตอรี่ลิเทียม

5.2 ประสิทธิภาพสูง โดยประสิทธิภาพในแต่ละรอบอยู่ระหว่าง 60–90 % ได้แก่ การเก็บพลังงานโดยใช้การปั้มน้ำเก็บไว้ การเก็บพลังงานโดยการอัดอากาศเก็บไว้ แบตเตอรี่ (ยกเว้นแบตเตอรี่ลิเทียม) แบตเตอรี่ที่มีการไหลของส่วนเก็บพลังงาน และตัวเก็บประจุ

5.3 ประสิทธิภาพต่ำ ประสิทธิภาพในแต่ละรอบต่ำกว่าประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงและการเก็บพลังงานความร้อน

6. ความหนาแน่นของพลังงานและกำลัง ความหนาแน่นของพลังงาน (Energy Density) และความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (Power Density) คือ อัตราการจ่ายพลังงาน หรือกำลังไฟฟ้าต่อหน่วยปริมาตร หรือมวล แบ่งเป็น 3 กลุ่ม

6.1 ความหนาแน่นของพลังงานสูงมาก ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงประมาณ 1,000 Wh/kg

6.2 ความหนาแน่นของพลังงานปานกลาง ได้แก่ แบตเตอรี่ การเก็บพลังงาน ความร้อนและการเก็บพลังงานโดยการอัดอากาศเก็บไว้

6.3 ความหนาแน่นของพลังงานต่ำ ได้แก่ การเก็บพลังงานโดยใช้การปั้มน้ำเก็บไว้ การเก็บพลังงานโดยใช้สนามแม่เหล็กของตัวนำยิ่งยวด ตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุแบบพิเศษและล้อตุนกำลังประมาณ 30 Wh/kg

7. อายุการใช้งานและจำนวนรอบของการใช้งาน การพิจารณาเลือกใช้เทคโนโลยีการเก็บพลังงานบางกรณีจะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานว่า ต้องการอายุการใช้งานที่นานหรือจำนวนรอบของการใช้งานที่สูง

7.1 เทคโนโลยีที่มีจำนวนรอบการใช้งานสูงกว่า 20,000 รอบ ได้แก่ การเก็บพลังงานโดยใช้สนามแม่เหล็กของตัวนำยิ่งยวด ตัวเก็บประจุและตัวเก็บประจุแบบพิเศษ

7.2 เทคโนโลยีที่มีอายุการใช้งานนานโดยขึ้นอยู่กับกลไกที่เป็นส่วนประกอบ ได้แก่ การเก็บพลังงานโดยใช้การบีมน้ำเก็บไว้ การเก็บพลังงานโดยการอัดอากาศเก็บไว้ ล้อตุนกำลังและการเก็บพลังงานความร้อน

7.3 เทคโนโลยีที่มีอายุการใช้งานที่ไม่ยาวนานมาก ได้แก่ แบตเตอรี่ แบตเตอรี่ที่มีการไหลของส่วนเก็บพลังงานและเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากมีความเสื่อมประสิทธิภาพจากปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นน้อยลง เมื่อมีการใช้งานที่นานขึ้น

8. ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีการเก็บพลังงานช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในแง่ของการไม่ต้องผลิตพลังงานมากกว่าที่จำเป็น อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีการเก็บพลังงานเหล่านี้ยังคงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมบ้าง เช่น การเก็บพลังงานโดยใช้การบีมน้ำเก็บไว้ มีผลกระทบในแง่ของการทำลายต้นไม้และระบบนิเวศจากการสร้างอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ การเก็บพลังงานโดยการอัดอากาศเก็บไว้ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในส่วนของการทำงานของกังหันที่ใช้กับก๊าซ ซึ่งเป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลแล้วปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมา แบตเตอรี่และแบตเตอรี่ที่มีการไหลของส่วนเก็บพลังงาน มีผลกับสิ่งแวดล้อมในเรื่องของความเป็นพิษจากสารเคมีตกค้างเป็นเวลานาน การเก็บพลังงานโดยใช้สนามแม่เหล็กของตัวนำยิ่งยวด ระหว่างการทำงานมีการปลดปล่อยสนามแม่เหล็กที่แรงซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์

3. ข้อคำนึงในการเลือกใช้การกักเก็บพลังงาน

สิ่งที่ควรคำนึงถึงในการเลือกใช้เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงาน (Beaudin, M., Zareipour, H., Achellenberglabe, A. and Rosehart, W., 2010) เพื่อให้ได้เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานที่ตรงตามวัตถุประสงค์การใช้งานและมีความเหมาะสมที่สุด จึงควรคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้

- 3.1 กำลังไฟฟ้าและพลังงาน
- 3.2 อายุการใช้งาน
- 3.3 จำนวนรอบของการใช้งาน
- 3.4 อัตราการคายประจุออกเอง
- 3.5 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

3.6 ประสิทธิภาพในแต่ละรอบ

3.7 ราคา

3.8 ความทนทานในการใช้งาน

3.9 ความก้าวหน้าของเทคโนโลยี

จึงสรุปได้ว่า ระบบกักเก็บพลังงาน คือ ระบบและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่สามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานในรูปแบบอื่นเพื่อให้สามารถกักเก็บไว้เพื่อการใช้งานในเวลาอื่นที่จำเป็นได้ โดยระบบกักเก็บพลังงานจะแปลงพลังงานที่กักเก็บไว้ในกลับมาเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกครั้งเมื่อมีความต้องการใช้ไฟฟ้า ทั้งนี้ ระบบกักเก็บพลังงานที่ดีจะต้องลดความสูญเสียในการแปลงรูปพลังงานให้เหลือน้อยที่สุด

ทฤษฎีการอบแห้ง

1. ความหมายของการอบแห้ง

การอบแห้ง (Drying) คือ การกำจัดความชื้นหรือน้ำที่มีอยู่ในวัสดุให้ลดลงจนมีความชื้นอยู่ในปริมาณที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา และมีค่าอีกค่าหนึ่งซึ่งเรามักจะพบอยู่เป็นประจำคือ การทำแห้ง (Dehydration) ซึ่งเป็นการกำจัดความชื้นหรือน้ำออกจากวัสดุจนกระทั่งวัสดุนั้นไม่มีความชื้นหรือเข้าใกล้มวลแห้ง การอบแห้งเป็นกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวที่สำคัญกระบวนการหนึ่งเพื่อให้ผลผลิตทางการเกษตรมีความเหมาะสมต่อการเก็บรักษา คือสามารถยืดอายุการเก็บรักษาไว้ได้นานโดยไม่เสียหายเนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทั้งนี้เนื่องจากผลผลิตทางการเกษตรส่วนใหญ่จะมีความชื้นค่อนข้างสูงขณะทำการเก็บเกี่ยวทำให้เก็บรักษาได้ไม่นาน การอบแห้งจะช่วยให้สามารถเก็บรักษาผลผลิตได้เป็นระยะเวลายาวนานขึ้น ผลผลิตทางการเกษตรที่สำคัญและต้องทำการอบแห้งได้แก่ ธัญพืช ผลไม้ ผลิตภัณฑ์ผลไม้ แอ้ม ผัก สมุนไพร เป็นต้น ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ อัตราการไหลของอากาศ และประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง โดยพฤติกรรมของการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการพาความชื้นออกจากวัสดุ เมื่อสมมติให้ อุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วของอากาศเหนือผิวของวัสดุอบแห้งมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการและมีการถ่ายเทความร้อนสู่วัสดุโดยการพาความร้อน

2. ประเภทของการอบแห้ง

ประเภทของการอบแห้งจะพิจารณาจากการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของแข็งเปียกกับก๊าซร้อนเป็นเกณฑ์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้ (จุไรวัลย์รัตน์พิสิฐ, 2549)

2.1 การอบแห้งแบบไหลเวียนผ่านผิว (Cross-circulation drying) การอบแห้งที่ ความร้อนไหลขนานกับผิวของ ของแข็ง อาจจะไหลผ่านผิวด้านบนหรือผ่านผิวด้านล่าง หรือ ผ่านทั้งสองด้าน ตัวอย่างเครื่องอบแห้งประเภทนี้ คือ เครื่องอบแห้งแบบถาด (Tray dryer) ข้อ ควรระวังในการใช้งาน ควรเรียงวัสดุของแข็งเป็นชั้นเดียว หรือเป็นชั้นบาง ๆ

2.2 การอบแห้งแบบไหลเวียนแทรกผ่าน (Through-circulation drying) ของแข็งที่ จะทำการอบแห้ง ถูกวางบนตะแกรงและให้ ก๊าซร้อนเคลื่อนที่แทรกผ่านชั้นของแข็ง ความร้อน อาจเคลื่อนที่จากผิวด้านบนสู่ผิวด้านล่างของของแข็ง และผ่านตะแกรงออกไป ข้อควรระวังใน การใช้งาน ควรปรับความเร็วของก๊าซร้อนไม่ให้สูงเกินไปถ้าก๊าซร้อนมี ความเร็วสูง จะพัดพา ของแข็งออกจากเครื่องได้

2.3 การอบแห้งแบบโปรย (Showering drying) การอบแห้งที่ของแข็งถูกตักขึ้นและ โปรยลงสู่ด้านล่าง จะมี ก๊าซร้อนเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มของแข็ง ตัวอย่างเครื่องอบแห้งประเภทนี้ คือ เครื่องอบแห้งแบบหมุน (Rotary dryer) ข้อควรระวังในการใช้งาน วัสดุที่เป็นผงละเอียดต้องใช้ ความระมัดระวังในการอบแห้ง เพราะก๊าซร้อนอาจพัดพาวัสดุออกจากเครื่องอบ ทำให้เกิดการ สูญเสียของแข็ง

2.4 การอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์ (Fluidized drying) การอบแห้งที่วัสดุของแข็งถูก วางบนตะแกรงเป็นชั้นของแข็งและมีการให้ ก๊าซร้อนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเหมาะสมผ่าน ตะแกรงเข้าสู่ด้านล่างของชั้นของแข็งและออกไปทางด้านบน ส่งผลให้กลุ่มของแข็งมีลักษณะ เป็นฟลูอิดไดซ์ ข้อควรระวังในการใช้งาน ควรปรับความเร็วของก๊าซร้อนให้เหมาะสม ไม่ควรต่ำ เกินไปเพราะจะทำให้ของแข็งไม่เกิดเอนทรานเมนต์ของวัสดุที่เป็นผงละเอียด

2.5 การอบแห้งแบบนิวเมติก (Pneumatic drying) การอบแห้งที่มี การขนส่งวัสดุ ของแข็งเกิดขึ้นพร้อมกัน โดยใช้ความเร็วของก๊าซร้อนทำให้ของแข็งเคลื่อนที่ไปยังปลายทาง พร้อมกับลดความชื้นภายในวัสดุของแข็งนั้น

3. ชนิดของเครื่องอบที่พบทั่วไปในอุตสาหกรรม

ชนิดของเครื่องอบแห้งที่สามารถพบได้ในอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ประกอบด้วย (พิมพ์พิเศษ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนปนนท์, 2557)

3.1 เครื่องอบแห้งแบบถาด (Tray Drying) เป็นการอบแห้งที่อาศัยลมร้อนจาก แหล่งความร้อน อาจเป็นก๊าซหุงต้มหรือคอลลี ไอน้ำ ลมร้อนจะไหลผ่านของแข็งที่วางเป็นชั้นบาง ๆ ในชั้นอาจมีรูพรุนหรือไม่มีรูพรุนก็ได้ มีระบบบังคับทิศทางการไหลของลมร้อนภายในเครื่องโดยใช้แผ่นเหล็กบาง ๆ กั้น เพื่อให้ลมร้อนไหลอย่างสม่ำเสมอและทั่วถึงทุกส่วนนิยมใช้ในโรงงานที่มี กำลังผลิตไม่สูงมากนัก เช่น ในอุตสาหกรรมอาหารและยา การแปรรูปไม้เป็นต้น

3.2 เครื่องอบแห้งแบบสายพาน (Belt drier) เป็นการอบแห้งที่ของแข็งจะถูกวางเรียงให้กระจายสม่ำเสมอบนสายพานที่มีลักษณะเป็นตะแกรง โปร่ง ให้อากาศผ่านได้ บริเวณที่อบแห้งมีลักษณะเป็นอุโมงค์อบแห้งที่มีลมร้อนเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อนออกจากของแข็ง แหล่งความร้อนอาจเป็นแก๊สหรือไอน้ำร้อน นิยมใช้ อบแห้งกับวัสดุที่เป็นเมล็ด ผัสดิบ เพสท์ เด็ก กรอง เป็นต้น

3.3 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer) เป็นการอบแห้งที่ใช้กับสารที่เป็นสารละลายและสเลอรรี่ (เป็นสารแขวนลอยในของเหลว) ซึ่งจะถูกทำให้กระจายและกลายเป็นอนุภาคหรือหยดน้ำเล็ก ๆ และพ่นเข้าไปในกระแสของลมร้อน กระบวนการทำงาน สารละลายถูกพ่นฝอยผ่านหัวฉีด (Nozzle หรือ Atomizer) ที่ติดตั้งอยู่ด้านบนของคอลัมน์ทรงกระบอก ซึ่งฉีดสารละลายป้อนให้เป็นละอองหรือหยดเล็ก ๆ และเคลื่อนตกลงมาด้านล่างโดยสัมผัสกับอากาศร้อน ทำให้น้ำในละอองระเหยเป็นไอออกไปอย่างรวดเร็วได้เป็นผลวัสดุที่แห้งและเคลื่อนที่ตกลงมาทางด้านล่างและถูกนำออกจากเครื่องอบแห้ง นิยมใช้ อุตสาหกรรมการผลิต กาแฟสำเร็จรูป นมผง ผงซักฟอก เป็นต้น

3.4 เครื่องอบแห้งแบบถังหมุน (Rotary drier) หลักการทำงาน เครื่องอบแห้งประเภทนี้ประกอบด้วย ตัวถังอบ เป็นทรงกระบอกวางนอนหรือวางเอียงเล็กน้อย ป้อนวัสดุที่ต้องการอบเข้าด้านบนของเครื่อง จะมีการเป่าลมร้อนเข้าบริเวณแกนกลางของเครื่องอบหรือผ่านทางด้านล่าง ผ่านชั้นของผลผลิต ถังอบหมุนรอบตัวอย่างช้า ๆ หรือหมุนเป็นช่วง ๆ ภายในถังจะมีการติดตั้งครีบทักวัสดุขึ้นไปแล้วโปรยจากด้านบน วัสดุจะมีการคลุกเคล้ากันตลอดเวลา ทำให้การอบแห้งสม่ำเสมอ วัสดุที่อบแห้งเสร็จแล้วจะเคลื่อนที่ออกทางช่องเปิดด้านล่าง นิยมใช้ในอุตสาหกรรมซีเมนต์ เกลือ น้ำตาล เป็นต้น

3.5 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum drier) หลักการทำงาน ประกอบด้วยลูกกลิ้งทรงกระบอกหนึ่งลูก หรือสองลูก ลูกกลิ้งมักทำด้วยเหล็กปอดสนนิม ผิวเรียบ ภายในลูกกลิ้งกลวงและได้รับความร้อนจากด้านในด้วยไอน้ำ หรือไฟฟ้า มีระบบป้อนสารละลายทำให้สารละลายเหลวชั้น เคลือบผิวลูกกลิ้งเป็นฟิล์มบาง เกิดการถ่ายเทความร้อนจากผิวของลูกกลิ้งไปยังฟิล์มของสารละลายด้วยการนำความร้อนเมื่อลูกกลิ้งเคลื่อนที่ไปครบรอบ สารละลายจะแห้งพอดีแล้วถูกขูดออกด้วยใบมีด สารละลายแห้งมีลักษณะเป็นแผ่นบาง อาจนำมาผ่านการบดให้เป็นผงละเอียด นิยมใช้ ทำแห้งสารละลายที่มีลักษณะเป็นของเหลวข้นหนืด เช่น น้ำแป้งสุก ผลไม้บด เช่น กัลฉ่าย ทุเรียน

3.6 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed dryer) หลักการทำงาน ของแข็งเปียกถูกป้อนเข้าทางด้านบนของเครื่อง อากาศร้อนถูกป้อนเข้าสู่ทางด้านล่างของเครื่องโดย

ความเร็วที่เหมาะสม เพื่อควบคุมให้ของแข็งเกิดการ พลุติดโตซ์ ในเครื่องอบแห้งมีการติดแผ่นกระจาย เพื่อทำหน้าที่กระจายทิศทางกาโรไหลของอากาศให้มีความสม่ำเสมอบนพื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์พลุติดโตซ์ ของแข็งขนาดใหญ่ที่แห้งขึ้นออกทางด้านข้างค่อนมาด้านล่าง ของแข็งขนาดเล็กที่แห้งขึ้นอาจติดรวมไปกับอากาศ จึงมีการติดตั้งระบบไซโคลนเพื่อดักของแข็งขนาดเล็กให้แยกออกมาจากอากาศร้อน ก่อนปล่อยอากาศร้อนทิ้งไป

4. ปัจจัยที่ส่งผลต่อการอบแห้ง

อัตราการอบแห้งวัสดุโดยทั่วไปที่ใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการส่งผ่านความร้อนจะเกิดขึ้นช้าหรือเร็วขึ้นมีปัจจัยที่สำคัญซึ่งมีผลต่ออัตราการอบแห้งคือ

4.1 ลักษณะทางธรรมชาติของวัสดุ เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งของวัสดุ ถ้าสภาพทางธรรมชาติของวัสดุเอื้ออำนวยต่อการส่งผ่านความร้อนไปยังโมเลกุลของน้ำภายในเนื้อวัสดุและเอื้ออำนวยต่อการเคลื่อนที่ของไอน้ำออกจากวัสดุ เช่น วัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนโมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุสามารถเคลื่อนที่ออกมาได้ง่ายทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

4.2 ขนาดและรูปร่างของวัสดุ วัสดุที่มีขนาดและรูปร่างที่ทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรมาก จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนให้ทั่วชิ้นวัสดุทำให้การระเหยน้ำออกจากเนื้อวัสดุดีขึ้น อัตราการอบแห้งจึงเร็วขึ้น

4.3 ปริมาณและการจัดเรียงวัสดุ วัสดุที่นำมาจัดเรียงซ้อนกันหลาย ๆ ชั้นในถาดทำให้ปริมาณของวัสดุต่อถาดมากเกินไปจะทำให้วัสดุที่อยู่บริเวณตรงกลางได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงทำให้บริเวณนั้นมีอัตราการอบแห้งที่ช้า การจัดเรียงที่เหมาะสมควรทำการจัดเรียงเป็นแบบชั้นบางเพื่อให้วัสดุได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ

4.4 อุณหภูมิของอากาศร้อน เมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนสูงขึ้นอัตราการอบแห้งจะเร็วขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนกับวัสดุมีมากทำให้การถ่ายเทความร้อนสู่ น้ำในเนื้อวัสดุได้ดีจึงทำให้น้ำในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่และระเหยได้เร็วขึ้น ถึงแม้ว่าอุณหภูมิที่สูงจะทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้นแต่ก็ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ในการอบแห้งด้วย

4.5 ความชื้นของอากาศร้อน หากความชื้นของอากาศร้อนมีค่ามากจะมีผลให้การเคลื่อนที่ของน้ำและการระเหยของไอน้ำออกจากเนื้อวัสดุได้ยาก

4.6 ความดันของบรรยากาศ การอบแห้งโดยทั่วไปมักทำที่ความดันหนึ่งบรรยากาศ ถ้าหากมีการลดความดันของบรรยากาศในขณะที่ทำการอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากจะทำให้จุดเดือดของน้ำลดลง ซึ่งการอบแห้งประเภทนี้เหมาะกับการ

อบแห้งวัสดุที่เสื่อมคุณภาพได้ง่ายเนื่องจากความร้อน เครื่องอบแห้งมีการลดความดันในสภาวะการอบแห้งเช่น เครื่องอบแห้งสูญญากาศแบบลูกกลิ้ง (Vacuum drum drier) เป็นต้น

4.7 ความเร็วลมร้อน ถ้าความเร็วของลมร้อนมีค่ามากจะทำให้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าวัสดุได้ดีขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

4.8 สมบัติเชิงความร้อนและฟิสิกส์ของวัสดุ คุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งคือ ความร้อนจำเพาะ สภาพการนำความร้อน และการแพร่ความร้อน ส่วนคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นปรากฏ และสัดส่วนช่องว่างอากาศในกองวัสดุ

5. ลักษณะของการอบแห้ง

วิวัฒน์ คล่องพานิช และชลทิศ ศรีสัตบุตร (2533) ได้อธิบายถึงการอบแห้งในลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

5.1 การอบแห้งช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างวัสดุและอากาศ เหมือนกับการถ่ายเทความร้อนและมวลร้อนที่กระเปาะเปียกของเทอร์โมมิเตอร์ การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นที่ผิวนอกของวัสดุเท่านั้น น้ำจะเกาะที่ผิวของวัสดุเป็นจำนวนมาก เมื่อเพิ่มความเร็วลมที่ไหลผ่านวัสดุ จะทำให้ฟิล์มอากาศหนึ่งมีความหนาลดลง เป็นผลให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อนและมวลลดลงด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างที่ผิววัสดุของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น และเมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง จะเป็นผลให้ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นอิมมัตว์ที่ผิววัสดุและอัตราส่วนความชื้นของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น และเมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง จะเป็นผลให้ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นอิมมัตว์ที่ผิววัสดุและอัตราส่วนความชื้นของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลดีขึ้น ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ คือ อุณหภูมิความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม

5.2 การอบแห้งช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

กล่าวได้ว่าในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤต การถ่ายเทความร้อนและมวลมิได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิววัสดุเท่านั้น แต่เกิดขึ้นในเนื้อของวัสดุด้วย การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความชื้นจากผิววัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง อัตราการระเหยน้ำจะถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำในวัสดุ ในขณะที่อุณหภูมิของวัสดุมีค่าสูงและสูงกว่า

อุณหภูมิกระเปาะเปียก เมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง จะเป็นผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้น และมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเพิ่มขึ้นด้วย

5.3 การอบแห้งความชื้นสมดุล

ความชื้นสมดุลของวัสดุมีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำจนถึงจุด ๆ หนึ่ง ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะนั้นความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับความดันไอของบรรยากาศที่อยู่รอบ ๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ด้วย ซึ่งเรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นหนึ่ง ดังนั้นความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ

6. การสมดุลความร้อนในการอบแห้ง

การสมดุลความร้อนอย่างง่ายของกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อน Brooker et al. (1992) ได้แนะนำสมการซึ่งทำการสมดุลพลังงานของอากาศกับความชื้นของวัสดุโดยสมมติให้ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำจากวัสดุขึ้น มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงความร้อนสัมผัสของอากาศตามสมการ 1

$$m_w h_{fg} = m_a C_a (T_{ai} - T_{af}) t \quad (1)$$

เมื่อ	m_w	คือ มวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ (kg)
	h_{fg}	คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (kJ/kg)
	m_a	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)
	C_a	คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg °C)
	T_{ai}	คือ อุณหภูมิอากาศก่อนอบแห้ง (°C)
	T_{af}	คือ อุณหภูมิของอากาศหลังอบแห้ง (°C)
	t	คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (s)

จากการศึกษาทฤษฎีการอบแห้งข้างต้น พอสรุปได้ว่า การอบแห้งเป็นกระบวนการย้ายมวลประกอบด้วยการกำจัดน้ำหรือตัวทำละลายอื่นโดยการระเหยจากของแข็ง กึ่งของแข็ง หรือของเหลว กระบวนการนี้มักใช้เป็นขั้นตอนการผลิตสุดท้ายก่อนขายหรือบรรจุหีบห่อผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์สุดท้าย โดยแหล่งกำเนิดความร้อนและตัวตั้งไอน้ำที่ผลิตจากกระบวนการดังกล่าวมักเกี่ยวข้องกับด้วย ในผลิตภัณฑ์ชีวภาพอย่างอาหาร วัคซีน และเภสัชภัณฑ์อย่างวัคซีน น้ำเป็นตัวทำละลายที่ต้องกำจัดแทบทั้งสิ้น

7. หลักการพื้นฐานของการอบแห้ง

7.1 สมบัติของวัสดุชื้น (Properties of Moist Materials)

7.1.1 ความชื้นของวัสดุชื้น วัสดุชื้นประกอบด้วยของแข็ง (Solid materials) และความชื้น โดยทั่วไปเป็นน้ำในสถานะของเหลว ซึ่งสามารถบอกปริมาณความชื้นของวัสดุชื้นในรูปของความชื้นมาตรฐานเปียกหรือมาตรฐานแห้ง ได้ดังนี้

$$M_w = \frac{m_w}{m_w + m_s} \quad (2)$$

$$M_d = \frac{m_w}{m_s} \quad (3)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก [kg/kg]

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง [kg/kg]

m_w คือ มวลของของน้ำในปริมาตรที่พิจารณา [kg]

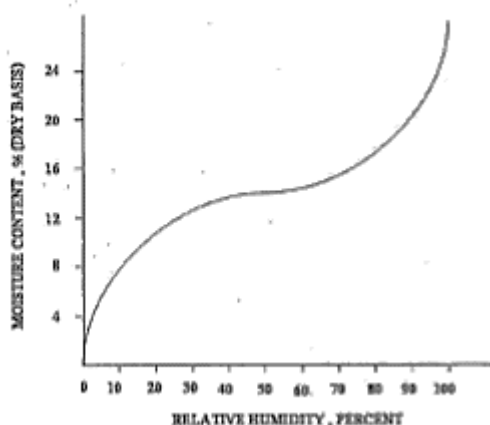
m_s คือ มวลของของแข็ง ในปริมาตรที่พิจารณา [kg]

ความชื้นมาตรฐานเปียก นิยมใช้ในทางการค้า และสำหรับความชื้นมาตรฐานแห้ง ใช้ในการคำนวณ และการศึกษาในเชิงวิทยาศาสตร์

7.1.2 ลักษณะการเกาะตัวของน้ำบนวัสดุชื้น น้ำที่เกาะตัวกับของแข็งในวัสดุชื้นสามารถ แบ่งได้เป็น 4 ชนิด คือ น้ำอิสระ (Free water) น้ำที่เป็นตัวทำละลาย (Solvent water) น้ำที่เกาะตัวโดยแรงแวนเดอวาลส์ (Water attached with van der Waals force) และน้ำโมเลกุลเดี่ยว (Mono-molecular water)

การเกาะของน้ำอิสระจะอยู่ที่ชั้นนอกสุดของผิวของแข็ง ส่วนน้ำแบบอื่นจะอยู่ถัดลงมา จนถึงน้ำแบบน้ำโมเลกุลเดี่ยว ซึ่งอยู่ที่บริเวณผิวสัมผัสของของแข็ง ในการแยกน้ำแบบอิสระจะใช้พลังงานน้อยที่สุด ส่วนน้ำแบบโมเลกุลเดี่ยวต้องใช้พลังงานในการแยกน้ำออกจากวัสดุชื้นมากที่สุด

7.1.3 ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) วัสดุชื้นจะมีการรับและคืนความชื้นจากอากาศรอบ ๆ จนกระทั่งความชื้นมีค่าคงที่หรืออยู่ในสภาวะสมดุลกับอากาศแวดล้อม เรียกความชื้นนี้ว่า “ความชื้นสมดุล” ความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ซึ่งสามารถหาได้โดยการทดลอง โดยทั่วไปกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในสภาวะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ จะเรียกว่า Sorption Isotherm ซึ่งผลผลิตผลการเกษตรส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นกราฟรูป Sigmoid



ภาพ 2 sorption isotherm ของผลิตภัณฑ์การเกษตรทั่วไป

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์กระทรวงพลังงาน, 2554

7.1.4 วอเตอร์แอกติวิตี (Water activity) น้ำที่อยู่ในวัสดุขึ้นประเภทไฮโกรสโคปิก จะมีความดันไอ (Vapour pressure) ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำ ชนิดของน้ำ โครงสร้างของวัสดุขึ้น และสภาพทางชีวเคมีของวัสดุขึ้นนั้น ๆ ในทางเทคโนโลยีการอาหาร จึงไม่มีการกำหนดพารามิเตอร์ ที่จะบอกบทบาทของน้ำในวัสดุขึ้นในรูปของวอเตอร์แอกติวิตี ซึ่งจะเป็นอัตราส่วนของความดันไอในวัสดุขึ้นต่อความดันไอน้ำอิสระ (Free water) หรือน้ำที่อยู่นอกวัสดุขึ้นหรือเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (Iglesias and Chirife, 1982)

$$a_w = \frac{P}{P_0} \quad (4)$$

- เมื่อ a_w คือ วอเตอร์แอกติวิตี (-)
 P คือ ความดันไอน้ำในวัสดุขึ้น [Pa]
 P_0 คือ ความดันไอน้ำของน้ำอิสระ [Pa]

เมื่อนำวัสดุขึ้นไปวางอยู่ในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ rh และอุณหภูมิ T วัสดุขึ้นจะมีการดูดหรือคายความชื้น จนกระทั่งถึงจุดสมดุลในสภาพดังกล่าววอเตอร์แอกติวิตีจะมีความสัมพันธ์ กับความชื้นสัมพัทธ์ดังสมการ

$$a_w = \frac{m}{100} \quad (5)$$

เมื่อ a_w คือ วอเตอร์แอกติวิตี [-]

rh คือ ความชื้นสัมพัทธ์ [%]

เนื่องจากวอเตอร์แอกติวิตีเป็นค่าความดันไอน้ำในผลิตภัณฑ์ เมื่อเทียบกับความดันไอน้ำของน้ำอิสระ ดังนั้นวอเตอร์แอกติวิตีจึงมีผลต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์และชีวเคมีของผลิตภัณฑ์ ดังนี้

1) ผลต่อการเจริญเติบโตของราและแบคทีเรีย เช่น แบคทีเรียส่วนใหญ่ไม่สามารถเติบโต เมื่อค่าวอเตอร์แอกติวิตีของผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำกว่า 0.60

2) ผลต่อปฏิกิริยาเอนไซม์เมติก โดยปฏิกิริยาดังกล่าวบางชนิดที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นต่ำ โดยไม่ต้องถูกกระตุ้นด้วยความร้อน มีการพบว่าปฏิกิริยานี้มีความสัมพันธ์กับวอเตอร์แอกติวิตีของผลิตภัณฑ์นั้น

3) ผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ มีผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าในผลิตภัณฑ์บางชนิด การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นผลมาจากวอเตอร์แอกติวิตี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีการอบแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze drying)

7.1.5 ซอบซันไอโซเทอม (Sorption Isoterm) โดยทั่วไปความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์กับวอเตอร์แอกติวิตี ถ้ากำหนดให้อุณหภูมิคงที่ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับวอเตอร์แอกติวิตีจะเรียกว่า ซอบซันไอโซเทอม (Sorption Isoterm) โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นรูปซิกมอยด์ (Sigmoid) โดยเส้นของอุณหภูมิจะอยู่ด้านล่าง

การควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ สามารถทำได้โดยใช้กรดหรือสารละลายเกลืออิมิตัว กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) และกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ สามารถควบคุมความชื้นของอากาศระหว่าง 0 ถึง 100 % ได้ โดยความดันไอเหนือสารละลายกรดจะขึ้นกับความเข้มข้นและอุณหภูมิของกรด โดยทั่วไปไม่นิยมใช้กรด เพราะมีอันตรายและมีการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ในขณะที่ทำการทดลอง เนื่องจาก การเพิ่มหรือลดของความเข้มข้นของกรด สารละลายเกลืออิมิตัวมีความปลอดภัยในการใช้ มากกว่าสารละลายกรด และสามารถควบคุมความชื้นได้ดีกว่าสารละลายกรด เพราะความชื้นสัมพัทธ์เหนือสารละลายไม่เปลี่ยนแปลงขณะทำการทดลอง ซึ่งสามารถใช้เกลือชนิดต่าง ๆ ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 10-95 %

7.1.6 ความร้อนแฝง (Latent heat) คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการระเหย น้ำออก จากวัสดุซึ่งมีค่าขึ้นกับชนิดและความชื้นของวัสดุ ซึ่งความร้อนแฝงของผลิผลทาง การเกษตรสามารถเขียนในรูปของสูตรเอ็มไพริคัล ได้ดังนี้

$$\frac{L}{L'} = 1 + a \exp(-bM_d) \quad (6)$$

เมื่อ L คือ ความร้อนแฝงของวัสดุขึ้น [J/kg]

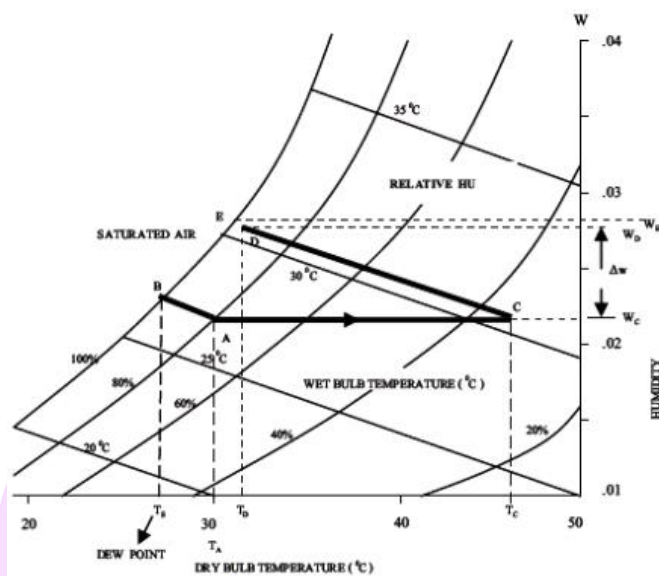
L' คือ ความร้อนแฝงของน้ำ [J/kg]

M_d คือ ความชื้นของวัสดุมาตรฐานแห้ง [%]

a, b คือ ค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของวัสดุ นอกจากนี้ยังมีสมบัติความร้อนอื่นๆ ของ วัสดุซึ่งมีผลต่อการอบแห้ง เช่น ความร้อนจำเพาะ (Specific heat) สภาพนำความร้อน (Heat conductivity) สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convective heat transfer coefficient) และพื้นที่ผิว ต่อปริมาตรวัสดุ เป็นต้น สมบัติเหล่านี้มักจะขึ้นกับความชื้นของวัสดุ และหาได้โดยการทดลอง

7.1.7 สมบัติของอากาศชื้น (Properties of moist air) อากาศซึ่งใช้เป็นตัวกลาง ในการพาความร้อนไปสู่วัสดุขึ้น และพาความชื้นจากวัสดุนั้นออกมาภายนอก จะประกอบด้วย อากาศแห้งและไอน้ำ ซึ่งมีสมบัติแสดงได้ด้วยตัวแปร 7 ตัว ได้แก่ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (T_{db}) อุณหภูมิกระเปาะเปียก (T_{wb}) อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew-point temperature) ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, rh) ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute humidity) หรืออัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio) เอนทาลปี (Enthalpy) ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) ทั้งนี้ตัวแปรทั้ง 7 มีความสัมพันธ์กัน และสามารถแสดงเป็นแผนภูมิอากาศชื้น

ในกระบวนการอบแห้ง อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศจะลดลงเข้าหา อุณหภูมิจุดน้ำค้าง ในขณะที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกจะมีค่าคงที่จากแผนภูมิอากาศชื้น เมื่อ อากาศชื้นถูกทำให้ร้อนขึ้นโดยไม่มีการเพิ่มหรือลดปริมาณไอน้ำ อัตราส่วนความชื้นจะมีค่าคงที่ แสดงได้ด้วยเส้นตรง AC ถ้านำอากาศร้อนนี้ไปใช้ในการอบแห้ง อุณหภูมิกระเปาะแห้งจะลดลง และความชื้นสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอากาศถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุขึ้นและรับความชื้น จากวัสดุนั้น การเปลี่ยนแปลงของอากาศนี้แทนได้ด้วยเส้นตรง CD ในแผนภูมิอากาศชื้น



ภาพ 3 แผนภูมิอากาศชื้นและการเปลี่ยนแปลงสมบัติของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์กระทรวงพลังงาน, 2554

ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

1. ความหมายของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (กระทรวงพลังงาน, 2561) คือ โรงอบแห้งที่ออกแบบรูปพาราโบลา หลังคาทำจากวัสดุใสเป็นแผ่นโพลีคาร์บอเนตชนิดเคลือบสารป้องกันแสงยูวี ปิดบนหลังคาโครงโลหะที่ตั้งอยู่บนพื้นซีเมนต์ ซึ่งการใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตในการทำหลังคาทำให้แสงอาทิตย์ส่องผ่านได้ดี แต่รังสีความร้อนที่แผ่จากภายในโรงอบแห้งจะผ่านออกมาได้น้อย จึงทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Green house effect) ความร้อนส่วนใหญ่จึงถูกกักเก็บอยู่ภายในโรงอบ นอกจากนี้แผ่นโพลีคาร์บอเนตยังเป็นฉนวนความร้อนที่ดี มีน้ำหนักเบา ตัดโค้งได้ง่าย อายุการใช้งานมากกว่า 10 ปี และเพื่อระบายความชื้นหรือน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้งออกจากระบบ จึงมีการติดตั้งพัดลมดูดอากาศ และมีช่องอากาศเข้าเพื่อให้อากาศไหลเข้าโรงอบ ทดแทนอากาศที่ถูกดูดออกไป โดยใช้พัดลมกระแสตรงและมีแผงโซลาร์เซลล์เพื่อให้กำลังไฟฟ้ากับพัดลม

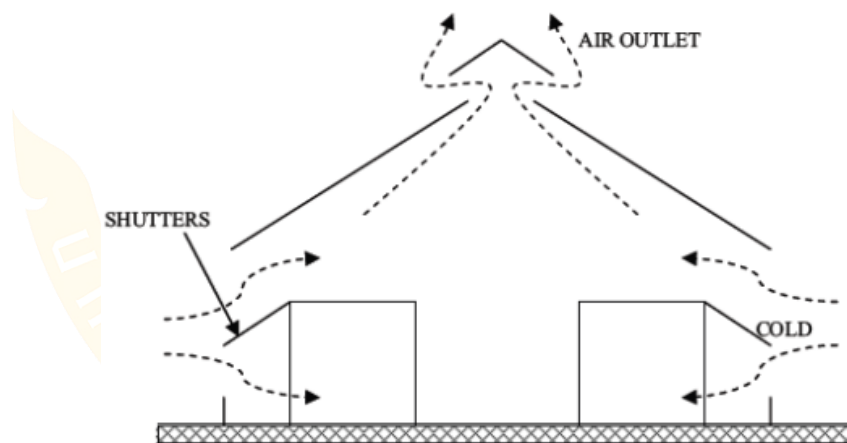
2. ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

Sodha et al ศึกษาการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อระเหยน้ำจากผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะอาศัยการพาความร้อน โดยทั่วไปสามารถแบ่งการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพา

ความร้อนเป็น 2 แบบ คือ แบบการพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural convection drying) ซึ่งอาศัยแรงลอยตัวเนื่องจากการพาความร้อน และแบบการพาความร้อนแบบบังคับอากาศ (Forced-convection drying) ซึ่งอาศัยแรงดันจากพัดลมในการพาความร้อนไปยังผลผลิต นอกจากนี้ยังอาจแบ่งชนิดของการอบแห้งตามวิธีการรับรังสี โดยสามารถแบ่งได้ 3 แบบ ได้แก่ แบบรับรังสีโดยตรง (Direct mode dryer) แบบรับรังสีโดยอ้อม (Indirect mode dryer) และแบบผสม (Mixed mode dryer) สำหรับรายละเอียดของเครื่องอบแห้งชนิดต่างๆ ได้แก่

2.1 เครื่องอบแห้งแบบพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural-convection solar dryer) เครื่องอบแห้งแบบนี้ยังสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท

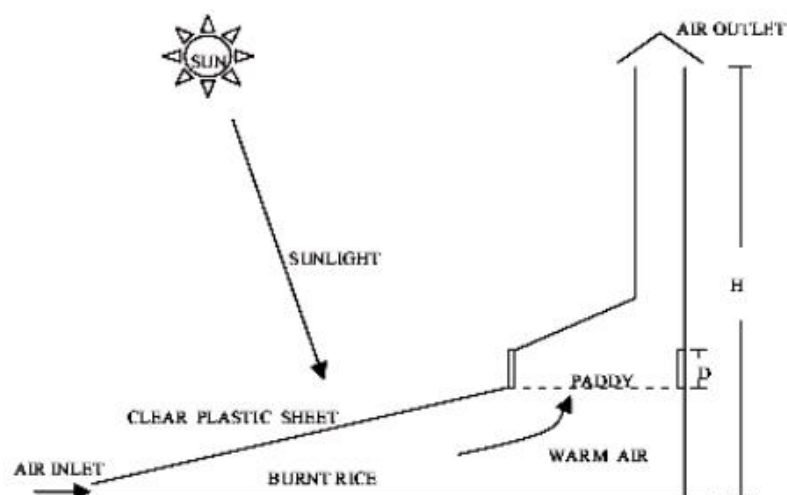
2.1.1 แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง (Direct mode) เครื่องอบแบบนี้รังสีดวงอาทิตย์จะตกลงบนผลิตผลที่ต้องการอบแห้งโดยตรง ความชื้นจากผลิตผลจะถูกพาขึ้นไปด้วยลมโดยการไหลของอากาศที่เกิดจากการพาความร้อนตามธรรมชาติ รังสีดวงอาทิตย์จะส่งผ่านวัสดุโปร่งแสง ซึ่งอาจเป็นพลาสติกหรือกระจกก็ได้ แผ่นโปร่งแสงดังกล่าวทำหน้าที่ป้องกันการสูญเสียความร้อน โดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ทั้งยังป้องกันฝุ่นละอองฝนและแมลงรบกวนต่าง ๆ ด้วย



ภาพ 4 เครื่องอบแห้งแบบรับแสงอาทิตย์โดยตรง

ที่มา: Sodha, et al, 1987

2.1.2 แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม (Indirect mode) เครื่องอบแห้งแบบนี้จะมีแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งทำงานโดยอาศัยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection) อากาศร้อนที่ได้จะลอยตัวและไหลผ่านผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้ง

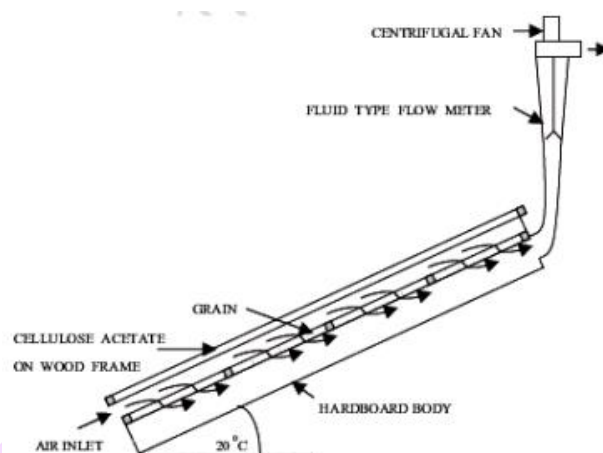


ภาพ 5 เครื่องอบแห้งแบบรับแสงอาทิตย์ทางอ้อม

ที่มา: Bala, 1998

2.2 เครื่องอบแห้งแบบพาความร้อนโดยบังคับอากาศ (Forced convection solar dryer)

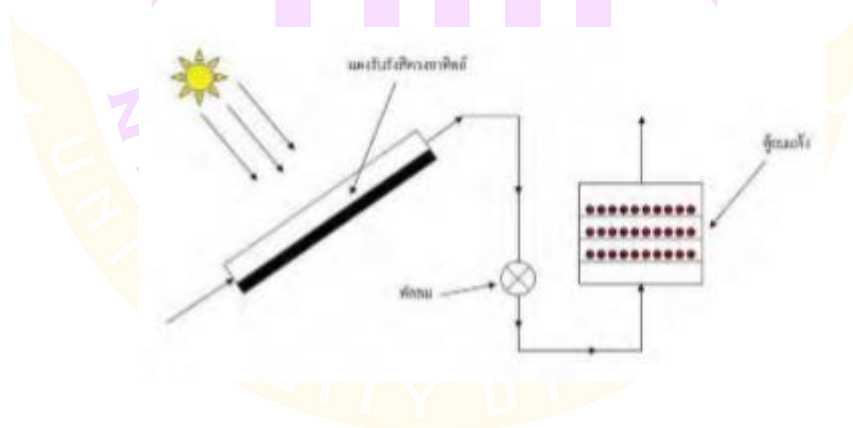
2.2.1 แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง เครื่องอบแห้งแบบนี้ ผลผลิตที่ต้องการอบแห้งจะรับรังสีดวงอาทิตย์โดยตรง อากาศร้อนจะถูกดูดผ่านผลิตภัณฑ์โดยอาศัยพัดลม



ภาพ 6 เครื่องอบแห้งแบบรับแสงอาทิตย์โดยตรงและใช้พัดลม

ที่มา: Sodha, et al, 1987

2.2.2 แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม (Indirect mode) เครื่องอบแห้งแบบนี้จะมีแผงรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบซึ่งทำหน้าที่ผลิตอากาศร้อน แล้วเป่าหรือดูดผ่านส่วนที่บรรจุผลผลิตซึ่งอยู่แยกส่วนจากแผงรับรังสีอาทิตย์



ภาพ 7 แสดงเครื่องอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อมและใช้พัดลมดูดอากาศ

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์กระทรวงพลังงาน, 2554

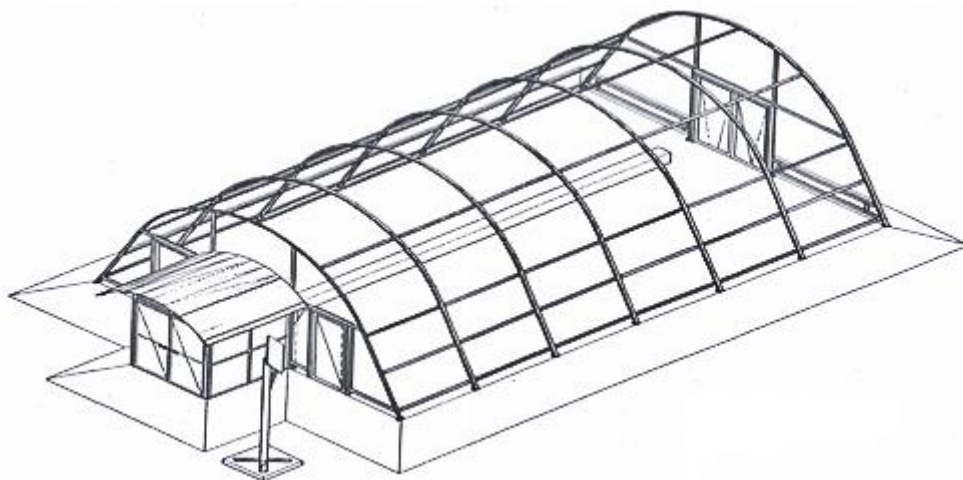
สรารุณี แบนเนียร์ (2552) กล่าวว่า การอบแห้ง คือ การแยกน้ำออกจากวัตถุดิบ โดยการทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอโดยอาศัยความร้อน ความนิยมของผลผลิตทางการเกษตรส่วนใหญ่แล้วมักเป็นการพาความร้อน การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นการอบแห้งผลผลิตโดยใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อระเหยน้ำจากผลิตภัณฑ์ ซึ่งเกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ (1) การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) เกิดขึ้นในกรณีที่ของไหลพาความร้อนผ่านผิวของแข็งด้วยแรงภายนอก เช่น พัดลม เป็นต้น และ (2) การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) เกิดขึ้นในกรณีที่ของไหลพาความร้อนไหลผ่านผิวของของแข็งด้วยแรงลอยตัวที่เกิดขึ้น โดยแบ่งชนิดของการอบแห้งตามวิธีการรับรังสีได้ถึง 4 แบบ ได้แก่

1. ระบบแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง (Direct mode) โดยระบบนี้รังสีดวงอาทิตย์จะตกลงบนผลผลิตที่ต้องการอบแห้งโดยตรง ความชื้นจากผลผลิตจะถูกพาขึ้นไปด้านบน โดยการไหลของอากาศที่เกิดจากการพาความร้อนตามธรรมชาติ รังสีดวงอาทิตย์จะส่งผ่านวัสดุโปร่งแสง ซึ่งอาจเป็นพลาสติกหรือกระจกก็ได้ แผ่นโปร่งแสงดังกล่าว ทำหน้าที่ป้องกันการสูญเสียความร้อน โดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ทั้งยังป้องกันฝุ่นละออง ฝน และแมลงรบกวนต่าง ๆ ด้วย

2. ระบบอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม (Indirect mode) เป็นการทำงานโดยอาศัยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ซึ่งอากาศร้อนที่ได้จะลอยตัวและไหลผ่านผลผลิตที่ต้องการอบแห้ง

3. ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสม ผลิตภัณฑ์จะได้รับพลังงานความร้อนทั้งจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์และรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบผลิตภัณฑ์โดยตรง และจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ โดยมีพัดลมเป่าอากาศจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์เข้าไปยังช่องบรรจุผลิตภัณฑ์

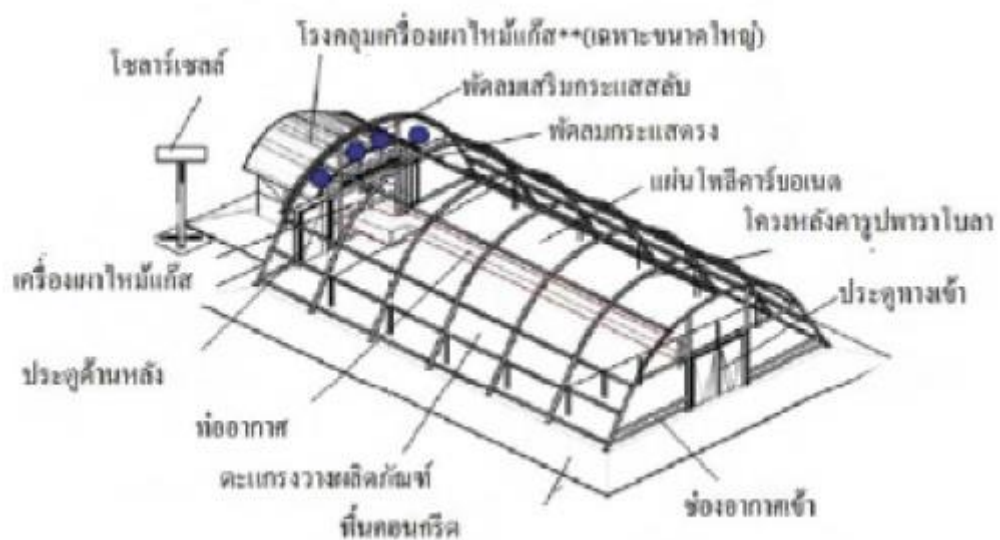
4. ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ (Greenhouse solar drying) ระบบนี้จะมีลักษณะเป็นโรงเรือน ซึ่งปิดคลุมด้วยวัสดุโปร่งแสง เช่น กระจก หรือพลาสติกชนิดต่าง ๆ เมื่อรังสีดวงอาทิตย์ส่งผ่านวัสดุดังกล่าวเข้าไปตกกระทบยังผลิตภัณฑ์ ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น และแผ่รังสีอินฟราเรดออกมา แต่รังสีดังกล่าวผ่านแผ่นวัสดุโปร่งแสงออกมาได้น้อย ทำให้ความร้อนถูกกักเก็บอยู่ภายใน อุณหภูมิอากาศภายในจึงสูงขึ้น ช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งได้เร็ว โดยความชื้นที่ออกมาจากผลิตภัณฑ์จะมีพัดลมดูดอากาศเพื่อระบายความชื้นที่ระเหยจากผลิตภัณฑ์ออกมาสู่อากาศแวดล้อมภายนอก ดังภาพ 8



ภาพ 8 แบบของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

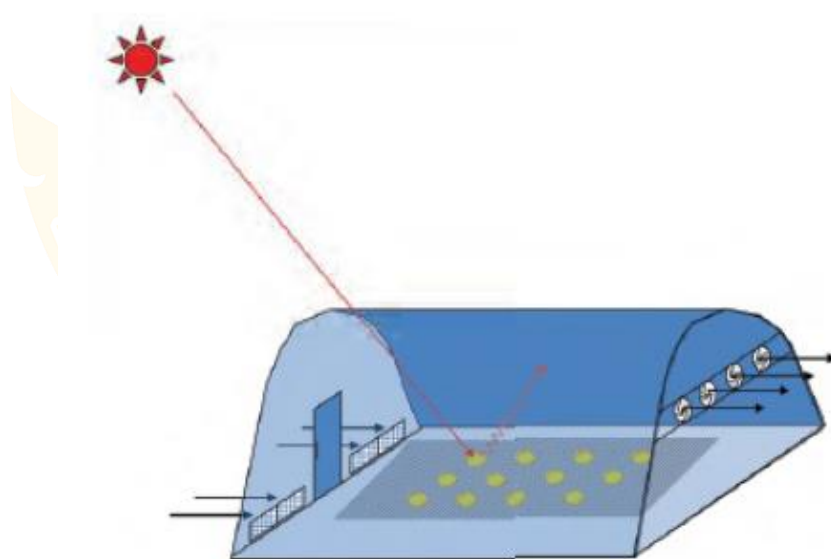
ที่มา: สราวุฒิ แนบเนียร, 2552

ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ เป็นการใช้พลังงานสะอาด โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ร่วมกับความร้อนเหลือทิ้ง ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสิ้นเปลืองและเป็นการรักษาสีและรสชาติ การพัฒนาระบบอบแห้งไม้แบบกรีนเฮาส์ที่ถูกพัฒนาขึ้น ได้ออกแบบสร้างโดยใช้โครงสร้างคล้ายกับบ้าน ซึ่งมีหลังคาเป็นจั่ว และปิดคลุมทุกด้านด้วยพลาสติกแบบมีโพรงอากาศอยู่ภายใน ด้านใต้หลังคาจะเป็นผ้าใบสีดำ เพื่อใช้ดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ และมีพัดลมไฟฟ้าช่วยเป่าอากาศผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์กับหลังคาและไหลเข้าไปในส่วนบรรจุผลิตภัณฑ์ ซึ่งอยู่ด้านล่าง อากาศบางส่วนจะถูกเป่าออกไปภายนอกทางช่องอากาศด้านหน้า ระบบอบแห้งแบบนี้นอกจากนี้ยังมีระบบควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้งแบบอัตโนมัติ มีการศึกษาหลายชิ้นที่แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งแบบกรีนเฮาส์เป็นประโยชน์และสามารถลดต้นทุนได้จริง



ภาพ 9 โครงสร้างของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก

ที่มา: Hohenheim University, 2003



ภาพ 10 การทำงานของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก

ที่มา: Hohenheim University, 2003

การศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับการอบแห้งมีอย่างต่อเนื่อง แต่ด้วยปัจจุบันมีการพัฒนาการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศที่มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น เพื่อสามารถนำไปใช้กับการพัฒนาด้านพลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

2.3 วัตถุประสงค์ของการอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์

การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์ และรักษาการไหลของอากาศโดยการพาแบบธรรมชาติหรือการพาแบบบังคับ ทำให้ความชื้นสมดุลลดลง และเพิ่มความเร็วในการนำเอาความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ ความร้อนจากแสงอาทิตย์อาจจ่ายให้กับผลิตภัณฑ์โดยตรง หรือแสงอาทิตย์ทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในภาวะสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม (สมชาย โสภณธรณฤทธิ, 2540)

2.4 ปัจจัยที่มีผลกับการอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์

สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ ประกอบด้วย (สมชาย โสภณธรณฤทธิ, 2540)

2.4.1 ปัจจัยด้านการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ และตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ ความเข้มรังสี หาได้จากละติจูดของที่ตั้ง ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ และความใสของท้องฟ้า

2.4.2 ปัจจัยด้านอุณหภูมิ อัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศ กล่าวคือ ผลิตภัณฑ์นั้นจะถูกดูดซับรังสีดวงอาทิตย์และถ่ายเทความร้อนส่วนหนึ่งให้กับอากาศแห้งที่เข้าไปในเครื่องอบแห้ง และอากาศจะนำเอาความชื้นที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ออกไป

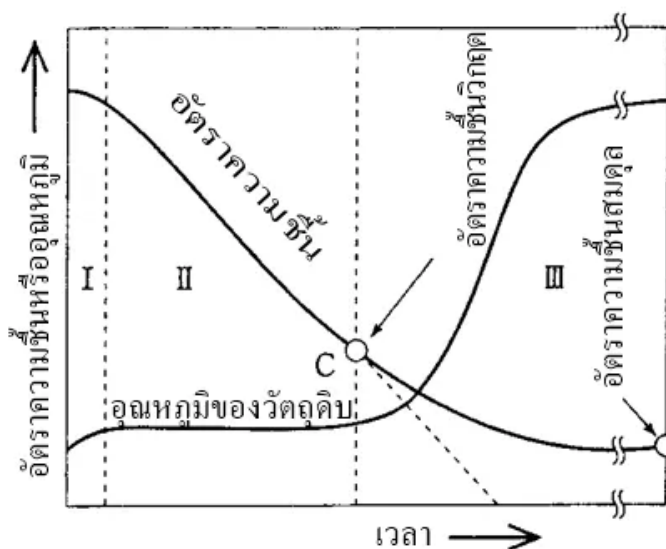
2.4.3 ปัจจัยด้านความชื้นสัมพัทธ์ ความสามารถในการอบแห้งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความชื้นของผลิตภัณฑ์กับความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ ซึ่งหาได้จากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ โดยความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) คือ “อัตราส่วนของปริมาณไอน้ำที่มีอยู่จริงในอากาศ ต่อ ปริมาณไอน้ำที่จะทำให้อากาศอิ่มตัว ณ อุณหภูมิเดียวกัน” หรือ “อัตราส่วนของความดันไอน้ำที่มีอยู่จริง ต่อ ความดันไอน้ำอิ่มตัว” ซึ่งค่าความชื้นสัมพัทธ์แสดงในรูปของร้อยละ การวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสามารถวัดได้จากเครื่องมือ 2 ชนิด คือ

3. ไฮโกรมิเตอร์แบบกระเปาะเปียก-กระเปาะแห้ง

ไฮโกรมิเตอร์แบบกระเปาะเปียก-กระเปาะแห้ง ประกอบไปด้วยเทอร์มอมิเตอร์สองอัน ถูกยึดติดด้วยหลอดที่แข็งแรงซึ่งสามารถแกว่งหมุนได้ด้วยมือ ด้านหนึ่งคือด้านเทอร์มอมิเตอร์

มิเตอร์กระเปาะแห่งวัดอุณหภูมิอากาศ อีกด้านเป็นเทอร์มอมิเตอร์กระเปาะเปียก (มีไส้ฝ้ายติดติดอยู่ที่ส่วนปลายของเทอร์มอมิเตอร์) จะวัดอุณหภูมิอากาศที่ลดลงเมื่อน้ำระเหยออกไป ความแตกต่างของอุณหภูมิของเทอร์มอมิเตอร์กระเปาะแห้ง และเทอร์มอมิเตอร์กระเปาะเปียกยิ่งมากเท่าไร อากาศจะยิ่งแห้งมากเท่านั้น การหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ทำได้โดยอ่านค่าจากตารางความชื้นสัมพัทธ์ที่แนบมาให้พร้อมเครื่องวัด

ดังนั้นการแสดงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัดฤดูบิ จะสามารถแสดงได้ด้วยปริมาณน้ำต่อปริมาณมวลรวมเปียก (ค่า Wet base) หรือปริมาณน้ำต่อปริมาณวัดฤดูบิแห้ง (ค่า Dry base) ในขณะที่อบมวลรวมจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย เมื่อคำนวณความชื้นแบบ Wet basis จะทำให้ค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงอย่างไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นในการคำนวณทางอุตสาหกรรม จะใช้ค่าความชื้น ที่คำนวณแบบ Dry basis ซึ่งมวลแห้งเป็นฐานในการคำนวณ เนื่องจากมวลแห้งนี้มีค่าคงที่ตลอดการอบ จึงมีความสะดวกมากกว่า ถ้าให้ความชื้นที่ Wet basis เท่ากับ W_w และให้ความชื้นที่ Dry basis เท่ากับ W_d แล้ว ค่าทั้งสองจะมีความสัมพันธ์กัน อัตราเร็วในการอบกับเส้นกราฟแสดงสมบัติการอบ เมื่อนำวัดฤดูบิที่จะอบซึ่งเปียกชื้นอย่างเพียงพอถึงผิวหน้ามาแขวนไว้ในกระแสมร้อน แล้วติดตามตรวจวัดอัตราความชื้นกับอุณหภูมิของวัดฤดูบิ นั้น ซึ่งกลไกการอบสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระยะเวลาที่มีลักษณะแตกต่างกัน กล่าวคือ (I) ช่วงอุ่นวัดฤดูบิ (II) ช่วงอบด้วยอัตราเร็วคงที่ (III) ช่วงอบด้วยอัตราเร็วลดลง



ภาพ 11 การเปลี่ยนแปลงของอัตราความชื้นกับอุณหภูมิของวัดฤดูบิ

ที่มา: สมชาย โสภณธรณฤทธิ, 2540

จากภาพ 11 สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของอัตราความชื้นกับอุณหภูมิของวัตถุได้ดังต่อไปนี้

1. ช่วงอุ่นวัตถุ เป็นช่วงที่อุณหภูมิของวัตถุจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิตั้งต้น (อุณหภูมิห้อง) จนถึงอุณหภูมิสมดุลที่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการอบ เรียกว่า ช่วงอุ่นวัตถุ ในกรณีที่วัตถุได้รับความร้อนด้วยการพาความร้อนโดยลมร้อน อุณหภูมิสมดุลนี้จะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะแห้งของลมร้อนนั้น

2. ช่วงอบด้วยอัตราเร็วคงที่ คือ วัตถุจะมีอุณหภูมิคงที่ ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ได้รับจะถูกใช้ไปในการระเหยความชื้นเท่านั้น ขั้นตอนการระเหยจะเกิดที่ผิวหน้าของวัตถุ โดยอัตราเร็วในการอบจะมีค่าคงที่ ช่วงนี้เรียกว่า ช่วงอบด้วยอัตราเร็วคงที่ ซึ่งจะดำเนินไปตราบเท่าที่มีความชื้นอิสระให้ระเหยอยู่ที่ผิวหน้าของวัตถุ โดยอัตราความชื้นของวัตถุจะลดลงด้วยอัตราเร็วคงที่

3. ช่วงอบด้วยอัตราเร็วลดลง คือ เมื่ออบไปเรื่อย ๆ จนปริมาณความชื้นที่ผิวหน้าวัตถุแห้งลง และความชื้นภายในเนื้อวัตถุเริ่มลดลง ความชื้นอิสระภายในตัววัตถุจะซึมขึ้นมาทดแทน ให้ทันกับอัตราเร็วในการระเหยที่ผิวหน้า จึงเริ่มเข้าสู่ช่วงที่ 3 ได้แก่ ช่วงอบด้วยอัตราเร็วลดลง ขั้นตอนการระเหยจะค่อยๆ เลื่อนลงลึกเข้าไปในเนื้อวัตถุ อุณหภูมิของวัตถุ จะเริ่มเข้าใกล้อุณหภูมิของลมร้อนจากบริเวณพื้นผิว ในการอบความร้อนจะต้องเข้าไปถึงภายในเนื้อวัตถุ นอกจากนี้ความร้อนส่วนหนึ่งยังต้องใช้ไปในการให้ความร้อนตัววัตถุเองอีกด้วย อัตราเร็วในการอบจึงค่อยๆ ลดลงตามเวลาที่ผ่านไป โดยอัตราเร็วในการอบ (Drying rate) แบ่งออกเป็น

3.1 อัตราเร็วในการอบคงที่ ในช่วงอบด้วยอัตราเร็วคงที่ ปริมาณความร้อนที่ได้รับทั้งหมดจะถูกใช้ไปในการระเหยความชื้น เกิดเป็นสภาพสมดุลจลน์ขึ้น โดยวัตถุจะมีอุณหภูมิคงที่ที่ T_m และอัตราเร็วในการอบจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขภายนอกเป็นส่วนใหญ่ คืออุณหภูมิ T และความชื้น H ของลมร้อน อัตราเร็วในการอบคงที่ R_A จะสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

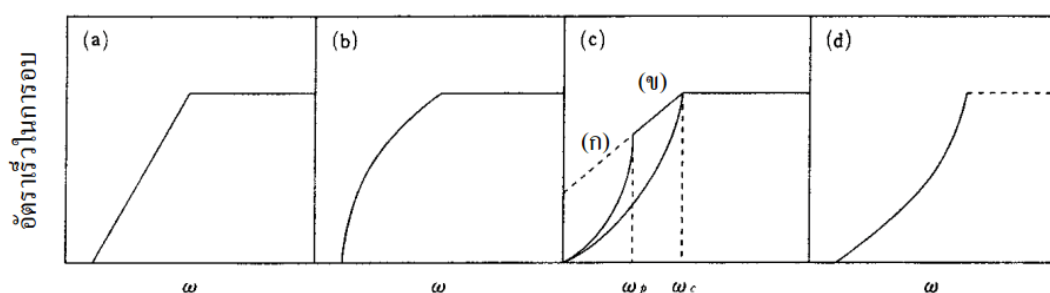
$$R_A = -\frac{W}{A} \frac{d\omega}{d\theta} = k_H (H_m - H) \cong \frac{\alpha}{\lambda} (T - T_m) \quad (7)$$

ในที่นี้สัญลักษณ์ θ แทนเวลา s สัญลักษณ์ α แทนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน $W/m^2 \cdot K$ สัญลักษณ์ k_H แทน Mass Transfer Coefficient หน่วย $kg/s \cdot m^2 \cdot kg$ -น้ำ/kg-อากาศแห้ง สัญลักษณ์ λ แทนความร้อนแฝงของการระเหย J/kg -น้ำ กรณีที่ได้รับความร้อนจากลมร้อนเท่านั้น T_m จะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก T_w ของลมร้อน

$$R_A = \frac{\alpha (T - T_w)}{\lambda} \quad (8)$$

อัตราเร็วในการอบจะคำนวณได้จากสูตรข้างต้น ในที่นี้ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ λ หน่วย J/kg-น้ำ จะใช้ค่าที่อุณหภูมิ T_w (อุณหภูมิกระเปาะเปียก)

3.2 อัตราเร็วในการอบด้วยอัตราเร็วลดลง จะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเปียกและเงื่อนไขการอบ แต่รูปร่างของเส้นกราฟคุณลักษณะการอบในช่วงอัตราเร็วลดลงนี้จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขภายใน ได้แก่ ลักษณะของวัสดุเปียก สมบัติของความชื้นภายในวัสดุที่มีอยู่ ฯลฯ มากกว่าเงื่อนไขการอบภายนอก เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วของลมร้อน ฯลฯ เมื่อทำการวัดเส้นกราฟอัตราเร็วในช่วงอัตราเร็วลดลงของวัสดุต่าง ๆ จะแบ่งได้เป็น 4 ประเภท

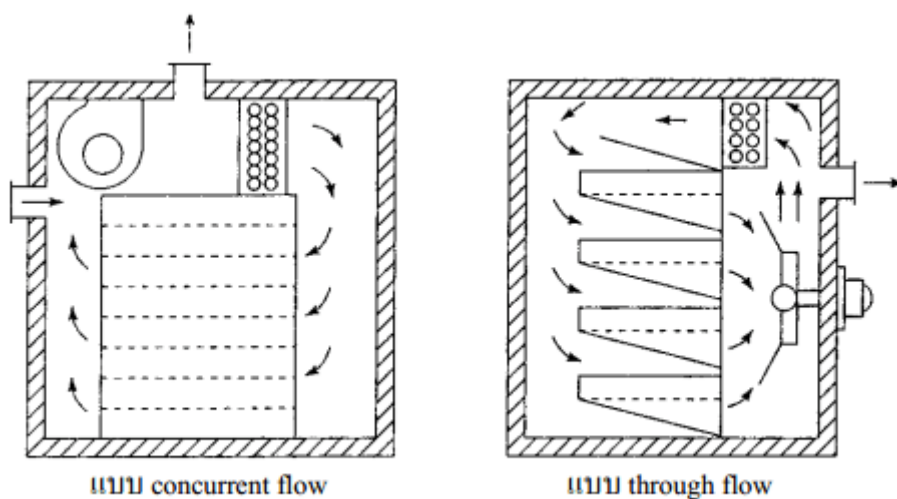


ภาพ 12 เส้นกราฟอัตราเร็วในการอบในช่วงอัตราเร็วลดลง

ที่มา: สมชาย โสภณธรณฤทธิ, 2540

จำนวนประเภทต่าง ๆ ข้างต้น รูป (a) จะพบได้ในกรณีที่อนุภาคของวัสดุเปียกมีน้ำอยู่ในรูปที่ค่อนข้างเป็นอิสระ กล่าวคือ การอบหยดของเหลว เยื่อบาง อนุภาคขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 5 mm เป็นต้น รูป (b) พบได้ในอนุภาคขนาดจิ๋วที่มีสมบัติ Non-hydrophilic หรือวัสดุที่มีลักษณะเป็นเส้นใยสั้นๆ เป็นต้น ทั้งรูป (a) และ (b) เป็นวัสดุที่น้ำจะเคลื่อนที่สู่ผิวหน้าด้วยแรง Capillary ช่วงอัตราเร็วลดลงขั้นที่ 1 รูป (d) โดยมากจะพบในการอบสารเนื้อเดียว เช่น สบู่ กาว เจลาติน ฯลฯ ซึ่งไม่มีช่วงอบด้วยอัตราคงที่ โดยอัตราความชื้นที่ผิวจะลดลงอย่างรวดเร็วจนเท่ากับอัตราความชื้นสมดุลกับลมร้อน หลังจากนั้น การแพร่ของน้ำภายในวัสดุเปียกจะมีอิทธิพลเด่นชัดที่สุด การอบรูป (c) วัสดุเปียกมีสมบัติระหว่าง (a) (b) กับ (d) โดยช่วงอัตราการอบแห้งลดลง จะมี 2 ช่วง คือหลังจากเกิดช่วงอัตราเร็วลดลงขั้นที่ 1 แล้วจะเข้าสู่ช่วงอัตราเร็วลดลงขั้นที่ 2 โดยกรณี (ก) จะพบในวัสดุที่มี Osmotic water เช่น ดินเหนียว และกรณี (ข) เป็นรูปที่ทั่วไปที่สุด พบได้ในวัสดุห่อหุ้ม ชั้นตะกอน เป็นต้น ระยะเวลาที่ต้องใช้ในการอบโดยคร่าว ๆ สำหรับรูป (a) (b) จะแปรผันตามความหนาของวัสดุ ขณะที่รูป (d) จะแปรผันตาม

ความหนาของวัตถุดิบกำลังสอง ส่วนรูป (c) จะอยู่ระหว่างทั้งสองแบบข้างต้น โดยในการศึกษาครั้งนี้จะเป็นกรณีตู้อบแบบถาด (Tray dryer) โดยตู้อบแบบนี้ จะนำวัตถุดิบวางไว้ในถาด ตะแกรง หรือแผ่นที่มีรูพรุน แล้วเป่าลมร้อนขนานไปกับผิวหน้าวัตถุดิบ หรือเป่าตั้งฉากกับกัน ถาดที่ยอมให้ลมผ่านได้ ลมร้อนจะผ่านเข้าไปในชั้นวัตถุดิบ เนื่องจากจะใช้ลมร้อนที่มีความเร็วไม่สูงนัก วัตถุดิบจึงยังอยู่นิ่ง ไม่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนหรือการกระแทกใด ๆ ไม่เกิดความเสียหายจากการแตกหัก ตู้อบแบบนี้จะทำงานแบบกะ (Batch) จึงเหมาะกับวัตถุดิบที่ต้องการอบด้วยการควบคุมภายใต้เงื่อนไขการอบเข้มงวด หรืออบวัตถุดิบหลายๆ ชนิดแต่จำนวนน้อย ๆ หรือใช้กับการควบคุมแบบโปรแกรมซึ่งค่อย ๆ ปรับอุณหภูมิไปตามความเหมาะสม



ภาพ 13 เครื่องอบ Tray Dryer

ที่มา: สมชาย ไสภณรณฤทธิ์, 2540

3.3 ไฮโกรมิเตอร์แบบดิจิตอล ใช้งานได้ง่ายและสามารถวัดความชื้นสัมพัทธ์ได้ใน ช่วงกว้าง ซึ่งเหมาะกับนักเรียนซึ่งไม่สะดวกในการใช้ไฮโกรมิเตอร์แบบกระดาษ-กระดาษแห้ง แต่มีข้อจำกัดคือ ราคาจะแพงกว่าและต้องการการดูแลรักษามากกว่าไฮโกรมิเตอร์แบบกระดาษ-กระดาษแห้งจึงสรุปได้ว่า ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับอบแห้ง ผลผลิตทางการเกษตรต่าง ๆ หลายแบบ ซึ่งมีศักยภาพในการนำไปใช้งานจริงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบอบแห้งแบบเรือนกระจก ซึ่งสะดวกต่อการใช้งาน อย่างไรก็ตามระบบอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นระบบที่มีการลงทุนเริ่มต้นสูง ดังนั้นหากจะส่งเสริมให้เกิดการใช้

แพร่หลาย ควรมีการสนับสนุนเงินลงทุนบางส่วนแก่ชุมชน หรือผู้ประกอบการ ที่มีการอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มคุณค่าของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ และเป็นการเพิ่มรายได้ไปสู่ท้องถิ่นได้มากขึ้นอีกด้วย

3.4 ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งอัจฉริยะ

การหาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งอัจฉริยะ เป็นการคิดอัตราการถ่ายเทความร้อนของผลผลิต กับพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อหน่วยเวลา ซึ่งในที่นี้หมายถึง อัตราการแห้งของผลผลิต โดยทั่วไปอัตราการแห้งของผลผลิตทางการเกษตรจะแบ่งเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงอัตราการแห้งคงที่ (Constant-rate regime) ซึ่งเป็นช่วงแรกของการแห้ง และช่วงอัตราการแห้งลดลง (Falling-rate regime) ซึ่งต่อจากช่วงแรก ในช่วงการแห้งคงที่ การระเหยของน้ำจะเกิดที่ผิวของผลผลิต ลักษณะการระเหยจะคล้ายกับการระเหยของน้ำจากภาชนะ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน, 2547)

3.4.1 การออกแบบเครื่องให้พลังงานความร้อน เกี่ยวกับการคำนวณพื้นที่สำหรับที่จะถ่ายเทความร้อน ปริมาณที่ต้องการ เมื่อรู้อัตราการไหล และอุณหภูมิของของไหลที่จะเข้าและออกจากเครื่องให้พลังงานความร้อน นอกจากนี้ผู้ออกแบบยังต้องกำหนดขนาดของส่วนต่าง ๆ ของเครื่องให้พลังงานความร้อน เช่น ขนาดท่อ ความยาวของท่อที่ใช้ ระยะวางท่อ และลักษณะการวางท่อ เป็นต้น การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เรายังต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่อง และค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่อง เครื่องให้พลังงานความร้อนที่ได้รับการออกแบบอย่างถูกต้องควรมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุด

การคำนวณพื้นที่ที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนในโรงอบ ใช้สมการดังต่อไปนี้ (นักสิทธิ์ คุว์ฒนาชัย, 2532)

$$Q = UA\Delta T \quad (9)$$

สำหรับในการคำนวณพื้นที่ที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน โดยการพาความร้อน ของไหลและผนังจะต้องใช้สมการสำหรับการพาความร้อน ดังนั้น พื้นที่การถ่ายเทความร้อนภายในโรงอบ ใช้สมการ ดังต่อไปนี้ (นักสิทธิ์ คุว์ฒนาชัย, 2532)

$$Q = hA\Delta T \quad (10)$$

เมื่อ Q คือ	พลังงานที่ใช้ (W)
A คือ	พื้นที่ของเครื่องให้พลังงานความร้อน (m^2)
ΔT คือ	ผลต่างของอุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
U คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W/m^2K)
h คือ	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m^2K)

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เมื่อใช้เครื่องให้พลังงานความร้อนไประยะหนึ่ง สิ่งสกปรกจากของไหลจะเริ่มจับกับผิวโลหะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำลง ดังนั้น หากทำการคำนวณออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยไม่คำนึงถึงค่าความต้านทานอันเนื่องมาจากสิ่งสกปรกที่ผนังของโลหะ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะไม่สามารถถ่ายเทความร้อนตามที่ทำนายไว้ ด้วยเหตุนี้การคำนึงถึงผลเสียของสิ่งสกปรกที่เกาะติดผิวของโลหะไว้ล่วงหน้าเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง

ปริมาณที่ได้บ่งถึงผลของสิ่งสกปรก เรียกว่า ฟาวลิ่งเฟคเตอร์ (Fouling factor) คือ ค่าความต้านทานอันเนื่องมาจากสิ่งสกปรกจะมีหน่วยกลับกันของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน คือ $\text{m}^2\text{K/W}$ เมื่อรวมเอาฟาวลิ่งเฟคเตอร์เข้าไปด้วย (นักสิทธิ์ คุว์ฒนาชัย, 2532)

กรณีผนังรูปทรงกระบอกสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าฟาวลิ่งเฟคเตอร์จะเขียนได้ดังนี้สมการ

$$u = \left[\frac{1}{h_i} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{k} + \frac{1}{h_o r_2} + R_{fi} + R_{fo} \frac{r_1}{r_2} \right]^{-1} \quad (11)$$

โดยที่ h_i คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่อุณหภูมิทางเข้า ($^{\circ}\text{C}$)

h_o คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่อุณหภูมิทางออก ($^{\circ}\text{C}$)

r_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (cm)

r_2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (cm)

R_{fi} คือ ค่าฟาวลิ่งเฟคเตอร์ของผนังด้านใน ($\text{m}^2\text{K/W}$)

R_{fo} คือ ค่าฟาวลิ่งเฟคเตอร์ของผนังด้านนอก ($\text{m}^2\text{K/W}$)

ค่าของ h_{i-o} หาได้จากสมการ (4) เป็นการไหลแบบอลวน (Turbulent flow) หรือสมการ (5) เป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) โดยที่การไหลแบบราบเรียบ หรือ ออลวน ปริมาณที่จะใช้ตัดสินว่าจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ หรืออลวน ก็คือตัวเลขเรย์โนลด์ และในการไหลแบบราบเรียบตัวเลขเรย์โนลด์จะมีค่าสูงสุด 2300 และตัวเลขเรย์โนลด์สูงกว่า 2300 การไหลจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นแบบอลวน และเรย์โนลด์สูงกว่า 10000 การไหลจะเป็น ออลวนเสมอ (นักสิทธิ์ คุว์ฒนาชัย, 2532) สมการในการหาค่าเรย์โนลด์ (R_e)

$$R_e = \frac{Vd\rho}{\mu} \quad (12)$$

การไหลแบบอลวน (Turbulent flow) เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาสมการสำหรับการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างของไหลและผิวท่อ สมการนี้ใช้ได้ผลดีที่สุดสำหรับการไหลแบบอลวน (นักสิทธิ์ คูวัฒนาชัย, 2532)

$$N_u = 0.023 R_e^{0.8} P_r^n \text{ โดยมีค่าเท่ากับ } \frac{hd}{k} = 0.023 \left[\frac{\rho V d}{\mu} \right]^{0.8} \frac{\mu C_p n}{k} \quad (13)$$

เมื่อ n คือ 0.3 เมื่อของไหลถูกทำให้เย็นลง

k คือ ค่าการนำความร้อน (W/m K)

n คือ 0.4 เมื่อของไหลถูกทำให้ร้อนขึ้น

P_r คือ ตัวเลขพรานเดิล (Prandtl Number)

V คือ ความเร็ว (m/s)

d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ (m)

ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m³)

μ คือ ความหนืดพลศาสตร์ (kg/ms)

C_p คือ ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ (J/kg K)

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ตัวเลขนัสเซลที่มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความยาวของท่อ แต่จะใช้วิธีการคำนวณโดยประมาณเท่านั้น เพราะได้สมมติการกระจายของอุณหภูมิ และความเร็วเป็นพาราโบลารวมตามจะใช้สมการ (7) (นักสิทธิ์ คูวัฒนาชัย, 2532)

$$N_u = 6 \quad (14)$$

เมื่อ $N_u = \frac{hd}{k}$ และคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถใช้สมการดังต่อไปนี้ (นักสิทธิ์ คูวัฒนาชัย, 2532)

$$Q_{EIEC} = \dot{m} C_p \Delta T \quad (15)$$

เมื่อ Q_{EIEC} คือ พลังงานความร้อน (W)

\dot{m} คือ อัตราการไหลของน้ำ (kg/s)

C_p คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ (J/kg k)

ΔT คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (°C)

เวลาสุริยะ (Solar time) เป็นเวลาที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า เวลาเที่ยงสุริยะ (Solar noon) คือ เวลาที่ดวงอาทิตย์ข้ามเส้นเมริเดียนของตำแหน่งที่สังเกต สาเหตุที่เวลาสุริยะ ต่างจากเวลามาตรฐานท้องถิ่น (Standard Time) เนื่องจากเส้นเมริเดียน

ของตำแหน่งที่ต้องการหาเวลาสุริยะต่างกับเส้นเมริเดียนที่ใช้คำนวณมาตรฐานเวลาท้องถิ่น ดวงอาทิตย์ใช้เวลาประมาณ 4 นาที ต่อ 1 ลองจิจูดที่เปลี่ยนไป และการกวัดแกว่งของแกนหมุนของโลก ซึ่งมีผลต่อเวลาที่ดวงอาทิตย์ข้ามเส้นเมริเดียนของตำแหน่ง ที่สังเกต ซึ่งการกวัดแกว่งนี้สามารถหาได้จากสมการ (Equation of Time)

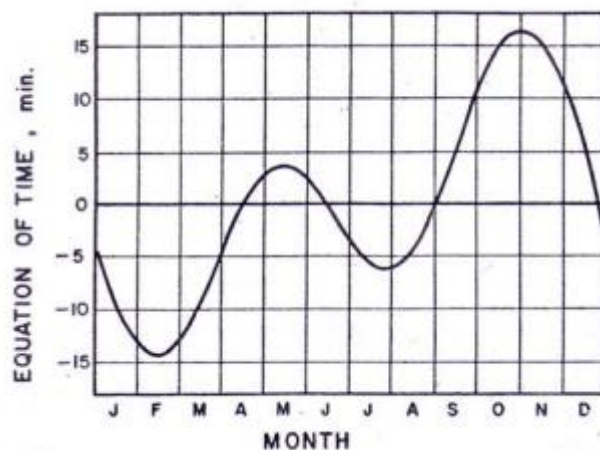
ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสุริยะและเวลามาตรฐานสามารถหาได้ดังนี้

$$\text{Solar Time} = \text{Standard Time} \pm 4 (L_{ST} - L_{local}) + E \quad (16)$$

เมื่อ L_{ST} คือ เส้นเมริเดียนที่ใช้คำนวณเวลามาตรฐานท้องถิ่น (องศา)

L_{local} คือ เส้นเมริเดียนของตำแหน่งที่ต้องการหาเวลาสุริยะ (องศา)

E คือ สมการเวลา (นาที)



ภาพ 14 สมการเวลา E ในหน่วยนาที

ทิศทางของรังสีตรง ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างระนาบการหมุนของโลกที่เวลาใด ๆ กับรังสีตรงหรือตำแหน่งของดวงอาทิตย์เมื่อเทียบกับระนาบ สามารถอธิบายได้โดยใช้มุมต่าง ๆ ดังนี้

ละติจูด (Latitude, ϕ) คือ มุมที่อยู่ทิศทางเหนือ หรือ ทิศใต้ของเส้นศูนย์สูตร เมื่อวัดไปทางทิศเหนือ กำหนดให้มีค่าเป็นบวก และลบเมื่อวัดไปทางทิศใต้ ละติจูดมีค่าอยู่ระหว่าง -90° ถึง 90°

มุมเอียง (Slope, β) คือ มุมระหว่างพื้นผิวของระนาบรับแสงกับแนวระดับมีค่าอยู่ระหว่าง 0° ถึง 180°

มุมชั่วโมง (Hour Angle, ω) คือ มุมที่แทนตำแหน่งของดวงอาทิตย์จากเมอริเดียนท้องถิ่นไปทางทิศตะวันออก หรือทิศตะวันตก มีค่าเป็นลบในช่วงเวลาก่อนเที่ยงสุริยะ และเป็นบวกหลังเที่ยงสุริยะ โดยมี ค่า 15° ต่อ 1 ชั่วโมง

มุมเดคลิเนชัน (Declination Angle, δ) คือ มุมระหว่างแนวเส้นแวงแสงอาทิตย์เมื่อเที่ยงสุริยะกับระนาบศูนย์สูตรกำหนดมีค่าเป็นบวกในทางทิศเหนือ และลบเมื่อวัดไปทางทิศใต้ มุมเดคลิเนชันมีค่า เปลี่ยนไปทุกวันระหว่าง -23.45° ถึง 23.45° สามารถคำนวณได้จาก

$$\delta = 23.45 \sin \left[360 \frac{(284 + n)}{365} \right] \quad (17)$$

เมื่อ n คือ ลำดับวันที่ n ของปี ($1 \leq n \leq 365$)

มุมอัลติจูดดวงอาทิตย์ (Solar attitude angle, α_s) คือ มุมระหว่างพื้นราบกับแนวเส้นแวงแสงอาทิตย์ มุมอัลติจูดดวงอาทิตย์ที่เวลาใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\sin \alpha_s = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (18)$$

มุมอะซิมุทพื้นดิน (Surface azimuth angle, γ) คือ มุมระหว่างทิศใต้กับทิศทางการหันหน้าของแผงรับมีค่าอยู่ในช่วง -180° ถึง 180° โดยเป็นศูนย์เมื่อหันไปทางทิศใต้ เป็นบวกเมื่อหันหน้าไปทางทิศตะวันตก และเป็นลบเมื่อหันไปทางทิศตะวันออก

มุมอะซิมุทดวงอาทิตย์ (Solar azimuth angle, γ_s) คือ มุมระหว่างแนวตั้งของดวงอาทิตย์และระนาบของเมอริเดียนท้องถิ่น โดยกำหนดให้วัดจากทิศใต้ของระนาบแนวตั้งดวงอาทิตย์ไปทางทิศตะวันตก มีค่าเป็นบวก วัดทางทิศตะวันออกมีค่าเป็นลบ และมีค่าเป็นศูนย์ที่ทิศใต้ มุมอะซิมุทดวงอาทิตย์มีค่าอยู่ในช่วง -180° ถึง 180° คำนวณได้จากสมการ (จงจิตร หิรัญลาภ, 2541)

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha_s} \quad (19)$$

ประสิทธิภาพทางความร้อน

การหาประสิทธิภาพทางความร้อนของโรงอบแห้งซึ่งจำเป็นต้องทราบค่าความร้อนของน้ำที่ได้รับ และค่าการแผ่รังสีอาทิตย์ที่กระทบต่อผิวของจานรวมรังสี โดยเป็นการวัดค่าประสิทธิภาพสูงสุดของน้ำ ที่ได้รับจากโรงอบแห้ง ดังสมการ 20

$$\eta = \frac{Q_u}{Q} \times 100\% = \frac{mC(t_2 - t_1)}{HA_c} \quad (20)$$

- โดยที่ η คือ ประสิทธิภาพทางความร้อนทั้งระบบ (%)
- m คือ น้ำหนักของน้ำในระบบ (kg)
- C คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำ (4.19 kJ/kg.°C)
- t_2 คือ อุณหภูมิน้ำออก (°C)
- t_1 คือ อุณหภูมิน้ำเข้า (°C)
- H คือ ค่าการแผ่รังสีตรงที่กระทบโรงงานอบแห้ง (KJ/m²)
- A_c คือ พื้นที่ของโรงงานอบแห้ง (m)

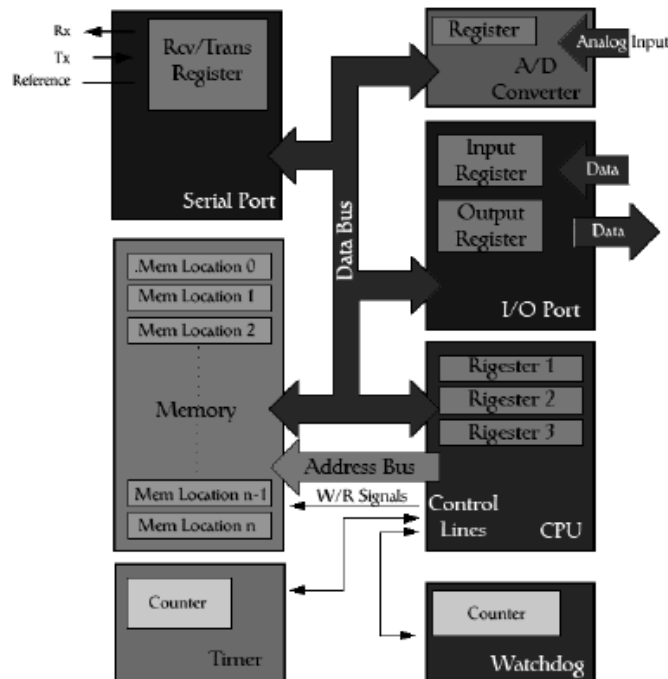
ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

1. ความหมายของไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (อังกฤษ: Microcontroller มักย่อว่า μC , uC หรือ MCU) คือ อุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก ซึ่งบรรจุความสามารถที่คล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ โดยในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวมเอาซีพียู หน่วยความจำ และพอร์ต ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน โดยระบบคอนโทรลขนาดเล็กเรียกอีกอย่างหนึ่งคือเป็นระบบคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย โดยผ่านการออกแบบวงจรให้เหมาะกับงานต่าง ๆ และยังสามารถโปรแกรมคำสั่งเพื่อควบคุมขา Input/Output เพื่อสั่งงานให้ไปควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ

2. หน้าที่ส่วนต่าง ๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์

โครงสร้างหน้าที่โดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถแบ่งออกมาได้เป็น 5 ส่วนดังต่อไปนี้



ภาพ 15 หน้าที่ของส่วนต่าง ๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์

ที่มา: ทันพงษ์ ภูริรักษ์, มปป.

จากภาพ 15 จะเห็นได้ว่าหน้าที่ของหน้าที่โดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์ มีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1. หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (CPU : Central Processing Unit)
2. หน่วยความจำ (Memory) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือหน่วยความจำที่มีไว้สำหรับเก็บโปรแกรมหลัก (Program memory) เช่น Flash memory ลักษณะการทำงานของหน่วยความจำนี้ เป็นหน่วยความจำที่อ่าน-เขียนได้ด้วยไฟฟ้า เปรียบเสมือนฮาร์ดดิสก์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ คือข้อมูลใด ๆ ที่ถูกเก็บไว้ในนี้จะไม่สูญหายไปแม้ไม่มีไฟเลี้ยง อีกส่วนหนึ่งคือหน่วยความจำข้อมูล (Data memory) ใช้เป็นเหมือนกับกระดานทดในการคำนวณของซีพียู และเป็นที่พักข้อมูลชั่วคราวขณะทำงาน แต่หากไม่มีไฟเลี้ยง ในการทำงานข้อมูลจะหายไปคล้ายกับหน่วยความจำ (RAM) ในเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่ว ๆ ไป แต่สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์สมัยใหม่ หน่วยความจำข้อมูลมีทั้งที่เป็นหน่วยความจำแรม ซึ่งข้อมูลจะหายไปเมื่อไม่มีไฟเลี้ยง และเป็นอีอีพรอม (EEPROM : Erasable Electrically Read-Only

Memory) ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้แม้ไม่มีไฟเลี้ยงก็ตาม ในอดีตเป็นหน่วยความจำโปรแกรมแบบ EPROM หน่วยความจำที่ลบด้วยแสง

3. ส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก หรือพอร์ต (Port) มี 2 ลักษณะคือ พอร์ตอินพุต (Input Port) และพอร์ตส่งสัญญาณหรือพอร์ตเอาต์พุต (Output port) ส่วนนี้จะใช้ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก ถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญมาก พอร์ตอินพุตรับสัญญาณเพื่อนำไปประมวลผลและส่งไปแสดงผลที่พอร์ตเอาต์พุต เช่น การติดสว่างของหลอดไฟ เป็นต้น

4. ช่องทางเดินของสัญญาณ หรือบัส (BUS) คือเส้นทางการแลกเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลระหว่าง ซีพียู หน่วยความจำและพอร์ต เป็นลักษณะของสายสัญญาณจำนวนมากอยู่ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยแบ่งเป็นบัสข้อมูล (Data bus) บัสแอดเดรส (Address bus) และบัสควบคุม (Control bus)

5. วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากอีกส่วนหนึ่ง เนื่องจากการทำงานที่เกิดขึ้นในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ จะขึ้นอยู่กับการทำงานที่กำหนดจังหวะ หากสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่สูง จังหวะการทำงานก็จะสามารถทำได้ถี่ขึ้น ส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนั้น มีความเร็วในการประมวลผลสูงตามไปด้วย การเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ภาษาซีถือว่าเป็นภาษาระดับกลาง

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นพอสรุปได้ว่า ไมโครคอนโทรลเลอร์ คือ วิธีการในการออกแบบพัฒนา และแจกจ่ายสำหรับต้นฉบับของสินค้าหรือความรู้ โดยเฉพาะซอฟต์แวร์ โดยโอเพนซอร์ซถูกพิจารณาว่าเป็นทั้งรูปแบบหนึ่งในการออกแบบ โดยโอเพนซอร์เปิด โอกาสให้บุคคลอื่นนำเอาระบบนั้นไปพัฒนาในระบบการทำงานได้ต่อไป

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

1. ความสำคัญของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics: CFD) คือการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลต่างๆ การถ่ายเทความร้อน การแพร่กระจายของอนุภาค รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยหาผลเฉลยและจำลองพฤติกรรมที่เกิดขึ้น หรือกล่าวโดยสั้นก็คือวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการไหล พื้นฐานของซีเอฟดีคือการแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์ซึ่งเป็นสมการควบคุมการไหล กระบวนการทางซีเอฟดีถูกพัฒนาขึ้นในราวปี 1930 สำหรับจำลองการไหลรอบทรงกระบอกสองมิติ จากนั้นเมื่อเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์มีความก้าวหน้าขึ้น จึงได้พัฒนาสู่การจำลองแบบสามมิติโดยบริษัทและองค์กรด้านการบินต่าง ๆ อาทิ โบอิง ล็อกฮีด ดักลาส แม็คโดเนล นาซา เป็นต้น ทุกวันนี้ซีเอฟดีถูก

นำไปใช้ในการพัฒนาเรือดำน้ำ ผีเสื้อ อากาศยาน รถยนต์ เฮลิคอปเตอร์ การจำลองรถไฟ ความเร็วสูง เรือออร์ซสำหรับแข่งขัน และอื่น ๆ อีกมากมาย

ความสำเร็จของวิธีซีเอฟดี ส่งผลให้มีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายเพื่อแก้ปัญหาภาคอุตสาหกรรมและงานวิจัยต่าง ๆ อาทิ การไหลของอากาศผ่านรถยนต์และอากาศยานเพื่อหาแรงยกและแรงต้าน การไหลของกระแสผ่านลำเรือ การเผาไหม้ภายในกระบอกสูบและกังหันก๊าซ การไหลของของไหลผ่านปั๊มและเครื่องอัดไอ การหล่อเย็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กระบวนการทางด้านเคมี การไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านตึกตัวอาคาร การกระจายของมลภาวะในอากาศและน้ำ การทำนายสภาพอากาศ การไหลของเลือดในระบบหมุนเวียนของร่างกาย เป็นต้น ปัจจุบันซีเอฟดีถูกพัฒนาไปถึงขั้นใช้ทำนายการไหลแบบเทอร์บิวเลนต์และทรานสิชัน เพื่อให้ได้ความสมจริงของการจำลองการไหลที่นำไปสู่การออกแบบที่มีประสิทธิภาพขึ้น ตัวอย่างการใช้ซีเอฟดีวิเคราะห์ปัญหา

1.1 การใช้ซีเอฟดีทำนายทิศทางและลักษณะการกระจายตัวของควันที่เกิดจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ช่วงสงครามอิรัก ภาพถ่ายทางอากาศแสดงการกระจายของควัน พุทธิกรรมที่จำลองได้ด้วยซีเอฟดี (Patnaik et al, 1994) ซึ่งช่วยให้การจัดการด้านมลภาวะเป็นไปอย่างมีแบบแผน เช่น การวางแผนอพยพผู้คน การควบคุมการแพร่กระจาย เป็นต้น

1.2 การจำลองการไหลของอากาศผ่านสไปลเลอร์ของรถยนต์สูตรหนึ่ง นำไปสู่การปรับปรุงรูปทรงของสไปลเลอร์ให้มีความเหมาะสม และพุทธิกรรมที่จำลองได้โดยใช้ซอฟต์แวร์ซีเอฟดี STAR CCM+ ซึ่งพบว่ามีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับการทดสอบจริง (Malan et al, 2009)

1.3 ซีเอฟดีช่วยในด้านการเกษตรกรรม ใช้ทำนายการกระจายอุณหภูมิของอากาศภายในและรอบโรงเรือนเพาะปลูก ช่วยออกแบบรูปทรงโรงเรือนเพื่อให้การระบายอากาศและควบคุมอุณหภูมิเหมาะสมต่อการเพาะปลูก โรงเรือนเพาะปลูกพืช ผลจำลองการไหลของอากาศโดยใช้ซีเอฟดี (วิโรจน์ ลิ้มตระการ และคณะ, 2551)

1.4 ด้านวิศวกรรมโยธาได้นำซีเอฟดีไปช่วยในการทำนายผลกระทบของลมที่เกิดขึ้นเมื่อไหลผ่านตึกสูง เพื่อใช้ประกอบการออกแบบรูปทรงและโครงสร้างในการสร้างตึกสูง และภาพถ่ายผลจำลองการไหลผ่านตัวอาคารขนาดใหญ่

1.5 ด้านกลศาสตร์ชีวภาพได้นำวิธีซีเอฟดีไปช่วยทำนายระบบภายในร่างกาย เช่น การกระจายของอากาศที่ไหลผ่านเข้าสู่ปอด ความเค้นบนผนังเส้นเลือดหัวใจ เพื่อให้แพทย์ได้เข้าใจกระบวนการที่เกิดขึ้น เป็นข้อมูลนำไปสู่การวางแผนการรักษาและการเลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมปลอดภัย จำลองการแพร่กระจายของอนุภาคอากาศในท่อลมปอด การนำซีเอฟดีไป

จำลองการไหลของน้ำผ่านลำตัวนักว่ายน้ำ (ANSYS) ผลวิเคราะห์นำไปสู่การออกแบบท่าทางการว่ายน้ำที่เหมาะสมที่ช่วยลดแรงต้านที่จะเกิดขึ้น รวมถึงการออกแบบชุดและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการแข่งขัน

ดังนั้น การคำนวณพลศาสตร์ของไหล สมการศักย์ สมการความร้อน สมการคลื่นและสมการของเบอร์เกอร์ ทบทวนสมการนาเวียร์-สโตกส์และสมการชั้นขีดผิว ขั้นตอนวิธีสำหรับแก้สมการศักย์ สมการความร้อน สมการคลื่น สมการเบอร์เกอร์ สมการนาเวียร์-สโตกส์ และสมการชั้นขีดผิว ขั้นตอนวิธีแบบชัดแจ้งและแบบคลุมเคลือ ความแม่นยำ เสถียรภาพ และการพิจารณาเชิงเศรษฐศาสตร์ในการคำนวณด้วยขั้นตอนวิธีเชิงตัวเลขแบบต่าง ๆ เงื่อนไขขอบสำหรับปัญหาเอลลิปติก พาราโบลิก และไฮเปอร์โบลิก การพัฒนารหัสโปรแกรมสำหรับแก้ปัญหาอย่างง่าย การใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูปแก้ปัญหาการไหลที่ซับซ้อนหลายมิติ

2. สมการที่เกี่ยวข้องกับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

การจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นเป็นที่นิยมมากในงานออกแบบทางวิศวกรรม เพราะมีความสะดวก รวดเร็ว มีความแม่นยำ และช่วยลดอันตรายระหว่างการวิจัย เนื่องจากการไหลของระบบอากาศในโรงงานเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) จึงได้ศึกษาวิธีการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ (Reynolds Averaging Nabeier-Stokes, RANS) มาใช้กับสมการเคลื่อนที่ของการไหลแบบปั่นป่วน เพื่อแปลงสมการเคลื่อนที่การไหลแบบปั่นป่วน เพื่อแปลงสมการเคลื่อนที่ของการไหลแบบปั่นป่วน ให้อยู่ในรูปของค่าเฉลี่ย

2.1 สมการทรงมวล

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (21)$$

โดย p คือ ความหนาแน่นของของไหล

U_i และ x_i คือ ค่าความเร็วเฉลี่ย และค่าแกนพิกัดฉาก

2.2 สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = \frac{\partial(p_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right] \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\rho u_i \bar{u}_j) \quad (22)$$

โดย μ และ P_i คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดและความดันตามลำดับ สำหรับสมการโมเมนตัมที่ถูกเฉลี่ยด้วยวิธีการของเรย์โนลด์ ต่างจากสมการโมเมนตัมที่ยังไม่ได้ถูกเฉลี่ยเนื่องจากมีพจน์ความเค้นเรย์โนลด์ ซึ่งพจน์ที่เกิดขึ้นนี้เป็นพจน์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วนที่เกิดขึ้น โดยพจน์ความเค้นเรย์โนลด์มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้ (Bussinesq, 1877)

$$-pu_i^j \bar{u}_j = u_i \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left[pk + u_i \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \quad (23)$$

โดยที่ Eddy viscosity (μ_i) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (k) และค่าอัตราการลดลงของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (ε) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\mu_i = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (24)$$

3. แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด k- ε

โดยสมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (k) เขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left[\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right] \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (25)$$

สมการอัตราการลดลงของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (ε) เขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left[\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right] \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \left[C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{\varepsilon 3} G_b) \right] \frac{\varepsilon}{k} - \rho c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon}{k} \quad (26)$$

โดยที่

$$G_k = -\rho \bar{u}_i \bar{u}_j \left[\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (27)$$

$$G_b = -\rho \bar{u}_i \bar{u}_j \left[\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (28)$$

สำหรับค่าคงที่ต่าง ๆ ในสมการจะใช้ค่าคงที่ของ Launder & Sharma (1974) โดย C_μ , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, $C_{\varepsilon 3}$, σ_k , σ_ε และ σ_T มีค่า 0.09, 1.44, 1.92, 1, 1, 1.3 และ 0.9 ตามลำดับ

สำหรับการคำนวณค่าอุณหภูมิ สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการพลังงาน (Energy equation)

$$\frac{\partial(\rho C_p T u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\partial k T}{\partial x_i} \right] + S \quad (29)$$

สำหรับ T และ C_p คือ ค่าอุณหภูมิและความจำความร้อนจำเพาะ ส่วน S พจน์การผลิตความร้อน สำหรับสมการควบคุมการไหลและอุณหภูมิทั้งหมดจะถูกทำให้ไม่ต่อเนื่อง (Discretization)

ผักตบชวา

ผักตบชวา เป็นพืชน้ำล้มลุกอายุหลายฤดู สามารถอยู่ได้ทุกสภาพน้ำ มีถิ่นกำเนิดในแถบลุ่มน้ำแอมะซอนในทวีปอเมริกาใต้ มีดอก สีม่วงอ่อน คล้ายช่อดอกกล้วยไม้ และแพร่พันธุ์ได้อย่างรวดเร็วจนกลายเป็นวัชพืชที่ร้ายแรงในแหล่งน้ำทั่วไป มีชื่อเรียกในแต่ละท้องถิ่น ได้แก่ ผักปอด สระ ผักโรค ผักตบชวา ผักยะวา ผักอีโยก ผักปอง หรือ บัวลอย (พายัพ)



ภาพ 16 ผักตบชวา

ที่มา: สุญาณี เสสบุตร และคณะ (2545)

ผักตบชวามีลำต้นสั้นแตกใบเป็นกอลอยไปตามน้ำ มีไหล ซึ่งเกิดตามซอกใบแล้วเจริญเป็นต้นอ่อนที่ปลายไหล ถ้าน้ำตื้นก็จะหยั่งรากลงดิน ใบเป็นใบเดี่ยวรูปไข่หรือเกือบกลม ก้านใบกลมอวบน้ำตรงกลางพองออกภายในเป็นช่องอากาศคล้ายฟองน้ำช่วยให้ลอยน้ำได้ ดอกเกิดเป็นช่อที่ปลายยอดมีดอกย่อย 3-25 ดอก สีม่วงอ่อน มีกลีบดอก 6 กลีบ กลีบบนสุดขนาดใหญ่กว่ากลีบอื่นๆ และมีจุดเหลืองที่กลางกลีบ ขยายพันธุ์โดยการแยกต้นอ่อนที่ปลายไหลไปปลูก ผักตบชวาเป็นพืชที่ขยายพันธุ์ได้อย่างรวดเร็วโดยเฉพาะช่วงฤดูฝนจึงมีปริมาณมากในช่วงนั้น สารเคมีที่เราใช้กันอยู่ในชีวิตประจำวัน เช่น ผงซักฟอก ปุ๋ย เป็นธาตุอาหารของพืชน้ำโดยเฉพาะ ผักตบชวาเป็นอย่างดี แพผักตบชวาจะกีดขวางการเดินทางของน้ำ อัตราการไหลของน้ำจึงลดลง กีดขวางการระบายน้ำของประตูน้ำ อีกทั้งยังทำให้ระบบนิเวศเสียหาย แม้ผักตบชวาจะสามารถดูดซึมธาตุอาหารที่เป็นตัวการทำให้น้ำเสีย แต่เมื่อมีปริมาณมากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตใต้น้ำ กล่าวคือ สัตว์ใต้น้ำจะขาดออกซิเจนและตายลง รวมถึงการบดบังแสงแดดที่เป็นส่วนหนึ่งของการสังเคราะห์แสงของพืชใต้น้ำจะทำให้พืชเหล่านั้นเน่าและตายไป ดังนั้นจึงเกิดน้ำเน่าเสียอย่างง่ายดาย

ทั้งนี้ผักตบชวาสามารถช่วยบำบัดน้ำเสียโดยการทำหน้าที่กรองน้ำที่ไหลผ่านกอผักตบชวาอย่างช้า ๆ ทำให้ของแข็งแขวนลอยต่าง ๆ ที่ปนอยู่ในน้ำถูกสกัดกั้นกรองออก นอกจากนั้น ระบบรากที่มีจำนวนมากจะช่วยกรองสารอินทรีย์ที่ละเอียด และจุลินทรีย์ที่อาศัยเกาะอยู่ที่ราก จะช่วยดูดสารอินทรีย์ไว้ด้วยอีกทางหนึ่ง รากผักตบชวาจะดูดสารอาหารที่อยู่ในน้ำ ทำให้ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียจึงถูกกำจัดไป อย่างไรก็ตามไนโตรเจนในน้ำเสียนั้นส่วนมากจะอยู่ในรูปสารประกอบทางเคมี เช่น สารอินทรีย์ไนโตรเจน แอมโมเนียไนโตรเจน ไนเตรตไนโตรเจน พบว่าผักตบชวาสามารถดูดไนโตรเจนได้ทั้ง 3 ชนิด แต่ในปริมาณที่แตกต่างกันคือ ผักตบชวาสามารถดูดอินทรีย์ไนโตรเจนได้สูงกว่าไนโตรเจนในรูปอื่น ๆ คือ ประมาณร้อยละ 95 ขณะที่ไนเตรตไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนจะเป็นประมาณร้อยละ 80 และร้อยละ 77 ตามลำดับ สถานที่แรกในประเทศไทยที่ใช้การบำบัดด้วยวิธีนี้คือบึงมักกะสัน ซึ่งเป็นโครงการบึงมักกะสันอันเนื่องมาจากพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหาภูมิพลอดุลยเดช โดยใช้หลักการบำบัดน้ำเสียตามแนวทฤษฎีการพัฒนาโดยการกรองน้ำเสียด้วยผักตบชวา (Filtration) (สุญาณี เสสบุตร และคณะ, 2545)

กล้วยน้ำว้า

กล้วยน้ำว้า (Cultivated banana) เป็นกล้วยพันธุ์หนึ่ง พัฒนามาจากลูกผสมระหว่างกล้วยป่ากับกล้วยตานี บริโภคกันอย่างแพร่หลาย ปลูกง่าย รสชาติดี สำหรับกล้วยน้ำว้า แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามสีของเนื้อ คือ น้ำว้าแดง น้ำว้าขาว และน้ำว้าเหลือง คนไทยรับประทานกล้วยน้ำว้าทั้งผลสด ต้ม ปิ้ง และนำมาประกอบอาหาร นอกจากนี้ยังมีกล้วยน้ำว้าดำ ซึ่งเปลือกมีสีครั่งปนดำ แต่เนื้อมีสีขาว รสชาติอร่อยคล้ายกล้วยน้ำว้าขาว สำหรับกล้วยดิบเหมาะที่จะรับประทานผลสด เพราะเมื่อนำไปย่าง หรือต้มจะมีรสฝาด กล้วยน้ำว้ามีชื่อพื้นเมืองอื่นเช่น กล้วยน้ำว้าเหลือง กล้วยใต้ หรือ กล้วยอ่อน

คุณค่าทางอาหารและยาของกล้วยน้ำว้าเมื่อเทียบกับกล้วยหอมและกล้วยไข่ กล้วยน้ำว้าจะให้พลังงานมากที่สุด กล้วยน้ำว้าห่ามและสุกมีธาตุเหล็กในปริมาณสูง ช่วยสร้างเม็ดเลือดแดง ป้องกันโรคโลหิตจาง มีแคลเซียม ฟอสฟอรัส และวิตามินซีช่วยบำรุงกระดูก ฟัน และเหงือกให้แข็งแรง ช่วยให้ผิวพรรณดี มีเบต้าแคโรทีน โนอาซีนและใยอาหาร ช่วยให้ระบบขับถ่ายคล่องขึ้น กินกล้วยน้ำว้าสุก จะช่วยระบายท้องและสามารถรักษาโรคเลือดออกตามไรฟันในเด็กเล็กได้ ช่วยลดอาการเจ็บคอ เจ็บหน้าอกที่มีอาการไอแห้งร่วมด้วย โดยกินวันละ 4-6 ลูก แบ่งกินทีละครั้ง ก็ได้ กินกล้วยก่อนแปรงฟันทุกวันจะทำให้ไม่มีกลิ่นปาก และผิวพรรณดีเห็นผลได้ใน 1 สัปดาห์ กล้วยน้ำว้าดิบและห่ามมีสารแทนนิน เพคตินมีฤทธิ์ฝาดสมาน รักษา

อาการท้องเสียที่ไม่รุนแรงได้ โดยกินครั้งละครึ่งผล หรือ 1 ผล อาการท้องเสียจะทุเลาลง นอกจากนี้จากการศึกษาวิจัยยังพบว่า มีผลในการรักษาโรคกระเพาะได้อีกด้วย ซึ่งคุณค่าทางโภชนาการของกล้วยน้ำว้าประกอบไปด้วย น้ำ 75.7 กรัม พลังงาน 85 แคลอรี โปรตีน 1.1 กรัม ไขมัน 0.2 กรัม คาร์โบไฮเดรต 22.2 กรัม เถ้า 0.8 กรัม แคลเซียม (Ca) 8.0 กรัม เหล็ก (Fe) 0.7 มิลลิกรัม โพแทสเซียม (K) 370 มิลลิกรัม แมกนีเซียม (Mg) 33 มิลลิกรัม วิตามินเอ 190 IU วิตามินซี 10 มิลลิกรัม ไทอามีน (Thiamine) 0.05 มิลลิกรัม ไรโบฟลาวิน (Riboflavin) 0.06 มิลลิกรัม และไนอาซิน (Niacin) 0.7 มิลลิกรัม



ภาพ 17 กล้วยน้ำว้า

ที่มา: สุญาณี เสสบุตร และคณะ (2545)

ทั้งนี้กล้วยน้ำว้า สามารถแปรรูปได้หลากหลาย อย่างกล้วยน้ำว้าสุกสามารถใช้ทำเป็นขนม ของหวานต่าง ๆ เช่น กล้วยเชื่อม กล้วยบวชชี มีลักษณะสีเหลืองทั้งเปลือก และเนื้อ มีรสหวาน เหนียวนุ่ม นำมารับประทานเป็นผลไม้ และทำขนมหวาน แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น กล้วยตาก หรือ ข้าวต้มมัด เป็นต้น (ฐานข้อมูลส่งเสริมและยกระดับคุณภาพสินค้า OTOP, 2023)

การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนและระยะเวลาดังทุน

จุดคุ้มทุนและระยะเวลาดังทุน คือ จุดที่ได้ทุนคืนพอดี เช่นเดียวกับ คำว่า ระยะคืนทุน ซึ่งก็คือ ระยะเวลาที่ได้คืนทุนพอดี ซึ่งถ้าเรารู้ว่าจุดใดคือจุดคุ้มทุน ก็สามารถตัดสินใจและดำเนินงานผลิตให้มากกว่า เช่นเดียวกับ คำว่า ระยะเวลาดังทุน ถ้าทราบว่าสามารถคืนทุนได้ที่

ปีแล้ว ก็สามารถตัดสินใจและดำเนินงานผลิตให้นาน กว่าระยะเวลาคืนทุน เพื่อให้กำไรมาจากการดำเนินงาน

จุดคุ้มทุน (Breakeven point) คือ จุดที่รายรับมีค่าเท่ากับต้นทุนพอดี โดยทั่วไปแล้วจะให้ความสนใจในปริมาณที่จุดคุ้มทุน ซึ่งเรียกว่า Breakeven quantity (QRE) หน่วยของปริมาณที่จุดคุ้มทุน มักเป็นหน่วยต่อปี เปอร์เซ็นต์ของกำลังการผลิต ชั่วโมงต่อเดือน เป็นต้น

จากความหมายของจุดคุ้มทุนนั้น จะเห็นได้ว่าจะมีความเกี่ยวข้องกับสองอย่างคือ รายรับ และต้นทุนรายรับ (Revenue, R) โดยปกติแล้วจะแปรผันตรงกับจำนวนหน่วยที่ผลิตหรือขาย ดังนั้น ถ้ากำหนดให้ P คือราคาขายต่อหน่วย q คือ ปริมาณการขายจะได้

$$R = P \times q \quad (30)$$

ในขณะที่ต้นทุน จะสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ต้นทุนคงที่ และต้นทุนผันแปร โดยต้นทุนคงที่ (Fixed cost-FC) หมายถึง ต้นทุนที่ไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนหน่วยที่ผลิต และต้นทุนผันแปร (Variable cost-VC) คือ ต้นทุนที่ขึ้นอยู่กับจำนวนหน่วยที่ผลิต ดังนั้นถ้าทำการผลิตมากก็จะเสียต้นทุนประเภทนี้มาก ถ้าทำการผลิตน้อยจะเสียต้นทุนประเภทนี้น้อย เช่น ค่าแรงทางตรง ค่าวัตถุดิบทางตรง ค่าการตลาด ถ้า v คือต้นทุนผันแปรต่อหน่วยจะได้

$$VC = v \times q \quad (31)$$

ในการพิจารณาในด้านต้นทุน ต้องนำทั้งต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปรมารวมกันซึ่งเรียกว่า ต้นทุนรวม (Total cost-TC) ซึ่งเขียนในสมการได้ดังนี้

$$TC = FC + v \times q \quad (32)$$

ระยะเวลาคืนทุน (Payback perio) คือ ระยะเวลาที่ทำให้ได้เงินทุนคืนพอดี หรือ ระยะเวลาที่ทำให้รายรับมีค่าเท่ากับต้นทุนพอดี ซึ่งมีหน่วยเป็นช่วงเวลา และมักมีหน่วยเป็นปี จากสมการ (33) จะได้

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \text{ต้นทุนคงที่} / \text{ต้นทุนผันแปร} \quad (33)$$

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จ่านงค์ นุกุลคาม และคณะ (2542) ได้ทำการวิจัยกระบวนการผลิตกล้วยตากแบบต่อเนื่องด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า พบว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบให้อยู่ในระดับที่กำหนดได้ในช่วงเวลา 12.01-24.00 น. และมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการทดลองตากกล้วยนอกตู้อบซึ่งศึกษาในช่วงระยะเดียวกันทั้ง 3 รุ่น คือ 1.78 และ 0.02, 1.49 และ 0.04, 1.41 และ 0.03 ตามลำดับ ผลการศึกษาทางเคมีของกล้วยทั้ง 3 รุ่นที่ตากในตู้อบและนอกตู้อบพบว่าทั้งความชื้น ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณกรด น้ำตาลรีดิวซ์

และความสดของสีกล้วยอยู่ในระดับ 7.5 ในกลุ่มสีเหลือง-แดงเหมือนกัน ผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ ปริมาณยีสต์ และรา ในครั้งแรกต่ำกว่าครั้งต่อๆ มา โดยปริมาณจุลินทรีย์ ยีสต์และรา ที่พบในกล้วยตากนอกตู้สูงขึ้นไปเกินกว่ามาตรฐานในการศึกษารุ่นที่ 2 และ 3 จุลินทรีย์ E.coli ในรุ่นที่ 1 มีต่ำกว่ามาตรฐานและรุ่นต่อมามีสูงเกินมาตรฐานทั้งกล้วยตากในตู้และนอกตู้และไม่พบจุลินทรีย์ Salmonell และ Staphylococcus Aureus ทั้ง 2 กลุ่ม ตัวอย่างทั้ง 3 รุ่น โดยในรุ่นที่ 1 พบ Clostridium Perfringens และไม่พบในรุ่นที่ 2 และ 3 ทั้ง 2 กลุ่มตัวอย่างผลการศึกษาการยอมรับคุณภาพ และประสาทสัมผัสด้านรสชาติ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส และระดับการยอมรับพบว่ากล้วยตากนอกตู้ได้รับการยอมรับมากกว่าตากในตู้ ต้นทุนผลตอบแทนการผลิตพบว่าการตากแบบต่อเนื่องมีต้นทุนอยู่ที่ กิโลกรัมละ 15.18 บาท 12.63 บาท และ 44.21 บาท ตามลำดับ

พิภพ นราแก้ว และปกรณ์ สันตกิจ (2558) ได้ทำการศึกษาการพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ พบว่า โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์มีพื้นที่ในการอบแห้ง 15 m² ภายในมีชั้นวางจำนวน 4 แถว มีพื้นที่วางของที่จะอบแห้ง 2.0 m² ต่อ 1 แถว โดยสามารถอบพริกชี้ฟ้าสดจำนวน 400 kg ต่อครั้ง เป็นพริกแห้ง 174 kg ต่อครั้ง ทำให้แห้งมีความชื้นของพริกชี้ฟ้า 7 (%Wb) ใช้เวลาในการอบแห้ง 3 วัน ซึ่งดีกว่าการตากแดดโดยธรรมชาติซึ่งใช้เวลาและได้ความชื้นที่มากกว่า และยังมีราคาในการสร้างที่ถูกลงกว่าโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีขายอยู่ในท้องตลาด โดยดูจากปริมาณของพื้นที่ที่ใกล้เคียงกัน จากผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางความร้อนของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ที่พัฒนาขึ้นมีค่าเท่ากับร้อยละ 60 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

ปาณิศรา อ่อนดอกไม้ (2560) ทำการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยโรงอบพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ (Greenhouse solar dryer) พบว่า ขนาด พื้นที่ 3.0 m x 6.0 m ภายในมีชั้นวางผลิตภัณฑ์จำนวน 3 ชั้นเหมือนกัน ทำการทดสอบใช้ข้าวเปลือกที่ความชื้น เริ่มต้น 25 %wb น้ำหนักทั้งหมด 1,740 kg โดยใช้เวลา 2 วันในการอบแห้ง วันละ 12 hr พบว่า อุณหภูมิภายในโรงอบแห้งมีอุณหภูมิประมาณ 60-75 °C ประสิทธิภาพความร้อนเฉลี่ยของโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เท่ากับ 10.61% ผลการทดสอบพบว่า ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกภายในโรงอบแห้งจะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง เหลือความชื้นสุดท้าย ประมาณ 15 %wb และน้ำหนักแห้งสุดท้ายของข้าวเปลือกเหลือ 1,580 kg ซึ่งเหมาะสมกับชุมชนที่ต้องการกำลังการผลิตขนาดเล็กของชุมชนบ้านวังป่อง จังหวัดเชียงใหม่

แพด็จ ไชยมงคล (2557) ได้ศึกษาการจัดการพลังงานไฟฟ้าในระบบจำหน่าย แบบสมาร์ทกริดอย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ข้อมูลประกอบด้วย แบบจำลองระบบไฟฟ้า รูปแบบ

การใช้โหลดรายวัน (Daily load profile) แบบจำลองกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Photo voltaic profile or PV) และศึกษาเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของระบบจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่ (Battery energy Storage System or BESS) ใช้ข้อมูลของสถานีไฟฟ้าสระบุรี 5 ในช่วงวันที่ 21-30 เม.ย. 2555 ซึ่งเป็นค่าการใช้กำลังไฟฟ้าทุกๆ 30 นาที รวมระยะเวลา 24 hr โดยหาตัวแทนรูปแบบการใช้ไฟฟ้าของสถานีนี้ แบบจำลองระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่โหลดมีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ ผลการหาตำแหน่งติดตั้งของ BESS ที่เหมาะสมที่ทำให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบน้อยที่สุดนั้น ขึ้นอยู่กับรูปแบบของแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง ขนาดรวม การกระจายตัว และความหนาแน่น โดยตำแหน่งที่เหมาะสมของ BESS สำหรับ Total PV ขนาด 2 4 6 MW คือ ระยะทาง 62.5% 37.5% และ 12.5% ซึ่งทั้ง 3 ขนาด PV มีการกระจายตัว แบบกลางทาง และมีความหนาแน่นแบบ ปลายทาง สม่ำเสมอ และต้นทาง ตามลำดับ ส่วน Total PV ขนาด 8 MW ตำแหน่งติดตั้ง BESS ที่เหมาะสมคือ 12.5 % โดยที่ PV กระจายตัวสม่ำเสมอและหนาแน่นปลายทางโดยจะพิจารณาเฉพาะในกรณีที่โหลดในแบบจำลองระบบไฟฟ้ามีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอเท่านั้นโดยสามารถใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาเบื้องต้นสำหรับการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งของ BESS ที่เหมาะสมเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดไม่ให้เกิดค่าที่กำหนดและสอดคล้องกับขนาด Total PV ทั้งนี้ต้องมีการควบคุมแรงดันที่สถานีไฟฟ้าให้สอดคล้องกับขนาดของ Total PV ที่เชื่อมโยงในระบบเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาแรงดันเกินได้

สมพล โคศรี (2554) ได้ศึกษาระบบควบคุมและจัดการพลังงานสมาร์ทกริดสำหรับระบบผลิตไฟฟ้า แบบแยกเดี่ยวจากพลังงานทดแทน พบว่า จากการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แบบผสมผสานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลและมีแบตเตอรี่สำรอง โดยใช้โปรแกรม Homer ในการจำลองการทำงานของระบบ ซึ่งพบว่าการใช้พลังงานตลอดทั้งวัน เริ่มจากเวลา 0.00-03.30 น. จะเป็นช่วงที่แบตเตอรี่มีการจ่ายโหลดที่ 600 วัตต์ เมื่อเวลา 03.30-07.00 น. จะเห็นว่าการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำการจ่ายโหลดและชาร์จแบตเตอรี่ จึงทำให้กราฟสูงขึ้นเกือบ 2 เท่า อย่างไรก็ตามจากผลการจำลองผสมผสานจะเห็นว่ามีการจ่ายโหลดได้อย่างต่อเนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ มีข้อเสนอแนะว่า ควรมีการทดสอบกับระบบโหลดหลาย ๆ ชนิด เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโหลดแต่ละชนิดว่าส่งผลกับระบบเช่นไร และจะได้ปรับปรุงพัฒนาระบบให้มีสมรรถนะสูงสุดต่อไป นอกจากนี้ในส่วนของ การควบคุมชุด PV-Simulator ในโครงการนี้เป็นการควบคุมแบบแมนนวลในการปรับพารามิเตอร์ จึงเสนอว่า หากมีการใช้งานในระยะยาว ควรจะต้องใช้การควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรม Macview

วิศิษฐ์ ชูประเสริฐ (2555) ได้ศึกษาการนำความร้อนปล่อยทิ้งจากระบบทำน้ำเย็น ร่วมกับการใช้ฮีตปั๊มในการผลิตน้ำร้อน มุ่งศึกษาถึงกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน โดยการนำความร้อนปล่อยทิ้งจากระบบทำน้ำเย็นในระบบปรับอากาศร่วมกับการใช้ระบบฮีตปั๊มในการผลิตน้ำร้อน ด้วยวิธีการทดลองเก็บข้อมูลจากชุดทดลอง ในการทดลองนั้น ได้ทำการควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อหาความสัมพันธ์ที่ส่งผลถึงปริมาณและอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ผลิตได้ และศึกษาถึงพฤติกรรมการทำงานของระบบทำน้ำเย็นและฮีตปั๊ม เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบและปรับปรุงระบบจริง และลดปริมาณการใช้พลังงานในการผลิตน้ำร้อนต่อไป ผลจากการทดลองเมื่ออัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าลดลง อุณหภูมิน้ำร้อนและกำลังไฟฟ้าของเครื่องอัดไอในระบบฮีตปั๊มจะมีค่าเพิ่มขึ้น และในทางตรงกันข้าม เมื่ออัตราการไหลของน้ำมากขึ้น อุณหภูมิของน้ำร้อนและกำลังไฟฟ้าของเครื่องอัดไอในระบบฮีตปั๊มจะมีค่าลดลง ดังนั้นอุณหภูมิของน้ำร้อน จึงขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบฮีตปั๊มจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5.01 เป็น 6.39, 6.77, 7.21, 7.56 และ 7.66 คิดเป็น 27.5%, 35.1%, 43.9%, 50.9% และ 52.9% ที่อัตราการไหลของน้ำร้อนเท่ากับ 4, 6, 8, 10, 12 และ 15.5 l/min ตามลำดับ โดยที่ระบบทำความเย็นมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะเฉลี่ยอยู่ที่ 3.60

สรารุช พลวงษ์ศรี (2556) ได้ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนของระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่มีปั๊มความร้อนเสริมโดยใช้สารละลายเงินนาโนในตัวรับรังสีอาทิตย์ งานวิจัยนี้ได้ใช้สารละลายเงินนาโน ความเข้มข้น 10,000 ppm เป็นของไหลในตัวรับรังสีอาทิตย์ ของระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่มีปั๊มความร้อนให้ความร้อนเสริม ในกรณีที่ระดับความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ไม่เพียงพอ การศึกษาจะใช้ข้อมูลสมรรถนะของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบเมื่อใช้สารละลายเงินนาโน ขนาดพื้นที่รับรังสีประมาณ 2.16 m² จำนวน 2 แผง ต่อขนานกัน โดยมีคุณลักษณะของตัวรับรังสีอาทิตย์ ได้แก่ $FR(\text{in-line } \tau \alpha)_e$ และ FRUL มีค่า 0.816 และ 7.123 W/m²K เทียบกับค่า 0.723 และ 8.314 W/m²K ในกรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน ตัวรับรังสีนี้จะให้ความร้อนแก่ถังน้ำร้อนหุ้มฉนวนอย่างดี ขนาด 500 liter ซึ่งมีปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำงาน R134 a ที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้า 380 W ในการให้ความร้อนเสริม ในกรณีที่อุณหภูมิน้ำในถังต่ำกว่า 45°C การเปรียบเทียบ จะใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์ ภายใต้สภาพการใช้ของอาคารแห่งหนึ่ง ในจังหวัดเชียงใหม่ การศึกษาจะคำนวณความร้อนที่ได้จากตัวรับรังสีอาทิตย์ และปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปั๊มความร้อน จากผลการศึกษาพบว่าระบบที่ใช้สารละลายเงินนาโน ตัวรับรังสีอาทิตย์จะสามารถทำงานโดยมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

กว่ากรณีที่ใช้ น้ำ เป็นสารทำงาน เนื่องจากสารละลายเงินนาโนสามารถดึงความร้อนจากตัวรับรังสีอาทิตย์ได้ดีกว่า ส่งผลให้ความต้องการความร้อนเสริมจากปั๊มความร้อนลดลง ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงในการลดแก๊สเรือนกระจกที่เกิดจากผลิตไฟฟ้าได้ปีละ 2,727.81 kg CO₂

วสันต์ จินธาดา (2560) ได้ศึกษาลักษณะรูปทรงของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่งผลต่อการอบแห้งยางพาราแผ่น งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะรูปทรงของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบการพาความร้อนโดยธรรมชาติสำหรับการอบแห้งยางพาราแผ่นในกรณีที่มีพื้นที่การสวางเท่ากัน ความสูงเท่ากัน ขนาดช่องระบายอากาศและความสูงของช่องระบายอากาศเท่ากัน ด้วยโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์รูปทรงแตกต่างกัน 3 แบบ คือ

- 1) โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ตัวห้องเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมส่วนหลังคาเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม
- 2) โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ตัวห้องเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมส่วนหลังคาเป็นรูปทรงโค้ง และ
- 3) โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์รูปทรงพาราโบลา จากผลการทดลองโดยวิเคราะห์จากโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งสามแบบไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามความชื้นสัมพัทธ์อากาศในโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบที่ 2 มีค่าต่ำที่สุด จึงส่งผลให้โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบที่ 2 มีคุณสมบัติในการอบแห้งยางพาราแผ่นได้ดีที่สุดซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับการอบแห้งยางพาราแผ่น 50°C ความชื้นสัมพัทธ์อากาศเฉลี่ย 37% ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ย 35°C ความชื้นสัมพัทธ์สิ่งแวดล้อมเฉลี่ย 60% ค่ารังสีดวงอาทิตย์ 200-1,100 W/m² สามารถอบแห้งยางพาราแผ่นให้มีความชื้นต่ำกว่า 1% มาตรฐานแห้ง เป็นยางพาราแผ่นคุณภาพดี โดยใช้เวลาในการอบแห้งยางพาราแผ่น 5 วัน

พรพิมล กันทะวงศ์ และคณะ (2557) ได้ศึกษาการควบคุมตู้อบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนด้วยระบบสมองกลฝังตัว พบว่า การนำระบบสมองกลฝังตัว (Embedded system) เข้ามาควบคุมการทำงานให้ระบบมีความชาญฉลาดทำให้กระบวนการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และสามารถควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น และเวลาได้ตามที่กำหนดไว้ ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการอบแห้งสูงมาก

อัญชณา อุประกุล (2558) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การอบแห้งผักตบชวาโดยใช้ระบบปั๊มความร้อน พบว่า ตู้อบด้วยลมร้อนนี้สามารถทำการกำจัด ความชื้นออกจากผักตบชวาแทนการตากแดด ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาในการกำจัดความชื้นนาน ดังนั้นการใช้ตู้อบลมร้อนสามารถลดระยะเวลาในการกำจัดความชื้นลง และสามารถทำการอบแห้งได้ในทุกช่วงสภาวะอากาศ ชุดลมร้อนในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องปรับอากาศแบบหน้าต่างขนาด 9000 บีทียูชั่วโมง และสารทำงานที่ใช้ในระบบเป็น R-22 โดยในงานวิจัยจะทำการศึกษาอุณหภูมิ 3 ช่วงอุณหภูมิ คือ

40°C, 50°C และ 60°C และเวลาที่ศึกษาในการอบที่ 4, 5 และ 6 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าทั้งอุณหภูมิ และเวลายอบมีผลต่อการอัตราการอบแห้ง โดยสภาวะที่เหมาะสมในการอบไล่ความชื้นของผักตบชวา พบว่า อุณหภูมิ 50°C และเวลาที่ใช้ในการอบ อยู่ที่ 4 ชั่วโมง ได้ผักตบชวาไม่แห้งกรอบเกินไป เมื่อเทียบกับการตากแห้งแบบธรรมชาติแล้วจะต้องใช้เวลาในการตากแห้งอยู่ที่ 3-4 วัน ทำให้ลดเวลาในการเตรียมวัตถุดิบสำหรับการผลิตสินค้าจัสกันได้

ปิยวรา วัฒนนะ (2562) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบครึ่งทรงกลมสำหรับอบแห้ง ผลผลิตทางการเกษตร พบว่า การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน โดยกำหนดเวลาในการทดลอง ตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 17.00 น. การทดลองส่วนแรก ศึกษาลักษณะการกระจายอุณหภูมิของอากาศร้อน เพื่อเพิ่มศักยภาพของการอบแห้งในการทดลองนี้แบ่งเป็น 2 กรณี กรณีแรกให้เฉพาะพัดลมดูดอากาศทำงาน และกรณีที่สองให้พัดลมดูดอากาศทำงานร่วมกับพัดลมตีคววน การทดลองเก็บข้อมูลเบื้องต้นนี้ ได้วัดอุณหภูมิและรังสีดวงอาทิตย์ เป็นเวลา 8 วัน ผลการทดลองพบว่า การกระจายอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้พัดลมตีคววน มีค่าใกล้เคียงกัน คืออยู่ในช่วง 37-42 องศาเซลเซียส ซึ่งมีส่วนต่างของอุณหภูมิที่ 5 องศาเซลเซียส ในทางตรงข้ามการกระจาย อุณหภูมิของอากาศร้อนโดยไม่ใช้พัดลมตีคววนมีค่าแตกต่างกันคืออยู่ในช่วง 30-45 องศาเซลเซียส โดยที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยคือ 480 วัตต์ต่อตารางเมตรต่อวัน ในส่วนประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าประมาณ 23.75 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าการอบแห้งแบบที่ใช้พัดลมตีคววนมีผลทำให้การกระจายอุณหภูมิของอากาศร้อนค่อนข้างกระจายอย่างทั่วถึงภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ การทดลองส่วนที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการตากแห้งพริกแบบธรรมชาติ และตากในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้พัฒนาโดยการประยุกต์ใช้อัลกอริทึม ณ เวลา เดียวกัน ที่ความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุด 1,200 วัตต์ต่อตารางเมตร อุณหภูมิและความชื้นแวดล้อมเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และ 90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีอุณหภูมิและความชื้นภายในเท่ากับ 61 องศาเซลเซียส และ 30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ความชื้นพริกเริ่มต้น 295.63 เปอร์เซ็นต์ มาตรฐานแห้ง ตากในเครื่องอบแห้งเหลือความชื้นสุดท้ายของพริก 6.23 เปอร์เซ็นต์ มาตรฐานแห้ง ใช้เวลาเพียง 3 วัน ดีกว่าตากแบบธรรมชาติใช้เวลา 5 วัน เหลือความชื้นสุดท้ายของพริก 12.36 เปอร์เซ็นต์ มาตรฐาน แห้ง พบว่าเครื่องอบแห้งที่ได้พัฒนาโดยการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมนี้ มีศักยภาพในการอบแห้งพริกตามมาตรฐาน สินค้าการเกษตร (มกษ.) การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ พบว่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ของโครงการ เท่ากับ 48,541.47 บาท อัตราผลตอบแทนของโครงการ (IRR) เท่ากับ 27 เปอร์เซ็นต์ มีระยะเวลาคืนทุน (PB) เท่ากับ 2.9 ปี

และการวิเคราะห์ด้านสิ่งแวดล้อมของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบครึ่งทรงกลมสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเมื่อเทียบกับการใช้ก๊าซหุงต้มลดลงเท่ากับ 1.494 kgCO₂e

จารุวัฒน์ เจริญจิต (2555) การประยุกต์ใช้พลังงานจากรังสีแสงอาทิตย์มาลดความชื้น ผลผลิตทางการเกษตร อาหารต่าง ๆ เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน การอบแห้งด้วยรังสีแสงอาทิตย์ในประเทศไทย พบว่า สามารถแบ่งตามวิธีการรับรังสีอาทิตย์ได้ 3 แบบ คือรับรังสีอาทิตย์โดยตรง โดยอ้อม และแบบผสม มีลักษณะการหมุนเวียนอากาศภายใน 2 ลักษณะ คือหมุนเวียนตามธรรมชาติ (Passive System) และหมุนเวียนแบบบังคับ (Active System) โดยปัจจัยหลักของการเพิ่มสมรรถนะการอบแห้งด้วยรังสีอาทิตย์ คือ อุณหภูมิ ความเร็ว และความชื้นของอากาศในระบบ

รวิภา ยงประยูร (2558) ศึกษาเรื่องการพัฒนากระบวนการผลิตให้ตอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก โดยการมีส่วนร่วมของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนกลุ่มอาชีพเพาะเห็ดบ้านทุ่งบ่อแป้น ตำบลปงยางคก อำเภอห้างฉัตร จังหวัดลำปาง สามารถเพิ่มค่า ประสิทธิภาพ 14.36% ซึ่งมากกว่าเครื่องอบแห้งเดิมที่มีค่าประสิทธิภาพเพียง 2% ในขณะที่การติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มความเร็วอากาศที่ไหลผ่านวัตถุชิ้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้เท่ากับ 24.29%

Ali et al (2022) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การวิเคราะห์เชิงทดลองและอุณหพลศาสตร์ของเครื่องเป่าลมพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งตัวสะสม V-groove double pass: มาตรการทางเศรษฐศาสตร์และเทคโนโลยี พบว่า เครื่องทำลมแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ปรับให้เหมาะสมในแง่ของประสิทธิภาพและประสิทธิภาพ สามารถแก้ปัญหาข้อกังวลหลักบางประการในภาคการแปรรูปทางอุตสาหกรรมเกษตรได้ เครื่องเป่าลมพลังงานแสงอาทิตย์สามารถลดต้นทุนด้านพลังงานส่วนใหญ่ของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย และสามารถให้พลังงานที่ยั่งยืนในพื้นที่ชนบทที่การเข้าถึงพลังงานมักถูกจำกัด ในการศึกษาครั้งนี้ เครื่องดักจับอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบผ่านสองช่องขนาดนำร่องได้รับการวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์ด้วยการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ตามเวลาจริงและอัตราการไหลของมวล (0.021–0.061 กก./วินาที) การนำข้อมูลเข้า และตรวจสอบความถูกต้องจากการทดลองในแง่ของประสิทธิภาพกฎข้อที่หนึ่งและข้อสอง ประสิทธิภาพของกระบวนการได้รับการประเมินโดยใช้มาตรการการอบแห้งแบบทดลอง ซึ่งรวมถึงปริมาณความชื้นขั้นสุดท้าย อัตราการอบแห้ง และประสิทธิภาพการใช้พลังงานสำหรับการอบแห้งแอปเปิ้ล เวลาต้นทุนพลังงานและการใช้พลังงานเฉพาะถูกคำนวณเพื่อเปิดเผยมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดของคอลเลคเตอร์อยู่ที่ 88.8 % ที่ 0.061 กก./

วินาที โดยมีประสิทธิภาพในการคายความร้อน 6.6% ซึ่งแสดงถึงการจัดหาที่มีประสิทธิภาพสำหรับการดำเนินการ ในแง่ของประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอบผ้า อัตราการไหลของมวล 0.041 กก./วินาที ให้การกำจัดความชื้นที่สูงกว่า การใช้พลังงานเฉพาะ (SEC) เท่ากับ 3.096 กิโลวัตต์ชั่วโมง/กก. แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ได้รับการตรวจสอบความถูกต้องด้วยการจับคู่การทดลองกับ RMSE ที่ยอมรับได้สำหรับช่วงของมาตรการที่ตรวจสอบ ระยะเวลาคืนทุนของพลังงานที่คำนวณโดยพลังงานรวมของระบบคือ 0.78 ปี ซึ่งหมายความว่าระบบสามารถจัดการกับการทำให้แห้งที่มีความจุสูงได้หากมีการปรับขนาดขึ้น ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดของคอลเลคเตอร์อยู่ที่ 88.8% ที่ 0.061 กก./วินาที โดยมีประสิทธิภาพในการคายความร้อน 6.6% ซึ่งแสดงถึงการจัดหาที่มีประสิทธิภาพสำหรับการดำเนินการ ในแง่ของประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอบผ้า อัตราการไหลของมวล 0.041 กก./วินาที ให้การกำจัดความชื้นที่สูงกว่า การใช้พลังงานเฉพาะ (SEC) เท่ากับ 3.096 กิโลวัตต์ชั่วโมง/กก. แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ได้รับการตรวจสอบความถูกต้องด้วยการจับคู่การทดลองกับ RMSE ที่ยอมรับได้สำหรับช่วงของมาตรการที่ตรวจสอบ ระยะเวลาคืนทุนของพลังงานที่คำนวณโดยพลังงานรวมของระบบคือ 0.78 ปี ซึ่งหมายความว่าระบบสามารถจัดการกับการทำให้แห้งที่มีความจุสูงได้หากมีการปรับขนาดขึ้น ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดของคอลเลคเตอร์อยู่ที่ 88.8% ที่ 0.061 กก./วินาที โดยมีประสิทธิภาพในการคายความร้อน 6.6% ซึ่งแสดงถึงการจัดหาที่มีประสิทธิภาพสำหรับการดำเนินการในแง่ของประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอบผ้า อัตราการไหลของมวล 0.041 กก./วินาที ให้การกำจัดความชื้นที่สูงกว่าการใช้พลังงานเฉพาะ (SEC) เท่ากับ 3.096 กิโลวัตต์ชั่วโมง/กก. แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ได้รับการตรวจสอบความถูกต้องด้วยการจับคู่การทดลองกับ RMSE ที่ยอมรับได้สำหรับช่วงของมาตรการที่ตรวจสอบ ระยะเวลาคืนทุนของพลังงานที่คำนวณโดยพลังงานรวมของระบบคือ 0.78 ปี ซึ่งหมายความว่าระบบสามารถจัดการกับการทำให้แห้งที่มีความจุสูงได้หากมีการปรับขนาดขึ้น 041 กก./วินาที ให้การกำจัดความชื้นที่สูงขึ้น การใช้พลังงานเฉพาะ (SEC) เท่ากับ 3.096 กิโลวัตต์ชั่วโมง/กก. แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ได้รับการตรวจสอบความถูกต้องด้วยการจับคู่การทดลองกับ RMSE ที่ยอมรับได้สำหรับช่วงของมาตรการที่ตรวจสอบ ระยะเวลาคืนทุนของพลังงานที่คำนวณโดยพลังงานรวม

ของระบบคือ 0.78 ปี ซึ่งหมายความว่าระบบสามารถจัดการกับการอบแห้งที่มีความจุสูงได้หากมีการปรับขนาดขึ้น

Pragnan et al (2023) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การตรวจสอบเชิงตัวเลขของวัสดุเปลี่ยนเฟสช่วยอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อมสำหรับการรักษาคุณภาพอาหาร พบว่า อุณหภูมิสูงและแสงแดดโดยตรง จากสภาพอากาศแบบเขตร้อนในอินเดียทำให้เกิดความร้อนมากเกินไปในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม หรือกระบวนการตากแดดกลางแจ้ง ด้วยเหตุนี้จึงเกิดการสูญเสียสารอาหารและการเกิดสีน้ำตาลของผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งนำไปสู่การเสื่อมคุณภาพของอาหาร การศึกษาครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายที่การสร้างแบบจำลองของวัสดุที่เก็บความร้อนแฝงแบบบูรณาการเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งรักษาอุณหภูมิห้องอบแห้งระหว่าง 50°C และ 55°C การศึกษานี้ยังประเมินการใช้งาน Phase Change Material (PCM) ในการกำหนดค่าต่าง ๆ เพื่อประเมินผลกระทบต่ออุณหภูมิการอบแห้ง แบบจำลองนี้ได้รับการตรวจสอบความถูกต้องในขั้นแรก จากนั้นจึงทำการประเมินประสิทธิภาพโดยละเอียดสำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในตัว PCM สำหรับสภาวะร้อนและแห้ง สำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ ได้แก่ ชিং พริกเหลือง หัวหอม พริกหยวกหวาน และมะเขือเทศ การศึกษานี้ประเมินการกำหนดค่าที่แตกต่างกันสามแบบของการรวม PCM ภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ได้แก่ (กรณี 1) เครื่องอบแห้งแบบอ้อมธรรมดา (กรณี 2) เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดัดแปลงที่มี PCM ภายในตัวสะสม และ (กรณี 3) เครื่องอบแห้งแบบดัดแปลงด้วยการรวม PCM ไว้ภายในห้องอบแห้ง ผลการวิจัยพบว่า กรณีที่ 3 เครื่องอบแห้งแบบดัดแปลงด้วยการรวม PCM ไว้ภายในห้องอบแห้ง สามารถรักษาสภาวะความร้อนที่จำเป็นสำหรับพืชผลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ๆ

Promise et al (2020) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบแอคทีฟสำหรับกล้วยต้ม พบว่า เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบแอคทีฟโหมดอ้อมได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นสำหรับการอบแห้งบานาน่าทำอาหารในเมืองอุมูไตค์ ประเทศไนจีเรีย เครื่องทำลมแห้งถูกสร้างขึ้นโดยเน้นที่ช่องอากาศเข้าเป็นพิเศษเพื่อตรวจสอบว่าบริเวณช่องอากาศเข้ามีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องเป่าหรือไม่ พื้นที่อากาศเข้าถูกพิจารณาเป็นห้าระดับและสี่รูปทรง ได้แก่ สี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยม วงกลม และสามเหลี่ยม ต้องใช้เครื่องอบแห้งทั้งหมด 52 เครื่องสำหรับการทดลอง โดยพิจารณาจากการรวมกันของปัจจัยและระดับของการทดลองโดยใช้ Central Composite Rotatable Experimental Design ที่นำมาใช้ในการศึกษา ตัวอย่างกล้วยปรุงอาหารสดๆ ได้มาจากตลาดในท้องถิ่น ปอกเปลือก ทำความสะอาด และฟานให้ได้ความหนาที่ต้องการสำหรับการทดลอง

อบแห้ง การตากแดดแบบเปิดถูกใช้เป็นตัวควบคุม ข้อมูลถูกรวบรวมในช่วงเวลาสองชั่วโมงในแต่ละวันของการอบแห้งระหว่างเดือนมกราคมถึงมีนาคม เครื่องทำแห้งพบว่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 4.53 เป็น 1.57 กก. ภายใน 9 ถึง 16 ชั่วโมงของการอบแห้ง ในขณะที่ความชื้นลดลงจาก 68.97 เป็น 12.00% (แบบเปียก) เครื่องอบผ้าสามารถประหยัดเวลาในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้เกือบ 40% เมื่อเทียบกับการตากแดดในที่โล่ง ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งอยู่ระหว่าง 13.85 ถึง 31.84% พบว่าพื้นที่ช่องอากาศเข้าของเครื่องเป่ามีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ เครื่องอบผ้าสามารถประหยัดเวลาในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้เกือบ 40% เมื่อเทียบกับการตากแดดในที่โล่ง ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งอยู่ระหว่าง 13.85 ถึง 31.84% พบว่าพื้นที่ช่องอากาศเข้าของเครื่องเป่ามีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ เครื่องอบผ้าสามารถประหยัดเวลาในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้เกือบ 40% เมื่อเทียบกับการตากแดดในที่โล่ง ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งอยู่ระหว่าง 13.85 ถึง 31.84% พบว่าพื้นที่ช่องอากาศเข้าของเครื่องเป่ามีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการอบแห้งของผลิตภัณฑ์

Abhay et al (2020) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบทางอ้อมและการทดลองหาค่าพารามิเตอร์การอบแห้งแอปเปิ้ลและแตงโม พบว่า ในเอกสารฉบับนี้ได้มีการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบทางอ้อม (ITSD) สำหรับการอบแห้งแอปเปิ้ลและแตงโม มีการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ ITSD และจลนศาสตร์การอบแห้งของชิ้นแตงโมและแอปเปิ้ล จากการวิเคราะห์การทดลอง ได้ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทพื้นผิว และพลังงานกระตุ้นของแอปเปิ้ลและแตงโม ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิภายในตู้อบแห้งแปรผันตามเวลาเนื่องจากความเข้มของแสงอาทิตย์แปรปรวนบ่อยครั้ง ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยของเครื่องเก็บและเครื่องอบแห้งคือ 54.5% และ 25.39% ระหว่างการอบแห้งแอปเปิ้ล และ 56.3% และ 28.76% สำหรับการอบแห้งแตงโม ตามลำดับ ปริมาณความชื้นของแอปเปิ้ลลดลงจาก 6.16 เป็น 0.799 กก./กก. ของแห้ง (db) และของแตงโมลดลงจาก 10.76 เป็น 0.496 กก./กก. db เส้นโค้งการทำให้แห้งเหมาะสมกับแบบจำลองต่างๆ ของการศึกษาที่มีอยู่ ความชื้นสัมพัทธ์ที่มีประสิทธิภาพเฉลี่ยประมาณได้ 4.28×10^{-9} ลบ.ม./วินาที และ 4.01×10^{-9} ลบ.ม./วินาที สำหรับแอปเปิ้ลและแตงโม ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลอยู่ในช่วง 1.584×10^{-4} ถึง 3.158×10^{-3} m/s สำหรับแอปเปิ้ล และ 5.17×10 ถึง 4.98×10^3 m/s สำหรับแตงโม ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 0.16 ถึง 3.19 W/ m²K และ 0.52 ถึง 5.04 W/m²K สำหรับแอปเปิ้ลและแตงโม ตามลำดับ พลังงานกระตุ้นสำหรับแอปเปิ้ลและน้ำ 16 ถึง 3.19 วัตต์/ตร.ม.

และ 0.52 ถึง 5.04 วัตต์/ตร.ม. สำหรับแอปเปิ้ลและแตงโม ตามลำดับ พลังงานกระตุ้นสำหรับแอปเปิ้ลและน้ำ 16 ถึง 3.19 วัตต์/ตร.ม. และ 0.52 ถึง 5.04 วัตต์/ตร.ม. สำหรับแอปเปิ้ลและแตงโม ตามลำดับ



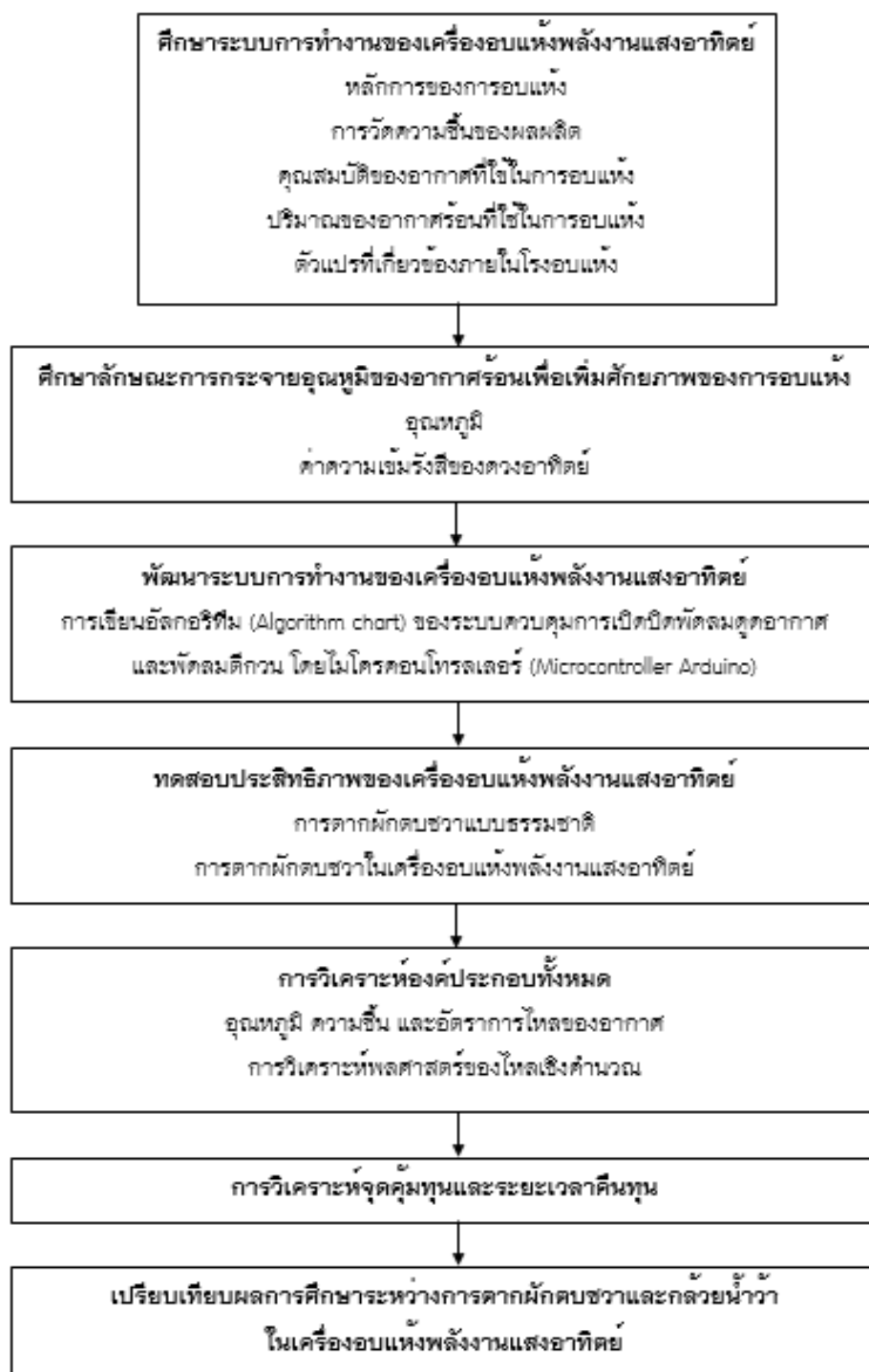
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานของการสร้างอัลกอริทึมควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีรายละเอียดระเบียบวิธีวิจัย ดังต่อไปนี้

แนวคิดการดำเนินงานวิจัย

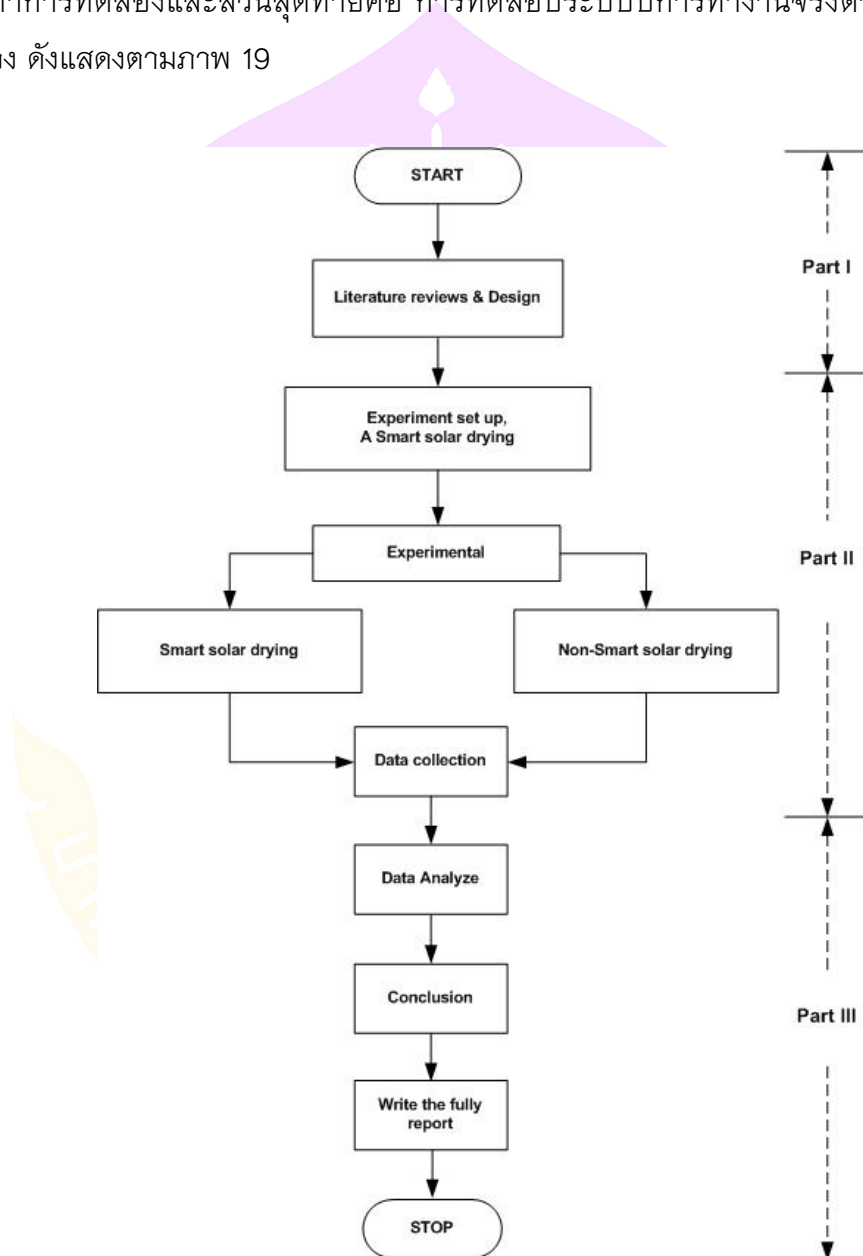
ในการดำเนินการวิจัย ผู้วิจัยได้แบ่งการศึกษาเป็น 3 ส่วน ในส่วนแรกจะทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยพิจารณาการออกแบบสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จากการใช้แผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart) หลังจากนั้นจะทำการติดตั้งพัดลมตีกววนเพื่อทดสอบการไหลของอากาศแบบปั่นป่วน โดยศึกษาเรื่องของการกระจายอุณหภูมิ และเก็บข้อมูลเบื้องต้นของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ได้แก่ อุณหภูมิและค่าความชื้นรังสีดวงอาทิตย์ และในที่สุดท้ายจะทำการอบแห้งผักตบชวา และการอบแห้งกล้วยน้ำว้า มาเปรียบเทียบผลการศึกษา เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ในสถานะที่อุณหภูมิมีการกระจายทั่วถึง อีกทั้งการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนและระยะเวลาคืนทุน โดยการดำเนินการวิจัยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้ แสดงดังภาพ 18



ภาพ 18 แสดงแนวคิดการดำเนินงานวิจัย

วิธีทำดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรก การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสำหรับใช้เป็นแนวทางการออกแบบระบบอบแห้งแบบอัจฉริยะ ส่วนที่สอง เป็นขั้นตอนการเตรียมการติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดต่าง ๆ ตลอดทั้งการทดสอบอุปกรณ์ประกอบระบบก่อนทำการทดลองและส่วนสุดท้ายคือ การทดสอบระบบการทำงานจริงตามเงื่อนไขการทดลอง ดังแสดงตามภาพ 19



ภาพ 19 ไดอะแกรมขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

ทำการออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นภาพสามมิติด้วยโปรแกรม SketchUp2017 โดยอ้างอิงขนาดพื้นที่ผิวที่เท่ากันของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก (เดิม) ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมขนาด $3 \times 4 \times 2$ m และมี หลังคาโค้งแบบพาราโบลาสูง 0.8 m เส้นโค้งหลังคายาว 3.5 m ซึ่งมีพื้นที่ผิวทั้งหมด เท่ากับ 45.4 m^2

จากการคำนวณโดยกำหนดพื้นที่ผิวที่เท่ากันนี้ จึงได้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.4 m และมีความสูง (รัศมี) ยาว 2.7 m มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect)

ทั้งนี้ หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ คือ รังสีดวงอาทิตย์ส่องผ่าน มายังแผ่นโพลีคาร์บอเนตเข้าไปภายในระบบ ผักตบชวาและองค์ประกอบต่างๆ ภายในระบบจะดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ผักตบชวาจะเกิดการแผ่รังสีอินฟราเรด ออกมาแต่รังสีนั้นไม่สามารถผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนตออกมาภายนอกได้ ทำให้อุณหภูมิในระบบสูงขึ้นและถ่ายเทความร้อนให้กับผักตบชวา ความชื้นในผักตบชวาพริกจะระเหยออกมาและถูกพาออกจากระบบ โดยการทำงานของพัดลมดูดอากาศ ดังนั้นวัสดุที่ใช้ในการรับแสงอาทิตย์ คือ แผ่นโพลีคาร์บอเนต ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถให้รังสีดวงอาทิตย์ผ่านได้ดี และป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต นอกจากนี้ยังสามารถตัดโค้งได้ง่ายและน้ำหนักเบา โดยนำมาปิดคลุมทุกส่วนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์นี้ เช่นเดียวกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก (เดิม) ที่มีอยู่ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ประกอบด้วยพัดลมดูดอากาศ ซึ่งเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์นี้ ได้ทำการติดตั้งอยู่ที่ อำเภอเมืองจังหวัดพะเยา

สำหรับในส่วนของการเลือกขนาดพัดลมดูดอากาศ สามารถคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งจากแผนภูมิอากาศขึ้น เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานและการคำนึงถึงประสิทธิภาพในการอบแห้งผักตบชวา และการอบแห้งกล้วยน้ำว้า

2. ทดสอบการไหลของอากาศแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

โดยศึกษาเรื่องของการกระจายอุณหภูมิและเก็บข้อมูลเบื้องต้นของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ Raspberry pi 3B+ และ Sensor AM2302 สำหรับวัดอุณหภูมิอากาศตามจุดต่าง ๆ ทั้งภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิแวดล้อม

การทดสอบแบ่งเป็น 3 กรณี ทำการทดสอบเก็บข้อมูลเบื้องต้นเป็นเวลา 3 วัน บันทึกข้อมูลของค่าอุณหภูมิทั้งภายนอกและภายในทุก ๆ 15 นาที ตั้งแต่เวลา 08.00-18.00 น. โดยไม่มีการนำวัตถุขึ้นมาอบแห้ง ดังนี้

กรณีที่ 1 วัดการกระจายอุณหภูมิเฉพาะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

กรณีที่ 2 วัดการกระจายอุณหภูมิโดยเปิดคลุมควบคุมพัดลมดูดอากาศ

กรณีที่ 3 วัดการกระจายอุณหภูมิโดยเปิดคลุมควบคุมพัดลมดูดอากาศและพัดลม

ความร้อน

การหาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

$$\eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \quad \text{หรือ} \quad \eta = \frac{\dot{m}C_p\Delta T}{G_t A + E} \quad \text{หรือ} \quad \eta = \frac{mL}{G_t A + E} \quad (34)$$

เมื่อ	η	= ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง (%)
	\dot{m}	= อัตราการไหลของอากาศ (kg/s)
	m	= มวลน้ำ (kg)
	C_p	= ค่าความจุความร้อนจำเพาะอากาศ (KJ/kg.°C)
	ΔT	= ส่วนต่างของอุณหภูมิ (°C)
	G_t	= ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m ²)
	A	= พื้นที่ผิวเครื่องอบแห้ง (m ²)
	E	= ค่าไฟฟ้า (บาท)
	L	= ค่าความร้อนแฝงจำเพาะของการกลายเป็นไอ (cal/g)

3. ทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

ทำการจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์และติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ Sensor AM2302 ผ่านชุดควบคุมโดยใช้Raspberry pi 3B+ เป็นตัวประมวลผล และเครื่องชั่ง (Precision Balance) ยี่ห้อ T-BOSS รุ่น TBS-CW โดยกำหนดให้

RH_{amb} = วัดความชื้นสภาวะแวดล้อม

$RH_c(RH_{in,center})$ = วัดความชื้นภายในตำแหน่งตรงกลางเครื่องอบแห้ง

T_{amb} = วัดอุณหภูมิสภาวะแวดล้อม

$T_c(Temp_{in,center})$ = วัดอุณหภูมิภายในตำแหน่งตรงกลางเครื่องอบแห้ง

จะได้สมการ

$$\Delta T = T_C - T_{amb} \quad (35)$$

สำหรับการเก็บข้อมูล จะเก็บค่าอุณหภูมิตามจุดต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้ง พลังงานแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิแวดล้อม ค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในและภายนอกเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ วัดค่าอัตราการไหลของอากาศที่เข้าและออกจากเครื่องอบแห้ง พลังงานแสงอาทิตย์ บันทึกค่าน้ำหนักของผักตบชวา ทั้งก่อนและหลังการอบแห้ง เพื่อจะนำไปทำการวิเคราะห์ผลข้อมูล แล้วจึงจะประเมินผลและสรุปผลของการดำเนินงานวิจัยนี้ จะแบ่งการทดสอบวัตถุติดออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1. ผักตบชวา

การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ จะทำการอบแห้งผักตบชวา ครั้งละ 2 kg โดยการทดลองจะมีขั้นตอนดังนี้

1.1 คัดแยกผักตบชวา หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักผักตบชวาหลังนึ่งก่อนนำไปอบแห้ง (น้ำหนักผักตบชวาเริ่มต้น)

1.2 เก็บตัวอย่างผักตบชวา (ความชื้นเริ่มต้นของผักตบชวา) และแบ่งตัวอย่างผักตบชวา

1.3 นำผักตบชวาเข้าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเกลี่ยผักตบชวาเป็นชั้นบาง ๆ (Thin Layer) ให้เท่ากันเพื่อให้เกิดการระเหยของน้ำในวัตถุได้ดีขึ้น วางผักตบชวากระจายให้ทั่วชั้น

1.4 ปิดประตูเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และเริ่มบันทึกข้อมูล โดยบันทึกค่าอุณหภูมิ ความชื้น และความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ทำการบันทึกข้อมูลทุก ๆ 15 นาที แล้วนำค่ามาใช้วิเคราะห์ ในระหว่างอบผักตบชวาจะมีการสูบลมซึ่งน้ำหนักผักตบชวา และวัดอัตราการไหลของอากาศโดยใช้เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Anemometer) ทำการอ่านค่าจากอุปกรณ์จนครบกำหนดการทดลอง

1.5 ดำเนินการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ต่อเนื่องจนได้ผักตบชวาตามความชื้นที่ต้องการ จึงนำผักตบชวาออกจากเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยในวันสุดท้ายของการอบผักตบชวา จะนำผักตบชวาทั้งหมดชั่งน้ำหนัก (น้ำหนักสุดท้าย) และชั่งน้ำหนักตัวอย่างผักตบชวา (ความชื้นสุดท้าย)

2. กลัวย่น้ำว่า

ในการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ จะทำการอบแห้งผักกลัวย่น้ำว่า ครั้งละ 10 kg โดยการทดลองจะมีขั้นตอนดังนี้

2.1 คัดแยกกล้วยน้ำว้า หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักกล้วยน้ำว้าก่อนนำไปอบแห้ง (น้ำหนักกล้วยน้ำว้าเริ่มต้น)

2.2 เก็บตัวอย่างกล้วยน้ำว้า (ความชื้นเริ่มต้นของกล้วยน้ำว้า)

2.3 นำกล้วยน้ำว้า เข้าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเกลี่ยกล้วยน้ำว้าเป็นชั้นบาง ๆ (Thin layer) ให้เท่ากันเพื่อให้เกิดการระเหยของน้ำในวัตถุได้ดีขึ้น วางกล้วยน้ำว้า ให้ทั่วชั้น

2.4 ปิดประตูเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และเริ่มบันทึกข้อมูล โดยบันทึกค่าอุณหภูมิ ความชื้น และความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ทำการบันทึกข้อมูลทุก ๆ 15 นาที แล้วนำค่ามาใช้วิเคราะห์ ในระหว่างอบกล้วยน้ำว้าจะมีการสุ่มชั่งน้ำหนักกล้วยน้ำว้า และวัดอัตราการไหลของอากาศโดยใช้เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Anemometer) ทำการอ่านค่าจากอุปกรณ์จนครบกำหนดการทดลอง

2.5 ดำเนินการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ต่อเนื่องจนได้กล้วยน้ำว้าตามความชื้นที่ต้องการ จึงนำกล้วยน้ำว้าออกจากเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยในวันสุดท้ายของการอบกล้วยน้ำว้า จะนำกล้วยน้ำว้า ทั้งหมดชั่งน้ำหนัก (น้ำหนักสุดท้าย) และชั่งน้ำหนักตัวอย่างกล้วยน้ำว้า จำนวน 36 ลูก (ความชื้นสุดท้าย)

3. วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1 ถุงซิปป (Zipper Bag) ขนาด 8 x 12 cm. และ 12 x 17 cm

3.2 ถุงพลาสติก ขนาด 20 x 30 inch

3.3 คีม (Forceps) ขนาด 13 cm

4. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

4.1 ชุดควบคุมประมวลผล Raspberry pi 3B+

4.2 ชุดวัดอุณหภูมิและความชื้น AM2302

4.3 เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Anemometer) รุ่น AM-4836V

4.4 เครื่องชั่ง (Precision Balance) ยี่ห้อ T-BOSS รุ่น TBS-CW

4.5 ตู้อบลมร้อน (VENTICELL, England)

4.6 ตู้ดูดความชื้น (Desiccator Cabinets)

ผู้วิจัยได้กำหนดวิธีการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ออกแบบเครื่องอบแห้งและอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมภายในเครื่องอบแห้ง โดยใช้ Raspberry pi 3B+ และทำการเขียนคำสั่งระบบควบคุมสั่งงานอุปกรณ์ภายใน ทำการสร้างเครื่องอบแห้งและติดตั้งอุปกรณ์ภายในเครื่องอบแห้ง และทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้งและตัววัดค่าตัวแปรต่าง ๆ เช่น ค่าความชื้น

รังสีอาทิตย์ ค่าพลังงานที่ใช้ของระบบ อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น สามารถอธิบายผลการศึกษาดังต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 การประยุกต์ใช้โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart solar drying) แบบเรือนกระจก

ส่วนที่ 2 การพัฒนาระบบการทำงานแบบอัตโนมัติ ในลักษณะแบบเรือนกระจกของระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart solar drying)

ส่วนที่ 3 การเพิ่มสมรรถนะของระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart solar drying) แบบเรือนกระจกด้วยพัดลมร้อน

การประยุกต์ใช้โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart solar drying) แบบเรือนกระจก

การพัฒนาโรงอบระบบอบแห้งอัจฉริยะเพื่อประสิทธิภาพและเพิ่มกำลังผลิตของวิสาหกิจชุมชนในประเทศไทยโดยการประยุกต์ใช้โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart solar drying) แบบเรือนกระจก โดยมีอุปกรณ์ในระบบควบคุมและประมวลผลเครื่องอบแห้งของโครงการ ประกอบด้วย Raspberry pi 3B+, Sensor AM2302 LCD DISPLAY, Smart Phone Display และพัดลมร้อน โดยมีรูปแบบของไมโครคอนโทรลเลอร์ดังต่อไปนี้



ภาพ 20 Raspberry pi 3B+



ภาพ 21 Sensor AM2302 (ASAIR) เซ็นเซอร์วัด อุณหภูมิและความชื้น



ภาพ 22 พัดลมร้อน ขนาด 3,000 วัตต์



ภาพ 23 พัดลมระบายอากาศ



ภาพ 24 โซลาร์เซลล์ขนาด 50 Wp



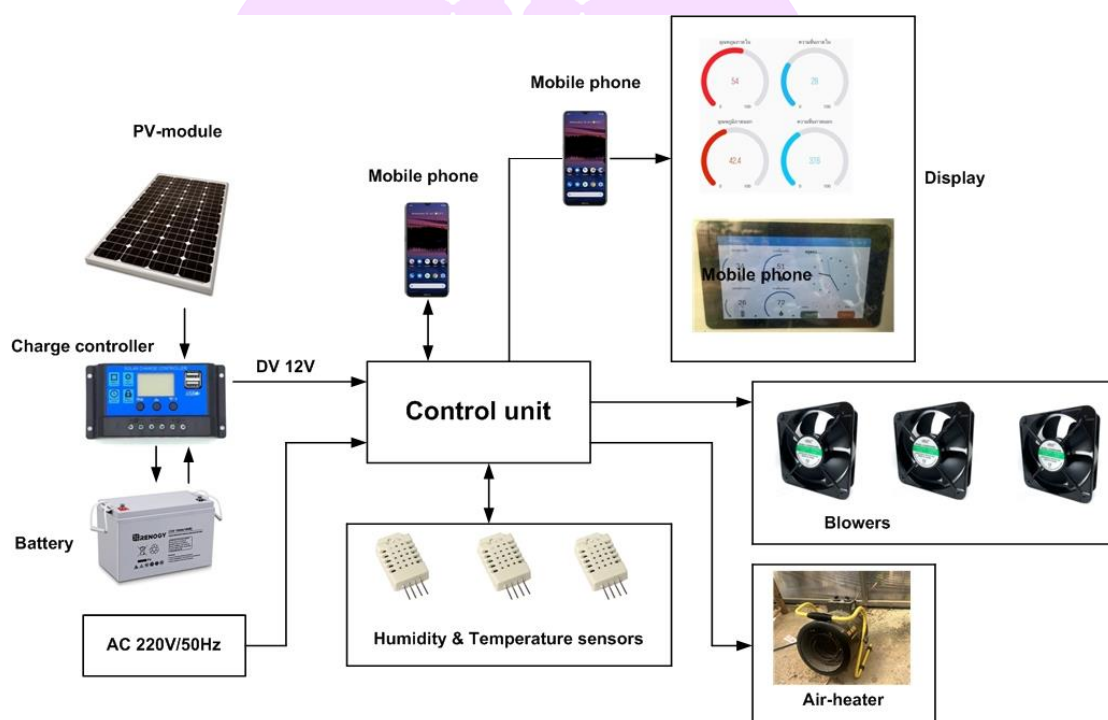
ภาพ 25 แบตเตอรี่ 100 AH



ภาพ 26 Solar charge

ระบบคุมการทำงานของระบบอบแห้งแบบอัจฉริยะประกอบด้วย Raspberry pi 3B+ ควบคุมและประมวลผล ในการเลือกพลัง ควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น และเก็บบันทึกข้อมูล ดัดตั้ง แสดงตามภาพที่ 3.10 การเลือกพลังงานประกอบด้วย 1. พลังงานไฟฟ้าจากสายส่ง AC220V/50Hz 2. พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์โดยโซลาร์ เซลล์ขนาด 50W ผ่านชุดชาร์จ กักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ขนาด 100 AH 12V โดยชุด ควบคุมจะทำการเลือกใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เพื่อจ่ายให้กับระบบก่อน และในกรณีที่ระบบ แบตเตอรี่มีค่าความต่างศักย์ลดลงน้อยกว่า 9 โวลต์ จะทำการเปลี่ยนไปใช้พลังงานไฟฟ้าจาก สายส่ง AC220V/50Hz เพื่อป้อนให้กับระบบสามารถทำงานได้

การควบคุมความชื้น ทำงานโดยรับค่าจากผู้ใช้งานผ่านหน้าจอสื่อหรือทางสมาร์ตโฟนทำการประมวลผลโดยรับข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้น ภายในจำนวน 5 จุด และภายนอก 1 จุด เพื่อควบคุมการปิดเปิดพัดลมระบายอากาศในกรณีที่อุณหภูมิ ความชื้น มากกว่าที่รับค่าควบคุมการปิดเปิดพัดลมร้อน ในกรณีที่อุณหภูมิต่ำกว่า ค่าที่ผู้ใช้งานต้องการพร้อมแสดงผลการทำงานต่าง ๆ ที่หน้าจอสื่อ กับสมาร์ตโฟน เก็บบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้น การใช้พลังงาน การปิดเปิดพัดลมระบายอากาศ การปิดเปิดพัดลมระบายความร้อน ณ เวลาต่าง ๆ ตลอดการอบในแต่ละครั้ง

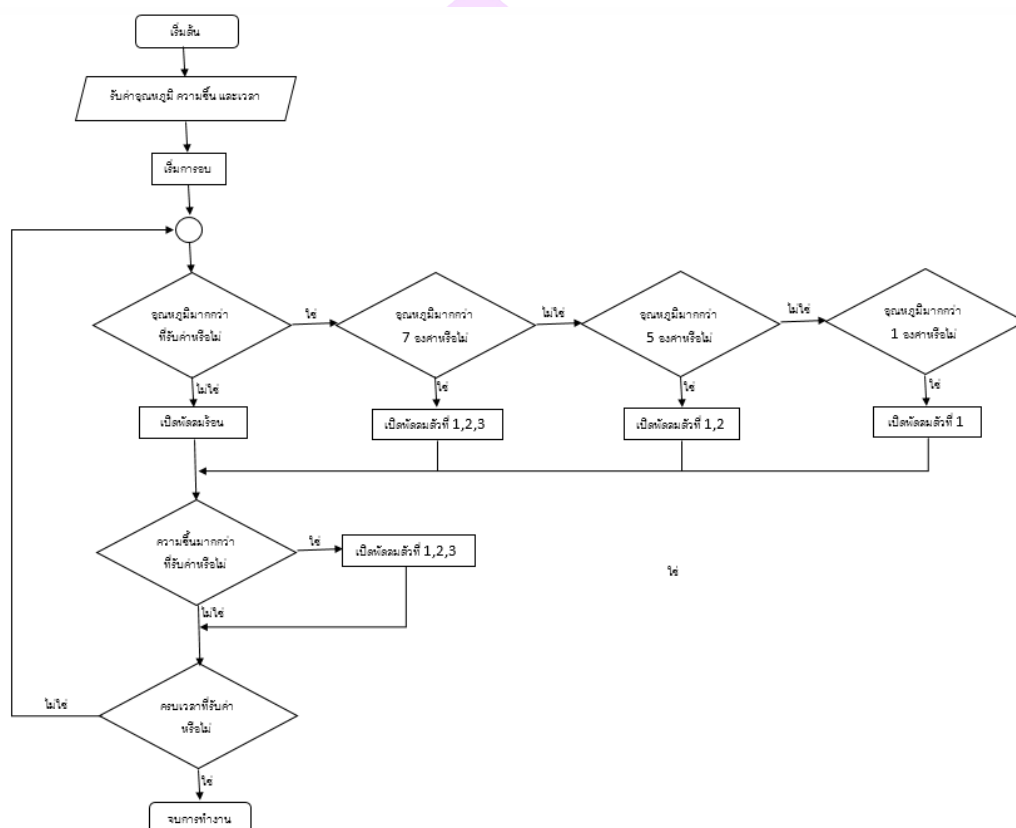


ภาพ 27 แสดงระบบควบคุมการทำงานของระบบอบแห้งแบบอัจฉริยะ

การพัฒนาระบบการทำงานแบบอัตโนมัติ ในลักษณะแบบเรือนกระจก ของระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart solar drying)

การพัฒนาระบบการทำงานแบบอัตโนมัติ ในลักษณะแบบเรือนกระจก ของระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart solar drying) ในการพัฒนาโรงอบระบบอบแห้งอัจฉริยะเพื่อประสิทธิภาพและเพิ่มกำลังผลิตของวิสาหกิจชุมชนในประเทศไทยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบชุดควบคุม เขียนคำสั่งงานอุปกรณ์ภายใน โดยในการเขียนโปรแกรมควบคุมเครื่องอบแห้ง ได้มีการวางแผนระบบควบคุมโดยใช้บอร์ด Raspberry pi 3B+ ในการควบคุม ภาษาที่ใช้ใน

การเขียนคำสั่ง คือ ภาษาซี เมื่อทำการเลือกระบบที่ใช้ในการควบคุม แล้วจึงทำการเขียนคำสั่งลงไปบนบอร์ดเพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น และเวลา แล้วนำมาประมวลผลเพื่อไปสั่งการอุปกรณ์ภายในเครื่องอบแห้งตามคำสั่งที่กำหนดไว้ ซึ่งการออกแบบบอร์ด Raspberry pi 3B+ และเขียนคำสั่งระบบควบคุม มีขั้นตอนดังนี้



ภาพ 28 ผังการทำงานควบคุมระบบ

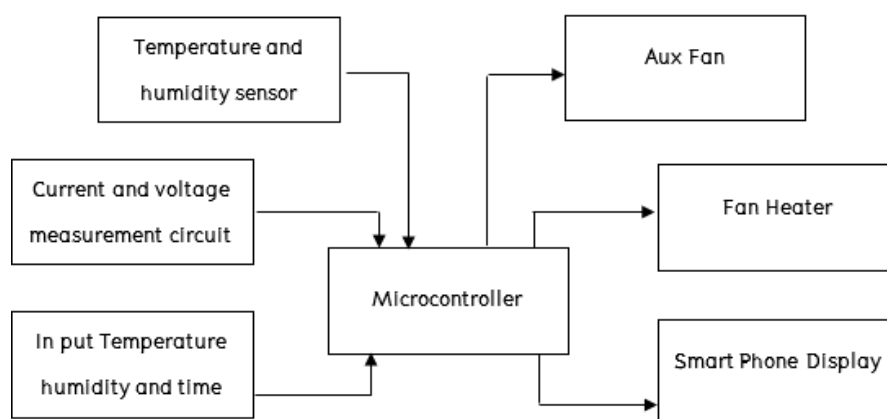
จากภาพผังการทำงานควบคุมระบบมีการทำงานเริ่มจากรับค่าอุณหภูมิ ความชื้นและเวลาจากผู้ใช้งาน ระบบจะรับอุณหภูมิ ความชื้นและเวลา ประมวลผลจากข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นที่รับเซ็นเซอร์ภายในจำนวน 5 ตัวและภายนอก 1 ตัว การประมวลผลเริ่มจากเช็คค่าอุณหภูมิว่าน้อยหรือมากกว่าค่าที่กำหนดจากผู้ใช้น้อยกว่าระบบจะทำการสั่งให้พัดลมความชื้นเปิด ถ้ามากกว่าจะสั่งให้พัดลมระบายความชื้นเปิดโดยแบ่งการทำงานของพัดลมสามตัว ดังนี้ ถ้าอุณหภูมิมากกว่า 1 องศาพัดลมตัวที่ 1 จะเปิด ถ้าอุณหภูมิมากกว่า 5 องศาพัดลมตัวที่ 1, 2 จะเปิด ถ้าอุณหภูมิมากกว่า 7 องศาพัดลมตัวที่ 1, 2, 3 จะเปิด จากนั้นทบทวนการประมวลผลความชื้นโดยตรวจสอบว่าความชื้นภายในโรงอบมากกว่าที่ผู้ใช้งานกำหนดหรือไม่ถ้ามากกว่าระบบ

จะสั่งการเปิดพัดลมตัวที่ 1, 2, 3 ทำการเช็คค่าและสั่งการวนซ้ำตลอดการทำงาน ที่ได้รับที่ กำหนดระยะเวลาจากผู้ใช้งาน

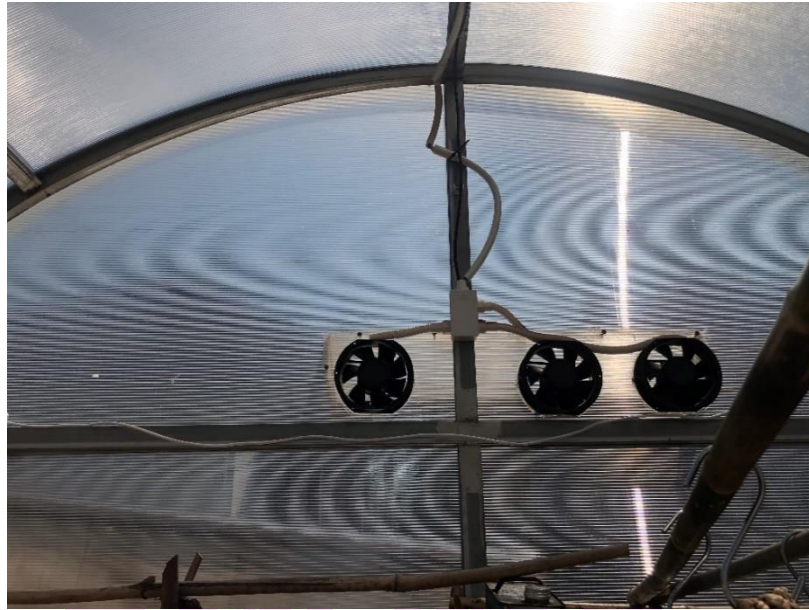


ภาพ 29 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งระบบตรวจวัด

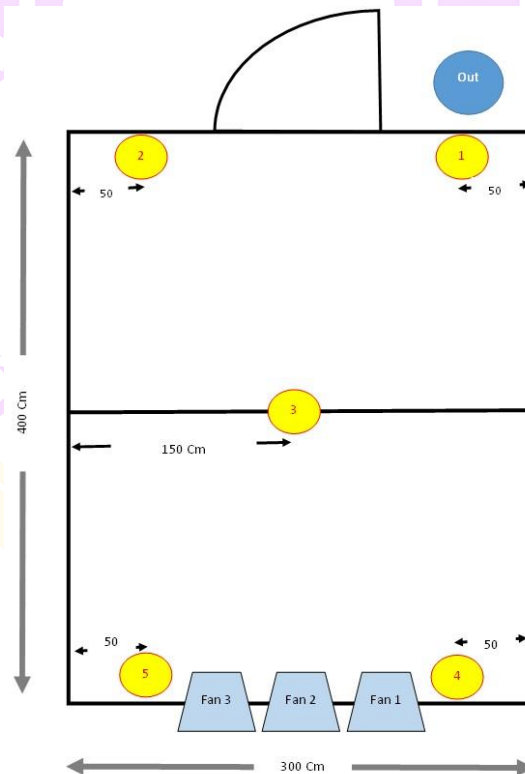
การควบคุมระบบ



ภาพ 30 ไดอะแกรมการทำงานของระบบควบคุมอัจฉริยะ



ภาพ 31 แสดงการติดตั้งพัดลม

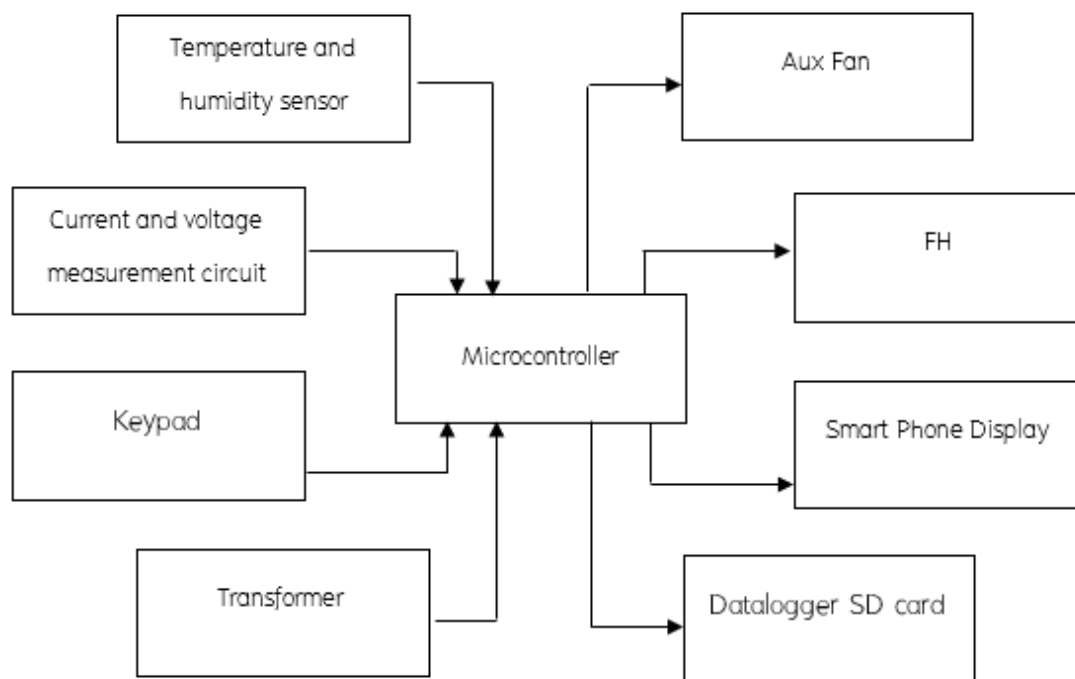


ภาพ 32 แสดงส่วนประกอบการทำงานของระบบ

การเพิ่มสมรรถนะของระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart solar drying) แบบเรือนกระจก ด้วยพัดลมร้อน

จากการศึกษา สมรรถนะของระบบอบแห้งอัจฉริยะแบบเรือนกระจกด้วยพัดลมร้อนนั้น ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างโรงอบระบบอบแห้งอัจฉริยะร่วมกับโรงอบแบบเดิม โดยทำการศึกษาดัชนีที่ประกอบไปด้วย

1. ระยะเวลาในการอบ
2. อุณหภูมิในห้องอบ
3. ความชื้นในห้องอบน้ำ
4. หนักสดของวัตถุดิบที่ใช้อบแห้งแต่ละครั้ง (kg)
5. ราคาวัตถุดิบต่อหน่วย (บาท/กิโลกรัม)
6. น้ำหนักแห้งของวัตถุดิบที่ใช้อบแห้งแต่ละครั้ง (กิโลกรัมแห้ง)
7. ค่าจ้างแรงงาน (บาท/วัน)



ภาพ 33 ไดอะแกรมระบบการควบคุม

จากภาพ 33 ระบบควบคุมของเครื่องอบแห้งแบบใช้พัดลมฮีตเตอร์ โครงการนี้ใช้บอร์ด ARDUINO MEGA 2560 เป็นตัวควบคุมระบบทั้งหมด โดยการป้อนค่าจากปุ่มกดเข้ามาเพื่อตั้งค่า อุณหภูมิ ความชื้น และเวลาที่ต้องการ หลังจากนั้นเครื่องทำงานปกติ เมื่ออุณหภูมิหรือความชื้นมีค่า สูงขึ้นหรือต่ำลง ระบบควบคุมจะทำการสั่งอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อให้อุณหภูมิหรือความชื้นมีค่าตามที่ตั้งไว้ และมีการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า อีกทั้งมีการบันทึกข้อมูลเพื่อทราบอุณหภูมิ ความชื้น กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ณ ที่เวลาต่าง ๆ

7.1 ระบบควบคุม

ระบบการทำงานจะถูกควบคุมด้วยระบบสมองกลฝังตัว (Embedded System) ทำให้การทำงานของระบบเป็นอัตโนมัติด้วยควบคุมเวลา อุณหภูมิ และความชื้นด้วยการวัดอุณหภูมิ ความชื้น ภายในห้องอบแห้งและความชื้นจากอากาศภายนอกเพื่อเพิ่มความสามารถในการอบแห้งให้ มีประสิทธิภาพมากขึ้น



ภาพ 34 การออกแบบระบบควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying)

จากภาพไดอะแกรมระบบควบคุม ระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying) จะทำการป้อนค่าจากปุ่มกดเข้ามาเพื่อตั้งค่าอุณหภูมิ ความชื้น และเวลาที่ต้องการ หลังจากนั้นเครื่องทำงานปกติ เมื่ออุณหภูมิหรือความชื้นมีค่าสูงขึ้นหรือต่ำลง ระบบควบคุมจะทำการสั่ง

อุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อให้อุณหภูมิหรือความชื้นมีค่าตามที่ตั้งไว้ ซึ่งระบบการทำงานจะถูกควบคุมด้วยระบบสมองกลฝังตัว (Embedded System) ทำให้การทำงานของระบบเป็นอัตโนมัติด้วยการควบคุมเวลา อุณหภูมิ และความชื้นด้วยการวัดอุณหภูมิความชื้น ภายในห้องอบแห้งและความชื้นจากอากาศภายนอกเพื่อเพิ่มความสามารถในการอบแห้งให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

การเก็บรวบรวมข้อมูล

ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ตั้งแต่เวลา 08.00 น. – 17.00 น. เป็นช่วงเวลาที่ค่ารังสีอาทิตย์พร้อมต่อการใช้งานตลอดช่วงวัน มีตัวแปรต่างๆ (Parameter) ดังนี้

1. อุณหภูมิ (Temperature) ได้แก่ อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient temperature) และอุณหภูมิภายใน (Inside temperature)
2. ความชื้น (Humidity) ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) และความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content)
3. อัตราการไหลของอากาศ (Air flow rate)
4. ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (Aolar radiation)
5. พื้นที่ผิวของเครื่องอบแห้ง (Surface area)
6. น้ำหนักของผักตบชวาที่นำมาทดสอบ (Weigh)
7. พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ และอัตราการอบแห้ง ในการหาความชื้นของผลิตภัณฑ์จะใช้สมการ ดังนี้

1. ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry-basis moisture content) หมายถึง การเทียบปริมาณความชื้นกับของแข็งเท่านั้น โดยการทดสอบแบบมาตรฐานด้วยวิธีการอบด้วยลมร้อน
 - 1.1 นำถ้วยฟอยล์อบในตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 100–105 °C เป็นเวลา 6 hr แล้วทิ้งไว้ให้เย็นในตู้ดูดความชื้น (Desiccator cabinets)
 - 1.2 ชั่งน้ำหนักเมื่อเย็น (จุดบันทึก) แล้วอบซ้ำ 15 นาที จนน้ำหนักที่ชั่งได้แตกต่างกันไม่เกิน 3 มิลลิกรัม
 - 1.3 ใส่ตัวอย่างผักตบชวาและกล้วยน้ำว้า จำนวน 36 ตัวอย่าง ในถาดฟอยล์ที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว
 - 1.4 อบแห้งตัวอย่างนาน 6 hr หรือจนกว่าน้ำหนักที่ได้แตกต่างไม่เกิน 3 mg

การคำนวณปริมาณความชื้น (ร้อยละ)

$$MC(\%db) = \frac{m_w - m_d}{m_d} \times 100 \quad (36)$$

เมื่อ $MC(\%db)$ = ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%db)
 m_w = มวลเปียกของวัสดุ (kg)
 m_d = มวลแห้งของวัสดุ (kg)

2. อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) หมายถึง ปริมาณของน้ำที่เหลืออยู่ในวัสดุที่กำลังอบแห้ง เทียบกับปริมาณน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในวัสดุที่สามารถระเหยได้ภายใต้สภาวะการอบแห้งหนึ่ง ๆ

$$MR = \frac{m_t - m_{eq}}{m_{in} - m_{eq}} \quad (37)$$

เมื่อ M_{in} = ความชื้นต้นของวัสดุ เศษส่วนมูลฐานแห้ง (Dry-basis)
 M_t = ความชื้นที่เวลาใด ๆ ของวัสดุ เศษส่วนมูลฐานแห้ง (Dry-basis)
 M_{eq} = ความชื้นสมดุลของวัสดุ เศษส่วนของมูลฐานแห้ง (kg)

บทที่ 4

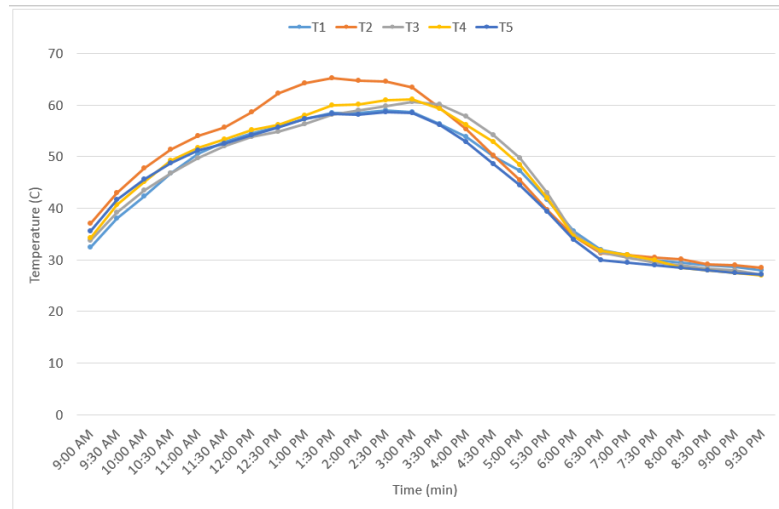
ผลการศึกษา

ในบทนี้อธิบายผลการศึกษาตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย ดังนี้ ผลการศึกษา อัลกอริทึมควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และผลการศึกษาเพื่อเสนอแนะแนวทางการจัดการพลังงานเพื่อความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยผู้วิจัยได้วางแผน กำหนดวิธีการดำเนินการวิจัย หรือขั้นตอนการปฏิบัติงานว่า ควรดำเนินขั้นตอนใดก่อนหรือหลัง เพื่อการทำวิจัยอย่างเป็นระบบ ด้วยการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ออกแบบเครื่องอบแห้งและอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมภายในเครื่องอบแห้ง ออกแบบบอร์ด Raspberry pi 3B+ ทำงานร่วมกับ Smart Phone Display และทำการเขียนคำสั่งระบบควบคุมสั่งงานอุปกรณ์ภายใน ติดตั้งอุปกรณ์ภายในเครื่องอบแห้ง และทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้งสามารถอธิบายผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

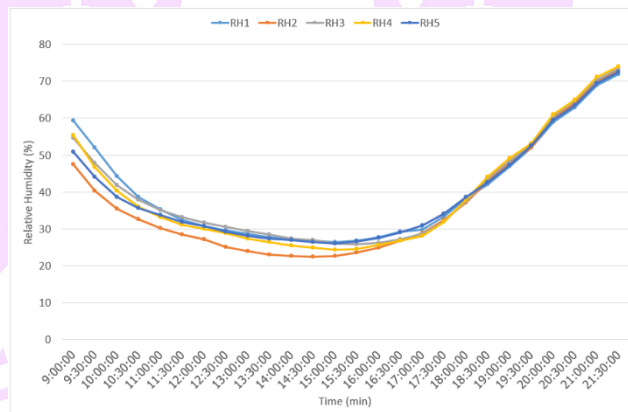
การประยุกต์ใช้โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying) แบบเรือนกระจก

การพัฒนาโรงอบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเดิมให้เป็นระบบอบแห้งอัจฉริยะแบบไฮบริด(HYBRID) ด้วยโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อการจัดการการแปรรูปกล้วยของกลุ่มกล้วยอบราชสาส์น อำเภอราชสาส์น จังหวัดฉะเชิงเทรา มีการประยุกต์ใช้โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying) แบบเรือนกระจก ทำงานร่วมกับ Smart Phone Display ควบคุมการปิดเปิดพัดลมการปิดเปิดระบบก๊าซ LPG โดยมีผลดังต่อไปนี้

ผลการเก็บข้อมูลโรงอบแบบเดิมพบว่าอิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของห้องอบแห้งภายในตู้อบแห้งแบบเดิมมีอุณหภูมิสูงถึง 60 °C ในช่วงเวลา 12:00 – 15:00 น. เท่านั้นเป็นอิทธิพลของความร้อนจากความเข้มรังสีอาทิตย์ และมีอุณหภูมิลดลงในช่วงเวลา 16:00 น. ส่วนความชื้นสัมพัทธ์ลดจากช่วงเริ่มต้น 50 – 60 % ค่อยๆ ลดต่ำลงเป็นลำดับ ไปอยู่ที่ 25-30% ใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมง ในช่วงเวลา 16:00 น. ความชื้นสัมพัทธ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สาเหตุจากความเข้มรังสีอาทิตย์ส่งผลให้อุณหภูมิภายในตู้อบแห้งลดลง ดังแสดงดังภาพ 35 และภาพ 36

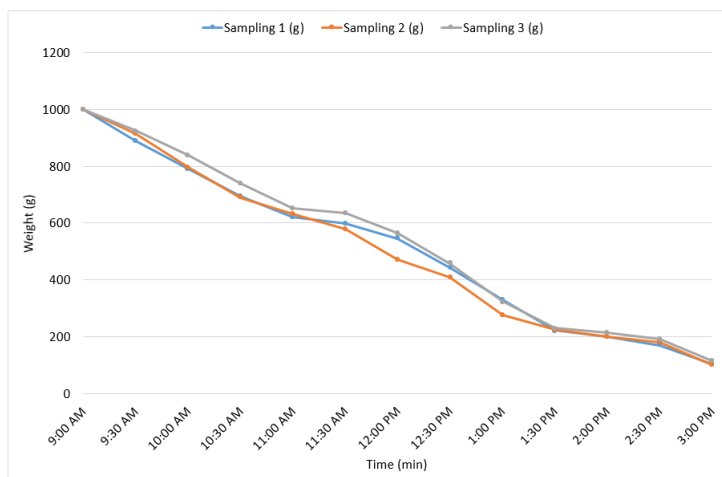


ภาพ 35 โปรไฟล์อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้ง



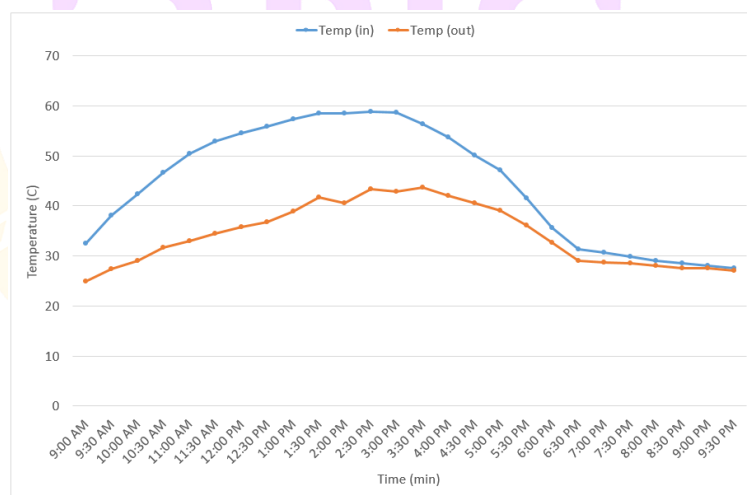
ภาพ 36 โปรไฟล์ความชื้นภายในเครื่องอบแห้ง

ก่อนการอบแห้งของกล้วยตัวอย่างทั้งสามน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่เริ่มต้น 1,000 กรัม แล้วทำการอบแห้งพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักทุก 30 นาที พบว่า น้ำหนักมีแนวโน้มลดลงต่อเนื่อง ใช้เวลาอบตั้งแต่ 9:00 – 15:00 น. โดยใช้เวลา 6 ชั่วโมง น้ำหนักที่วัดได้หลังการอบแห้งพบว่า น้ำหนักของตัวอย่างทั้งสองเฉลี่ย 100 กรัม ดังแสดงความสัมพันธ์ดังภาพ 37



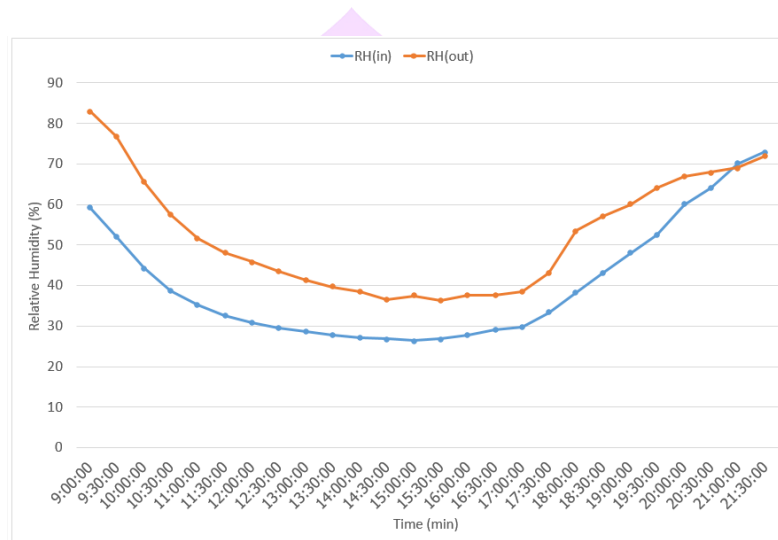
ภาพ 37 โปรไฟล์การลดลงของน้ำหนักผลิตภัณฑ์

ผลความต่างของอุณหภูมิภายใน (Temp in) กับภายนอก (Temp out) ของตู้อบแห้ง พบว่า ภายในมีอุณหภูมิสูงกว่าภายนอก นั่นแสดงว่า มีความสามารถถ่ายเทความร้อนให้ผลิตภัณฑ์สำหรับระเหยความชื้นออกได้ แต่จะลดลงตั้งแต่ช่วงเวลา 15.00 น. ดังแสดงตามภาพ 38



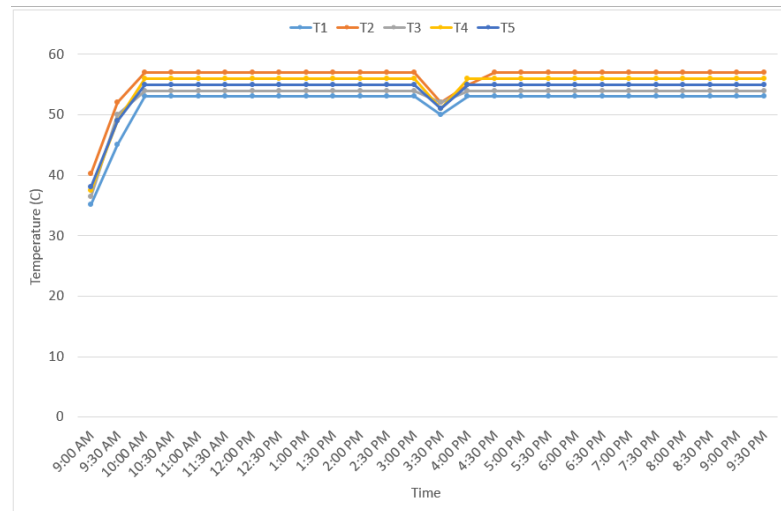
ภาพ 38 ผลต่างอุณหภูมิภายนอกกับภายในตู้อบแห้ง

ผลต่างของความชื้นสัมพัทธ์ภายใน (Humidity in) กับความชื้นสัมพัทธ์ภายนอก (Humidity out) ดังแสดงตามภาพที่ 38 นั้นเพราะอิทธิพลของอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งที่นำความชื้นสัมพัทธ์ออกสู่ภายนอกระบบด้วยการพาความร้อน ผลทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบแห้งลดลง และมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกตู้อบ

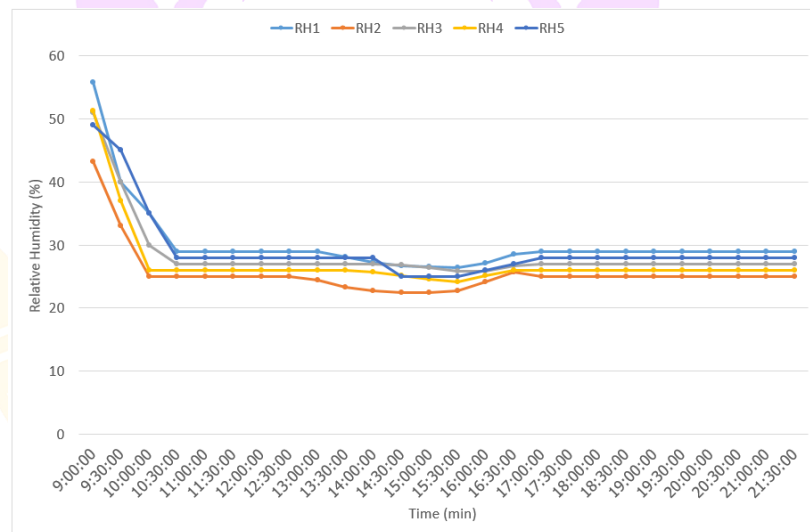


ภาพ 39 ความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบแห้งลดลงและมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกตู้อบ

ผลการเก็บข้อมูลโรงอบที่ประยุกต์ใช้โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying) พบว่าอิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของห้องอบแห้งภายในตู้อบแห้งมีอุณหภูมิสูงถึง 60 °C ในช่วงเวลา 10:00 – 15:00 น. เป็นอิทธิพลของความร้อนจากความเข้มรังสีอาทิตย์ และระบบก๊าซ LPG ที่ช่วยเร่งอุณหภูมิ พร้อมทั้งไล่ความชื้นและรักษาอุณหภูมิให้คงที่ตลอดเวลา จนถึงเวลา 21:30 น. ส่วนความชื้นสัมพัทธ์ลดลงจากช่วงเริ่มต้น 50 – 60 % ค่อย ๆ ลดต่ำลงเป็นลำดับ ไปอยู่ที่ 25–30% ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง รักษาความชื้นให้คงที่ตลอดเวลา จนถึงเวลา 21:30 น. เนื่องจากมีระบบก๊าซ LPG ที่เข้ามารวมทำให้สามารถรักษาอุณหภูมิและความชื้นจนเป็นเวลา 12 ชั่วโมงต่อวัน ดังแสดงดังภาพ 40

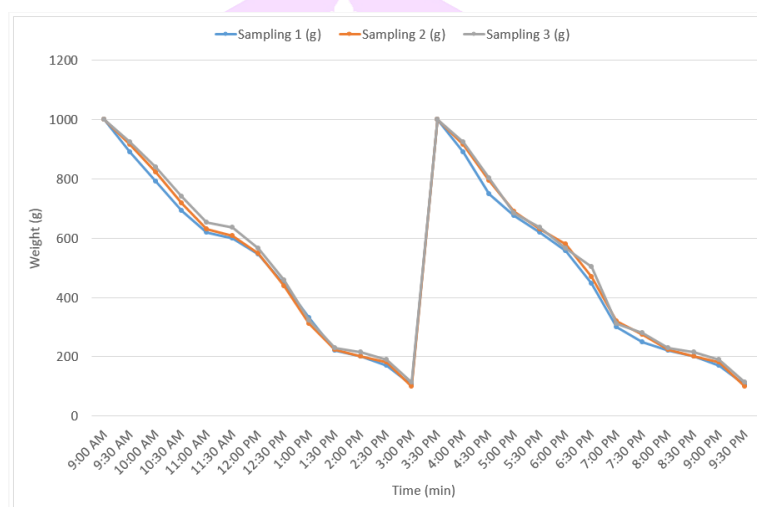


ภาพ 40 โปรไฟล์อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งที่ใช้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์
ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying)



ภาพ 41 โปรไฟล์ความชื้นภายในเครื่องอบแห้งที่ใช้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์
ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying)

ก่อนการอบแห้งของกล้วยตัวอย่างทั้งสามน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่เริ่มต้น 1,000 g แล้วทำการอบแห้งพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักทุก 30 นาที พบว่า น้ำหนักมีแนวโน้มลดลงต่อเนื่อง ใช้เวลาอบตั้งแต่ 9:00 – 15:00 น. ในรอบที่ 1 และรอบที่ 2 ในเวลา 15.30-21.30 น. น้ำหนักที่วัดได้หลังการอบแห้ง พบว่า น้ำหนักของตัวอย่างทั้งสามเฉลี่ย 100 กรัม ทั้ง 2 รอบการอบต่อวัน ดังแสดงความสัมพันธ์ดังภาพ 42



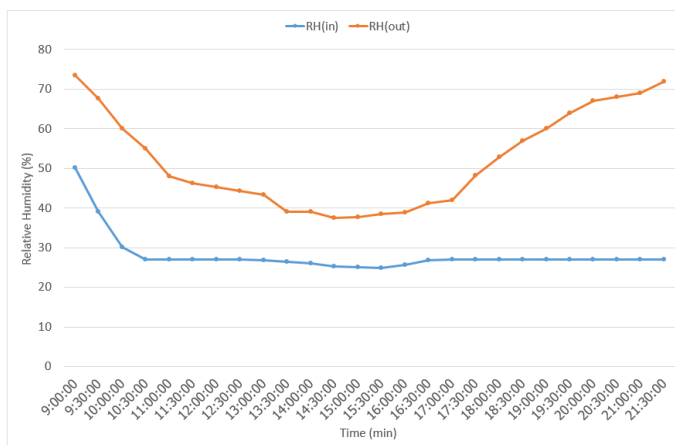
ภาพ 42 โปรไฟล์การลดลงของน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ใช้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying)

ผลความต่างของอุณหภูมิภายใน (Temp in) กับภายนอก (Temp out) ของตู้อบแห้ง พบว่า ภายในมีอุณหภูมิสูงกว่าภายนอก นั้นแสดงว่า มีความสามารถถ่ายเทความร้อนให้ผลิตภัณฑ์สำหรับระเหยความชื้นออกได้ ตั้งแต่เวลา 10.00 น.-21.30 น.



ภาพ 43 ผลต่างอุณหภูมิภายนอกกับภายในตู้อบแห้งที่ใช้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying)

ผลต่างของความชื้นสัมพัทธ์ภายใน (Humidity in) กับความชื้นสัมพัทธ์ภายนอก (Humidity out) ดังแสดงตามภาพที่ 44 นั้นเพราะอิทธิพลของอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งที่นำความชื้นสัมพัทธ์ออกสู่ภายนอกระบบด้วยการพาความร้อน ผลทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบแห้งลดลง และมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกตู้อบโดยยังคงรักษาความชื้นอยู่เนื่องจากมีการทำงานของระบบก๊าซ LPG มีช่วยรักษาความชื้นให้คงที่ตั้งแต่ช่วงเวลา 16.00 น.



ภาพ 44 ความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบแห้งลดลงและมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกตู้อบที่ใช้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying)

จากตาราง 1 การเปรียบเทียบความแตกต่างของระหว่างโรงอบแบบเดิม กับ โรงอบที่ใช้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying) อบแห้งอัจฉริยะ พบว่า ระหว่างโรงอบระบบอบแห้งอัจฉริยะ กับโรงอบแบบเดิม น้ำหนักสดของวัตถุดิบที่ใช้อบแห้งแต่ละครั้ง น้ำหนักแห้งของวัตถุดิบที่ใช้อบแห้งแต่ละครั้ง ของทั้ง 2 ระบบ ไม่มีความแตกต่างกัน ส่วนอุณหภูมิในห้องอบ ความชื้นในห้องอบ ของโรงอบที่ใช้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying) อบแห้งอัจฉริยะ สามารถรักษาอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องอบได้ดีกว่าตั้งแต่เวลา 9.00 น. - 21.30 น. ทำให้สามารถเพิ่มรอบการอบแห้งได้ 2 รอบต่อวัน

ตาราง 1 การเปรียบเทียบความแตกต่างของสมรรถนะระหว่างโรงอบระบบอบแห้งอัจฉริยะกับโรงอบแบบเดิม

ตัวแปร	โรงอบแบบเดิม	ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์
		ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying)
1. รอบการอบ	1 รอบ/วัน	2 รอบ/วัน
2. อุณหภูมิในห้องอบ	45-70 °C	55 -60 °C
3. ความชื้นในห้องอบ	35-45 %RH	30 %RH

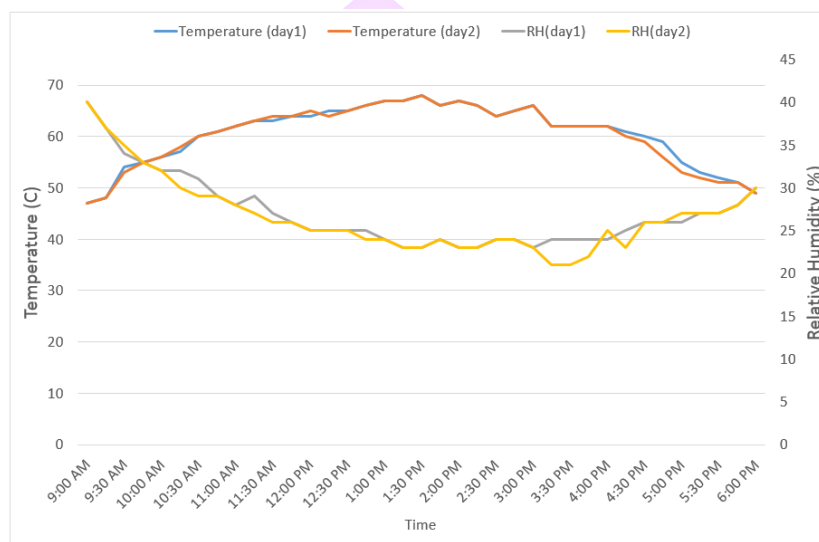
ผลการศึกษาการไหลของลมร้อนที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้ง

1. ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอิทธิพลอัตราการไหลของอากาศ 0.35 m³/s สำหรับหาความเหมาะสมของการใช้อัตราการไหลที่เหมาะสมกับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) กับอุณหภูมิของการอบแห้ง (Temperature, T) จากการทดสอบ 2 วัน ภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน พบว่า ค่า Drying rate, DRของการอบแห้ง สูงสุดที่ 250 %db/h ดังแสดงตามภาพ 45



ภาพ 45 เปรียบเทียบผลของ Drying rate การอบแห้ง 2 วัน

จากการทดสอบ 2 วัน ภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน พบว่า ค่า Temperature และ Relative Humidity ของการอบแห้ง มีแนวโน้มใกล้เคียงกันเพิ่มขึ้นเป็นลำดับและลดลงอย่างสอดคล้องกันต่อเนื่อง อุณหภูมิเริ่มต้นจาก 44.67 °C เมื่อเวลา 09:00 น. และลดลงต่ำสุด 44.67 °C ณ เวลา 18:00 น. ดังแสดงตามภาพ 46



ภาพ 46 เปรียบเทียบผลของ Temperature กับ Relative humidity การอบแห้ง 2 วัน

จากภาพ 46 สามารถอธิบายได้ว่า อัตราการไหลของอากาศ 0.35 m³/s ส่งผลต่ออัตราการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้ดีและเหมาะสม เนื่องจากพื้นที่รับรังสีอาทิตย์สามารถผลิตความร้อนที่เหมาะสมกับการอบแห้งภายในของเครื่องอบ และประกอบกับความชื้นถ่ายเทให้กับผลิตภัณฑ์ภายในส่งผลให้ความชื้นระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ และอัตราการไหลของอากาศมีความเร็วเหมาะสมที่ดึงความชื้นภายในตู้อบออกสู่ภายนอก ส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นลงหรือเรียกง่ายว่า ผลิตภัณฑ์แห้ง

1.1 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอัตราการไหลของอากาศ 0.35 m³/s

นำข้อมูลจากการลดลงของน้ำหนักผักตบชวาที่เก็บตั้งแต่เวลา 9.00–18.00 น. เพื่อวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น

ตาราง 2 ข้อมูลการอบผักตบชวาโดยมีการเก็บข้อมูล Drying rate, DR อุณหภูมิ, T ความชื้น, RH ในช่วงเวลาต่าง ๆ

Time	DR(%db/h)	T(°C)	RH(%)
9:00 AM	0.00	47.00	40.00
9:15 AM	24.53	48.00	37.00
9:30 AM	20.81	53.50	34.50
9:45 AM	120.30	55.00	33.00
10:00 AM	99.32	56.00	32.00
10:15 AM	190.19	57.50	31.00
10:30 AM	195.26	60.00	30.00
10:45 AM	213.37	61.00	29.00
11:00 AM	244.84	62.00	28.00
11:15 AM	235.87	63.00	28.00
11:30 AM	247.38	63.50	26.50
11:45 AM	222.67	64.00	26.00
12:00 PM	243.32	64.50	25.00
12:15 PM	239.93	64.50	25.00
12:30 PM	198.65	65.00	25.00
12:45 PM	186.80	66.00	24.50
1:00 PM	190.52	67.00	24.00
1:15 PM	194.92	67.00	23.00
1:30 PM	141.79	68.00	23.00
1:45 PM	131.13	66.00	24.00
2:00 PM	122.17	67.00	23.00
2:15 PM	72.42	66.00	23.00
2:30 PM	85.62	64.00	24.00
2:45 PM	73.60	65.00	24.00
3:00 PM	65.31	66.00	23.00
3:15 PM	70.73	62.00	22.50
3:30 PM	32.32	62.00	22.50

ตาราง 2 (ต่อ)

Time	DR(%db/h)	T(°C)	RH(%)
3:45 PM	38.75	62.00	23.00
4:00 PM	48.22	62.00	24.50
4:15 PM	13.71	60.50	24.00
4:30 PM	10.66	59.50	26.00
4:45 PM	8.63	57.50	26.00
5:00 PM	7.78	54.00	26.50
5:15 PM	5.08	52.50	27.00
5:30 PM	9.31	51.50	27.00
5:45 PM	5.92	51.00	28.00
6:00 PM	6.35	49.00	30.00

ตาราง 2 ข้อมูลการอบผักตบชวาโดยมีการเก็บข้อมูล Drying rate, DR อุณหภูมิ, T ความชื้น, RH ในแต่ละช่วงเพื่อให้เห็นว่าข้อมูลทั้งหมดมีความสัมพันธ์กันจริงผู้วิจัยจึงใช้สมการ Multiple Linear Regression มาเป็นตัวพยากรณ์ ซึ่งสมการทั้งหมดแสดงได้ดังนี้

$$\square = \square_0 + (\square_1 \times \square_1) + (\square_2 \times \square_2) + \dots \dots (\square_n \times \square_n) \quad (37)$$

ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น Drying rate, DR Temperature, T Relative Humidity, RH. ดังแสดงดังตาราง 3

ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	2	171831.6496	85915.82481	25.67928292	1.59934E-07			
Residual	34	113754.6579	3345.725233					
Total	36	285586.3075						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	-1426.229872	240.5842554	-5.928192888	1.06739E-06	-1915.155904	-937.30	-1915.16	-937.3038398
T	18.05557688	2.577474229	7.005143514	4.40268E-08	12.81751903	23.29	12.82	23.29363473
RH	16.64963055	3.675909708	4.529390513	6.94007E-05	9.179283234	24.12	9.18	24.11997787

ภาพ 47 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) และค่าความเชื่อมั่น (Significance)

เมื่อทราบสัมประสิทธิ์และค่าความเชื่อมั่น แล้วผู้วิจัยนำทั้งสองค่ามาแทนในสมการ 38 ประมวลค่า DRpredict โดยมีค่า

$$\square_0 = -1426.229872 \quad \square_1 = 18.05557688 \quad \square_2 = 16.64963055$$

(38)

เมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์แล้วจึงได้สมการดังนี้

$$DR = -1426.229872 + (18.05557688 \times T) + (16.64963055 \times RH) \quad (39)$$

เมื่อ DR = อัตราการอบแห้ง (%db/h)

T = อุณหภูมิ (°C)

RH = ความชื้นสัมพัทธ์ (%)

เมื่อนำมาคำนวณค่า DRpredict จากตาราง 2 จะได้ผลดังตาราง 3 ได้ดังนี้

ตาราง 3 ความสัมพันธ์ DRpredict เทียบกับค่า DR

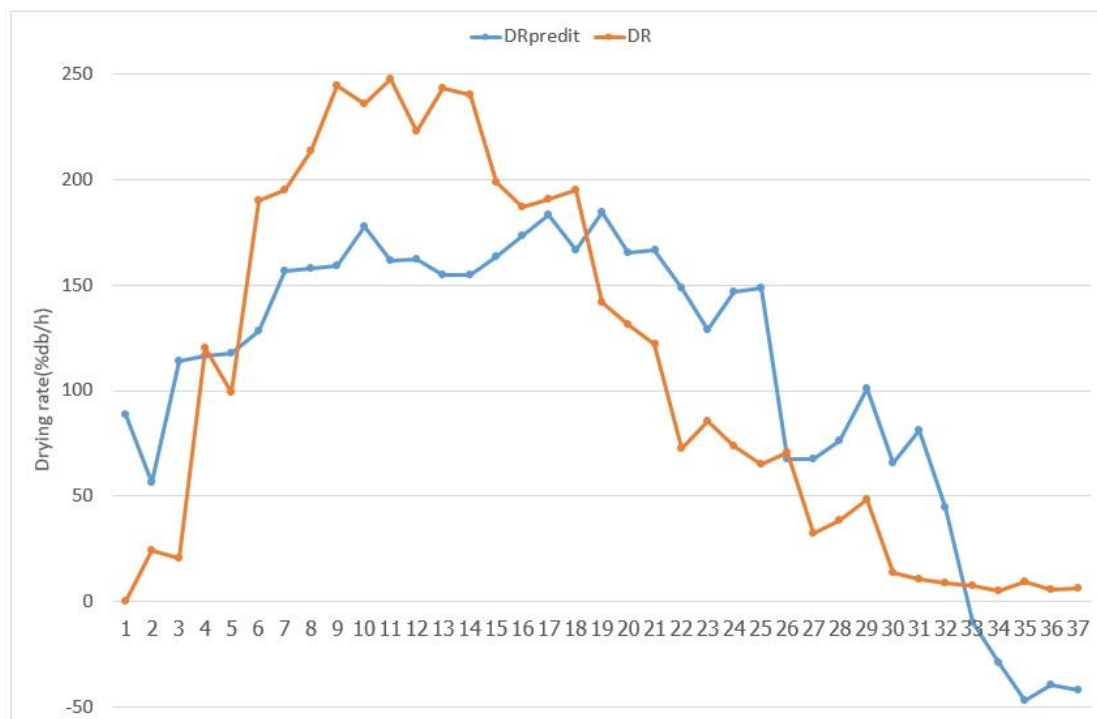
DRpredict(%db/h)	DR(%db/h)	T(°C)	RH(%)
88.37	0.00	47.00	40.00
56.47	24.53	48.00	37.00
114.16	20.81	53.50	34.50
116.26	120.30	55.00	33.00
117.67	99.32	56.00	32.00
128.10	190.19	57.50	31.00
156.59	195.26	60.00	30.00
158.00	213.37	61.00	29.00
159.41	244.84	62.00	28.00
177.46	235.87	63.00	28.00
161.51	247.38	63.50	26.50
162.22	222.67	64.00	26.00
154.60	243.32	64.50	25.00
154.60	239.93	64.50	25.00
163.62	198.65	65.00	25.00
173.35	186.80	66.00	24.50
183.08	190.52	67.00	24.00
166.44	194.92	67.00	23.00
184.49	141.79	68.00	23.00
165.03	131.13	66.00	24.00

166.44 122.17 67.00 23.00

ตาราง 3 (ต่อ)

DRpredict(%db/h)	DR(%db/h)	T(°C)	RH(%)
184.49	141.79	68.00	23.00
165.03	131.13	66.00	24.00
166.44	122.17	67.00	23.00
148.38	72.42	66.00	23.00
128.92	85.62	64.00	24.00
146.97	73.60	65.00	24.00
148.38	65.31	66.00	23.00
67.83	70.73	62.00	22.50
67.83	32.32	62.00	22.50
76.16	38.75	62.00	23.00
101.13	48.22	62.00	24.50
65.72	13.71	60.50	24.00
80.97	10.66	59.50	26.00
44.86	8.63	57.50	26.00
-10.01	7.78	54.00	26.50
-28.77	5.08	52.50	27.00
-46.83	9.31	51.50	27.00
-39.21	5.92	51.00	28.00
-42.02	6.35	49.00	30.00

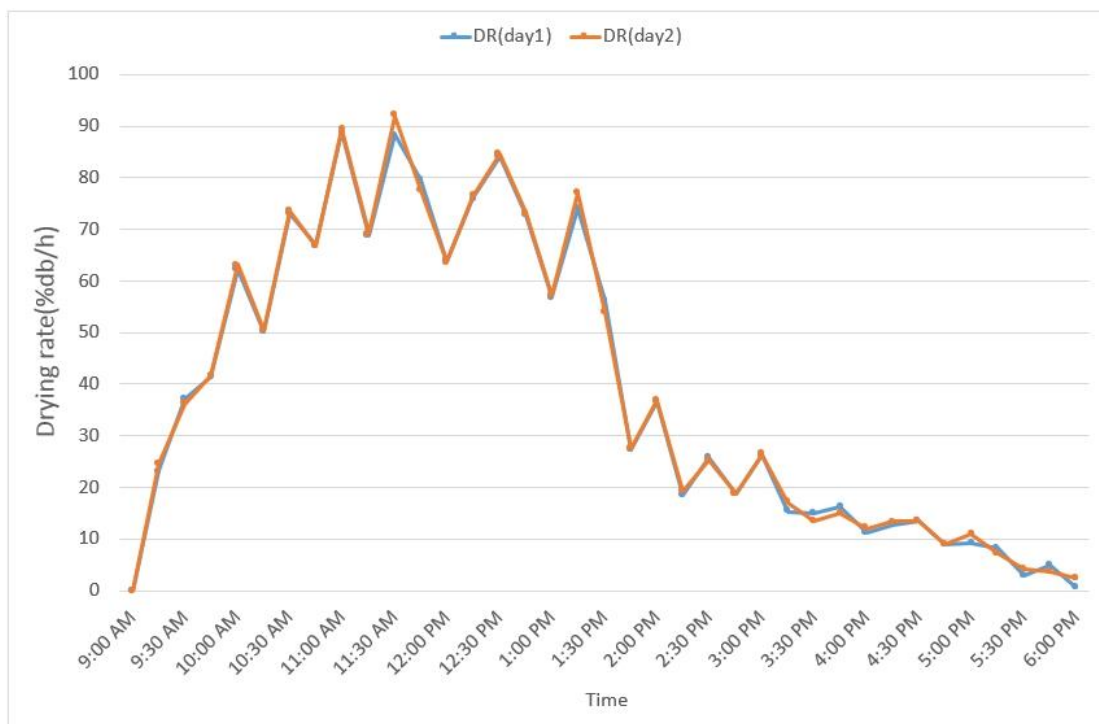
ผลการทำนายผลความสัมพันธ์ระหว่าง DRpredict และ DR พบว่าค่า DR ที่ได้จากการทดลองจริง มีแนวโน้มลดลงจากสูงไปต่ำต่อเนื่องตามเวลาที่ใช้อบแห้งตั้งแต่เริ่มต้นจนสุดท้าย ซึ่งมีความต่างจากกับ DRpredict ที่ได้จากการทำนายความน่าจะเป็นตามข้อมูลทางสถิติ พบว่า การเปลี่ยนแปลง DR มีแนวโน้มลดลงและเพิ่มขึ้น และความชื้นสุดท้ายของการอบแห้ง มีค่าใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้น ดังแสดงตามภาพ 48



ภาพ 48 การเปรียบเทียบค่าจริงกับค่าจากการพยากรณ์ด้วยตัวแปร

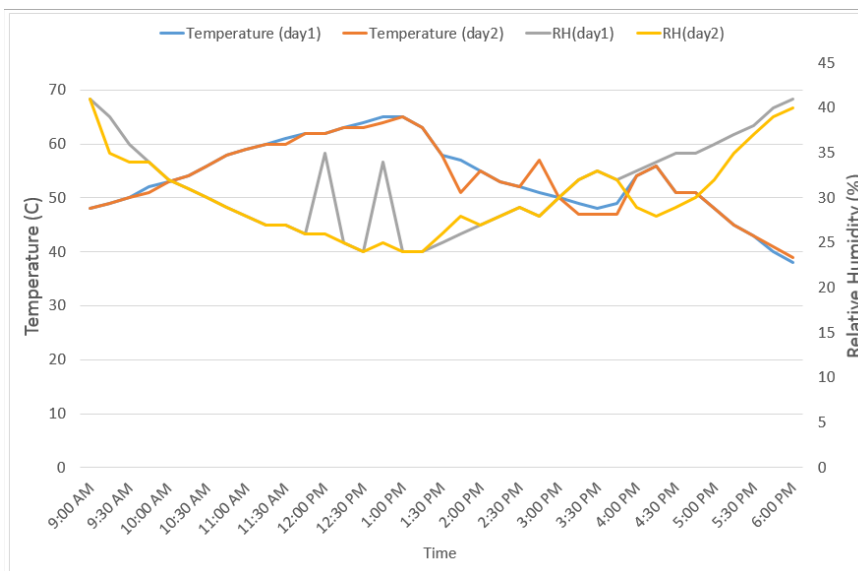
Regression แบบรวมตัวแปร

2. ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอิทธิพลอัตราการไหลของอากาศ $0.70 \text{ m}^3/\text{s}$ สำหรับหาความเหมาะสมของการใช้อัตราการไหลที่เหมาะสมกับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) กับอุณหภูมิของการอบแห้ง (Temperature, T) จากการทดสอบ 2 วัน ภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน พบว่า ค่า Drying rate, DR ของการอบแห้ง สูงสุดที่ 90 \%db/h ดังแสดงตามภาพ 49



ภาพ 49 เปรียบเทียบผลของ Drying rate การอบแห้ง 2 วัน

จากการทดสอบ 2 วัน ภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน พบว่า ค่า Temperature และ Relative Humidity ของการอบแห้ง มีแนวโน้มใกล้เคียงกันเพิ่มขึ้นเป็นลำดับและลดลงอย่างสอดคล้องกันต่อเนื่อง อุณหภูมิเริ่มต้นจาก 47.57 °C เมื่อเวลา 09:00 น. สูงสุดที่ 64 °C เมื่อเวลา 13.00 น. และลดลงต่ำสุด 40.5 °C ณ เวลา 18:00 น. ดังแสดงตามภาพ 50



ภาพ 50 เปรียบเทียบผลของ Temperature กับ Relative humidity การอบแห้ง 2 วัน

จากภาพ 50 สามารถอธิบายได้ว่า อัตราการไหลของอากาศ $0.70 \text{ m}^3/\text{s}$ ส่งผลต่ออัตราการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้ดีและเหมาะสม เนื่องจากพื้นที่รับรังสีอาทิตย์สามารถผลิตความร้อนที่เหมาะสมกับการอบแห้งภายในของเครื่องอบ และประกออบกับความชื้นถ่ายเทให้กับผลิตภัณฑ์ภายในส่งผลให้ความชื้นระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ และอัตราการไหลของอากาศมีความเร็วเหมาะสมที่ดึงความชื้นภายในตู้อบออกสู่ภายนอก ส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นลงหรือเรียกง่ายว่า ผลิตภัณฑ์แห้ง

2.1 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอัตราการไหลของอากาศ $0.70 \text{ m}^3/\text{s}$

นำข้อมูลจากการลดลงของน้ำหนักผักตบชวาที่เก็บตั้งแต่เวลา 9.00–18.00 น. เพื่อวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น

ตาราง 4 ข้อมูลการอบผักตบชวาโดยมีการเก็บข้อมูล Drying rate, DR อุณหภูมิ, T ความชื้น, RH ในช่วงเวลาต่าง ๆ

Time	DR(%db/h)	T(°C)	RH(%)
9:00 AM	0.00	48.00	41.00
9:15 AM	23.93	49.00	37.00
9:30 AM	36.69	50.00	35.00
9:45 AM	41.47	51.50	34.00
10:00 AM	62.64	53.00	32.00
10:15 AM	50.31	54.00	31.00
10:30 AM	73.31	56.00	30.00
10:45 AM	66.87	58.00	29.00
11:00 AM	89.08	59.00	28.00
11:15 AM	68.96	60.00	27.00
11:30 AM	90.13	60.50	27.00
11:45 AM	78.52	62.00	26.00
12:00 PM	63.74	62.00	30.50
12:15 PM	76.20	63.00	25.00
12:30 PM	84.29	63.50	24.00
12:45 PM	73.01	64.50	29.50
1:00 PM	57.06	65.00	24.00
1:15 PM	75.53	63.00	24.00
1:30 PM	55.03	58.00	25.50
1:45 PM	27.36	54.00	27.00
2:00 PM	36.69	55.00	27.00
2:15 PM	18.84	53.00	28.00
2:30 PM	25.58	52.00	29.00
2:45 PM	18.77	54.00	28.00
3:00 PM	26.26	50.00	30.00
3:15 PM	16.17	48.00	32.00

ตาราง 4 (ต่อ)

Time	DR(%db/h)	T(°C)	RH(%)
3:30 PM	14.26	47.50	33.00
3:45 PM	15.58	48.00	32.00
4:00 PM	11.63	54.00	31.00
4:15 PM	13.04	56.00	31.00
4:30 PM	13.50	51.00	32.00
4:45 PM	8.96	51.00	32.50
5:00 PM	10.13	48.00	34.00
5:15 PM	7.61	45.00	36.00
5:30 PM	3.56	43.00	37.50
5:45 PM	4.29	40.50	39.50
6:00 PM	1.54	38.50	40.50

ตาราง 4 ข้อมูลการอบแห้งศพขวามีการเก็บข้อมูล Drying rate, DR อุณหภูมิ, T ความชื้น, RH ในแต่ละช่วงเพื่อให้เห็นว่าข้อมูลทั้งหมดมีความสัมพันธ์กันจริงผู้วิจัยจึงใช้สมการ Multiple Linear Regression มาเป็นตัวพยากรณ์ ซึ่งสมการทั้งหมดแสดงได้ดังนี้

$$\square = \square_0 + (\square_1 \times \square_1) + (\square_2 \times \square_2) + \dots \dots (\square_n \times \square_n) \quad (40)$$

ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น Drying rate, DR Temperature, T Relative Humidity, RH. ดังแสดงดังตาราง 5

ANOVA									
	df	SS	MS	F	Significance F				
Regression	2	21869.861	10934.93049	41.900321	6.69316E-10				
Residual	34	8873.14531	260.9748619						
Total	36	30743.0063							
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%	
Intercept	-188.9791078	74.4030238	-2.539938543	0.015825805	-340.1842443	-37.77397128	-340.184244	-37.77397128	
T	3.939209803	0.7755146	5.079478558	1.35492E-05	2.363174507	5.515245099	2.363174507	5.515245099	
RH	0.52620034	1.15055466	0.457344928	0.650332211	-1.81200806	2.864408741	-1.81200806	2.864408741	

ภาพ 51 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) และค่าความเชื่อมั่น (Significance)

เมื่อทราบสัมประสิทธิ์และค่าความชื้น แล้วผู้วิจัยนำทั้งสองค่ามาแทนในสมการ 41 ประมาณค่า DRpredict โดยมีค่า $\square_0 = -188.9791078$ $\square_1 = 3.939209803$ $\square_2 = 0.52620034$ เมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์แล้วจึงได้สมการดังนี้

$$DR = -188.9791078 + (3.939209803 \times T) + (0.52620034 \times RH) \quad (41)$$

เมื่อ DR = อัตราการอบแห้ง (%db/h)

T = อุณหภูมิ (°C)

RH = ความชื้นสัมพัทธ์ (%)

เมื่อนำมาคำนวณค่า DRpredict จากตาราง 5 จะได้ผลดังตาราง 5 ได้ดังนี้

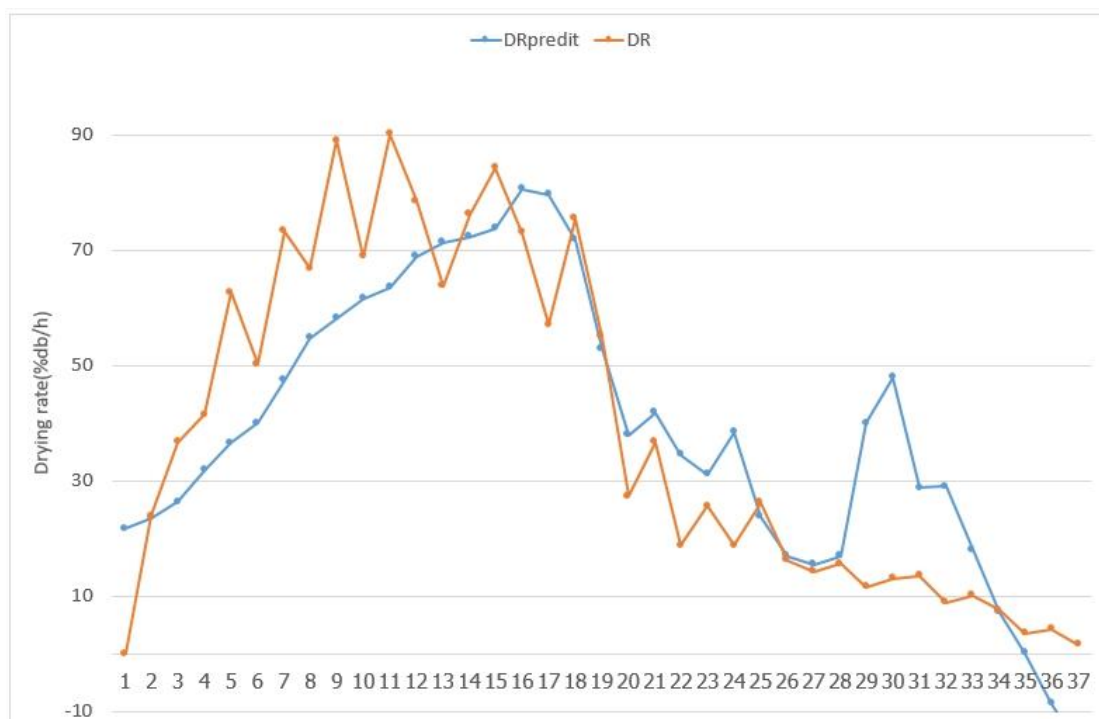
ตาราง 5 ความสัมพันธ์ DRpredict เทียบกับค่า DR

DRpredict(%db/h)	DR(%db/h)	T(°C)	RH(%)
21.68	0.00	48.00	41.00
23.51	23.93	49.00	37.00
26.40	36.69	50.00	35.00
31.78	41.47	51.50	34.00
36.64	62.64	53.00	32.00
40.05	50.31	54.00	31.00
47.40	73.31	56.00	30.00
54.75	66.87	58.00	29.00
58.17	89.08	59.00	28.00
61.58	68.96	60.00	27.00
63.55	90.13	60.50	27.00
68.93	78.52	62.00	26.00
71.30	63.74	62.00	30.50
72.35	76.20	63.00	25.00
73.79	84.29	63.50	24.00
80.62	73.01	64.50	29.50
79.70	57.06	65.00	24.00

ตาราง 5 (ต่อ)

DRpredict(%db/h)	DR(%db/h)	T(°C)	RH(%)
71.82	75.53	63.00	24.00
52.91	55.03	58.00	25.50
37.95	27.36	54.00	27.00
41.88	36.69	55.00	27.00
34.53	18.84	53.00	28.00
31.12	25.58	52.00	29.00
38.47	18.77	54.00	28.00
23.77	26.26	50.00	30.00
16.94	16.17	48.00	32.00
15.50	14.26	47.50	33.00
16.94	15.58	48.00	32.00
40.05	11.63	54.00	31.00
47.93	13.04	56.00	31.00
28.76	13.50	51.00	32.00
29.02	8.96	51.00	32.50
17.99	10.13	48.00	34.00
7.23	7.61	45.00	36.00
0.14	3.56	43.00	37.50
-8.66	4.29	40.50	39.50
-16.01	1.54	38.50	40.50

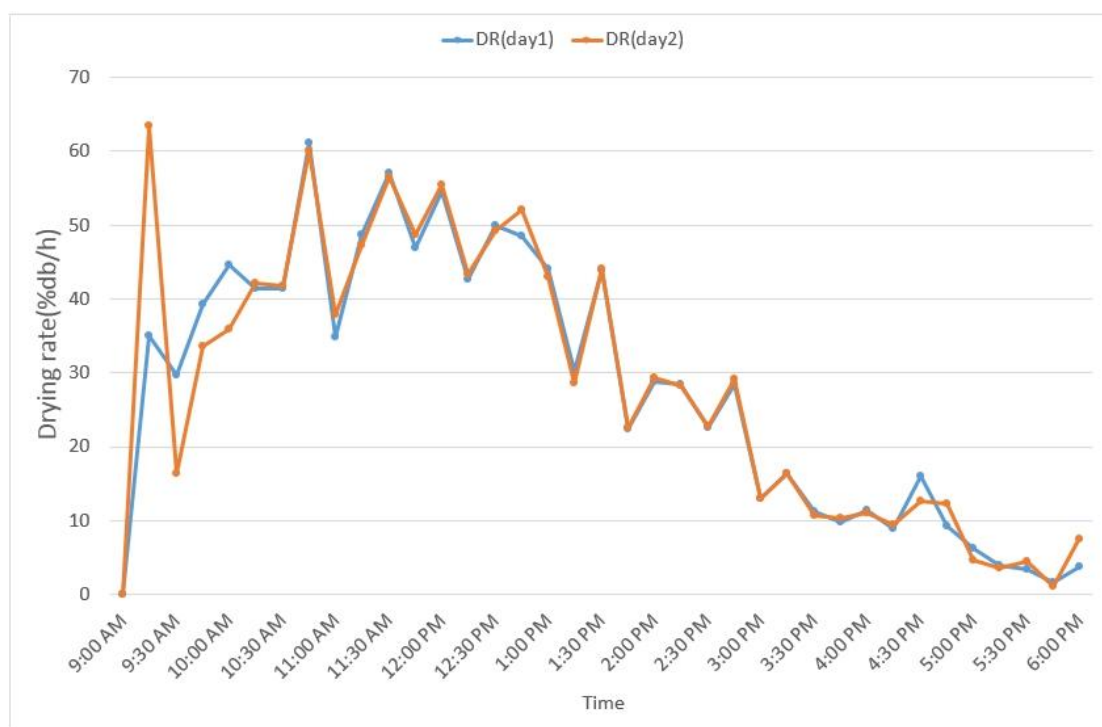
ผลการทำนายผลความสัมพันธ์ระหว่าง DRpredict และ DR พบว่าค่า DR ที่ได้จากการทดลองจริง มีแนวโน้มลดลงจากสูงไปต่ำต่อเนื่องตามเวลาที่ใช้อบแห้งตั้งแต่เริ่มต้นจนสุดท้าย ซึ่งมีความต่างจากกับ DRpredict ที่ได้จากการทำนายความน่าจะเป็นตามข้อมูลทางสถิติ พบว่า การเปลี่ยนแปลง DR มีแนวโน้มลดลงและเพิ่มขึ้น และความชื้นสุดท้ายของการอบแห้ง มีค่าใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้น ดังแสดงตามภาพ 52



ภาพ 52 การเปรียบเทียบค่าจริงกับค่าจากการพยากรณ์ด้วยตัวแปร Regression แบบรวมตัวแปร

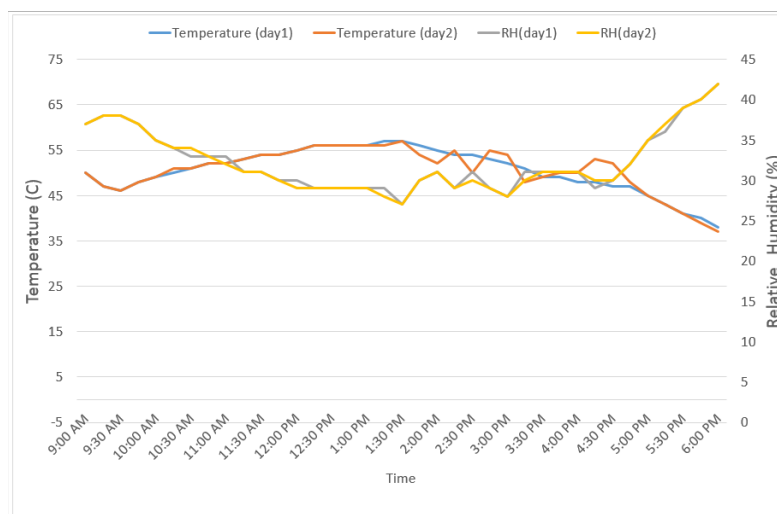
ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอิทธิพลอัตราการไหลของอากาศ $1.05 \text{ m}^3/\text{s}$

สำหรับหาความเหมาะสมของการใช้อัตราการไหลที่เหมาะสมกับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ ซึ่งมี การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้ง(Drying rate, DR)กับอุณหภูมิของการอบแห้ง (Temperature, T) จากการทดสอบ 2 วัน ภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน พบว่า ค่า Drying rate, DRของการอบแห้ง สูงสุดที่ 60 %db/h ดังแสดงตามภาพ 53



ภาพ 53 เปรียบเทียบผลของ Drying rate การอบแห้ง 2 วัน

จากการทดสอบ 2 วัน ภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน พบว่า ค่า Temperature และ Relative Humidity ของการอบแห้ง มีแนวโน้มใกล้เคียงกันเพิ่มขึ้นเป็นลำดับและลดลงอย่างสอดคล้องกันต่อเนื่อง อุณหภูมิเริ่มต้นจาก 47.57 °C เมื่อเวลา 09:00 น. สูงสุดที่ 55 °C เมื่อเวลา 13.00 น. และลดลงต่ำสุด 35 °C ณ เวลา 18:00 น. ดังแสดงตามภาพ 54



ภาพ 54 เปรียบเทียบผลของ Temperature กับ Relative humidity การอบแห้ง 2 วัน

จากภาพ 54 สามารถอธิบายได้ว่า อัตราการไหลของอากาศ $1.05 \text{ m}^3/\text{s}$ ส่งผลต่ออัตราการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้ดีและเหมาะสม เนื่องจากพื้นที่รับรังสีอาทิตย์สามารถผลิตความร้อนที่เหมาะสมกับการอบแห้งภายในของเครื่องอบ และประกอบกับความชื้นถ่ายเทให้กับผลิตภัณฑ์ภายในส่งผลให้ความชื้นระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ และอัตราการไหลของอากาศมีความเร็วเหมาะสมที่ดึงความชื้นภายในตู้อบออกสู่ภายนอก ส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นลงหรือเรียกง่ายว่า ผลิตภัณฑ์แห้ง

1. ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอัตราการไหลของอากาศ $1.05 \text{ m}^3/\text{s}$

นำข้อมูลจากการทดลองของน้ำหนักผักตบชวาที่เก็บตั้งแต่เวลา 9.00–18.00 น. เพื่อวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น

ตาราง 6 ข้อมูลการอบผักตบชวาโดยมีการเก็บข้อมูล Drying rate, DR อุณหภูมิ, T ความชื้น, RH ในช่วงเวลาต่าง ๆ

Time	DR(%db/h)	T(°C)	RH(%)
9:00 AM	0.00	50.00	37.00
9:15 AM	49.22	47.00	38.00
9:30 AM	23.05	46.00	38.00
9:45 AM	36.50	48.00	37.00
10:00 AM	40.30	49.00	35.00
10:15 AM	41.76	50.50	34.00
10:30 AM	41.61	51.00	33.50
10:45 AM	60.59	52.00	33.00
11:00 AM	36.37	52.00	32.50
11:15 AM	47.97	53.00	31.00
11:30 AM	56.83	54.00	31.00
11:45 AM	47.83	54.00	30.00
12:00 PM	55.05	55.00	29.50
12:15 PM	43.01	56.00	29.00
12:30 PM	49.61	56.00	29.00
12:45 PM	50.38	56.00	29.00
1:00 PM	43.63	56.00	29.00
1:15 PM	29.45	56.50	28.50
1:30 PM	44.05	57.00	27.00
1:45 PM	22.54	55.00	30.00
2:00 PM	29.09	53.50	31.00
2:15 PM	28.42	54.50	29.00
2:30 PM	22.73	52.00	30.50
2:45 PM	28.85	54.00	29.00
3:00 PM	13.00	53.00	28.00
3:15 PM	16.38	49.50	30.50

ตาราง 6 (ต่อ)

Time	DR(%db/h)	T(°C)	RH(%)
3:30 PM	10.93	49.00	31.00
3:45 PM	10.07	49.50	31.00
4:00 PM	11.22	49.00	31.00
4:15 PM	9.20	50.50	29.50
4:30 PM	14.30	49.50	30.00
4:45 PM	10.74	47.50	32.00
5:00 PM	5.54	45.00	35.00
5:15 PM	3.76	43.00	36.50
5:30 PM	3.95	41.00	39.00
5:45 PM	1.35	39.50	40.00
6:00 PM	5.64	37.50	42.00

ตาราง 6 ข้อมูลการอบแห้งศพชวาโดยมีการเก็บข้อมูล Drying rate, DR อุณหภูมิ, T ความชื้น, RH ในแต่ละช่วงเพื่อให้เห็นว่าข้อมูลทั้งหมดมีความสัมพันธ์กันจริงผู้วิจัยจึงใช้สมการ Multiple Linear Regression มาเป็นตัวพยากรณ์ ซึ่งสมการทั้งหมดแสดงได้ดังนี้

$$\square = \square_0 + (\square_1 \times \square_1) + (\square_2 \times \square_2) + \dots \dots (\square_n \times \square_n) \quad (42)$$

ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น Drying rate, DR Temperature, T Relative Humidity, RH. ดังแสดงดังตาราง 6

ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	2	7220.917968	3610.458984	25.30009319	1.86135E-07			
Residual	34	4851.982344	142.7053631					
Total	36	12072.90031						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	-387.8145738	77.2183269	-5.02231257	1.60713E-05	-544.7410946	-230.888053	-544.74	-230.8880529
T	5.440387645	0.866648953	6.277498663	3.76545E-07	3.679145068	7.201630221	3.68	7.201630221
RH	4.358171658	1.10588161	3.940902551	0.000383468	2.110749828	6.605593488	2.11	6.605593488

ภาพ 55 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์(Coefficient)และค่าความเชื่อมั่น (Significance)

เมื่อทราบสัมประสิทธิ์และค่าความเชื่อมั่น แล้วผู้วิจัยนำทั้งสองค่ามาแทนในสมการที่ (4.5) ประมวลค่า DRpredict โดยมีค่า $\square_0 = -387.8145738$ $\square_1 = 5.440387645$ $\square_2 = 4.358171658$ เมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์แล้วจึงได้สมการดังนี้

$$DR = -387.8145738 + (5.440387645 \times T) + (4.358171658 \times RH) \quad (43)$$

เมื่อ DR = อัตราการอบแห้ง (%db/h)

T = อุณหภูมิ (°C)

RH = ความชื้นสัมพัทธ์ (%)

เมื่อนำมาคำนวณค่า DRpredict จากตาราง 7 จะได้ผลดังตาราง 7 ได้ดังนี้

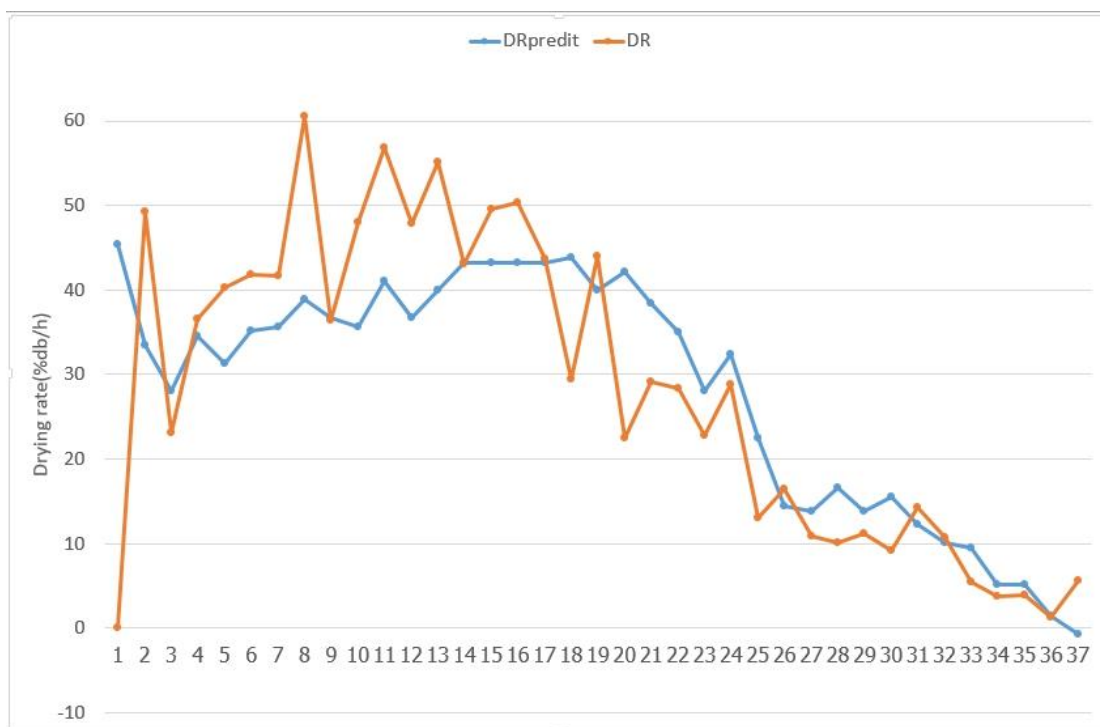
ตาราง 7 ความสัมพันธ์ DRpredict เทียบกับค่า DR

DRpredict(%db/h)	DR(%db/h)	T(°C)	RH(%)
45.46	0.00	50.00	37.00
33.49	49.22	47.00	38.00
28.05	23.05	46.00	38.00
34.58	36.50	48.00	37.00
31.30	40.30	49.00	35.00
35.10	41.76	50.50	34.00
35.64	41.61	51.00	33.50
38.91	60.59	52.00	33.00
36.73	36.37	52.00	32.50
35.63	47.97	53.00	31.00
41.07	56.83	54.00	31.00
36.71	47.83	54.00	30.00
39.97	55.05	55.00	29.50
43.23	43.01	56.00	29.00
43.23	49.61	56.00	29.00
43.23	50.38	56.00	29.00
43.23	43.63	56.00	29.00
43.78	29.45	56.50	28.50

ตาราง 7 (ต่อ)

DRpredict(%db/h)	DR(%db/h)	T(°C)	RH(%)
39.96	44.05	57.00	27.00
42.15	22.54	55.00	30.00
38.35	29.09	53.50	31.00
35.07	28.42	54.50	29.00
28.01	22.73	52.00	30.50
32.35	28.85	54.00	29.00
22.55	13.00	53.00	28.00
14.41	16.38	49.50	30.50
13.87	10.93	49.00	31.00
16.59	10.07	49.50	31.00
13.87	11.22	49.00	31.00
15.49	9.20	50.50	29.50
12.23	14.30	49.50	30.00
10.07	10.74	47.50	32.00
9.54	5.54	45.00	35.00
5.20	3.76	43.00	36.50
5.21	3.95	41.00	39.00
1.41	1.35	39.50	40.00
-0.76	5.64	37.50	42.00

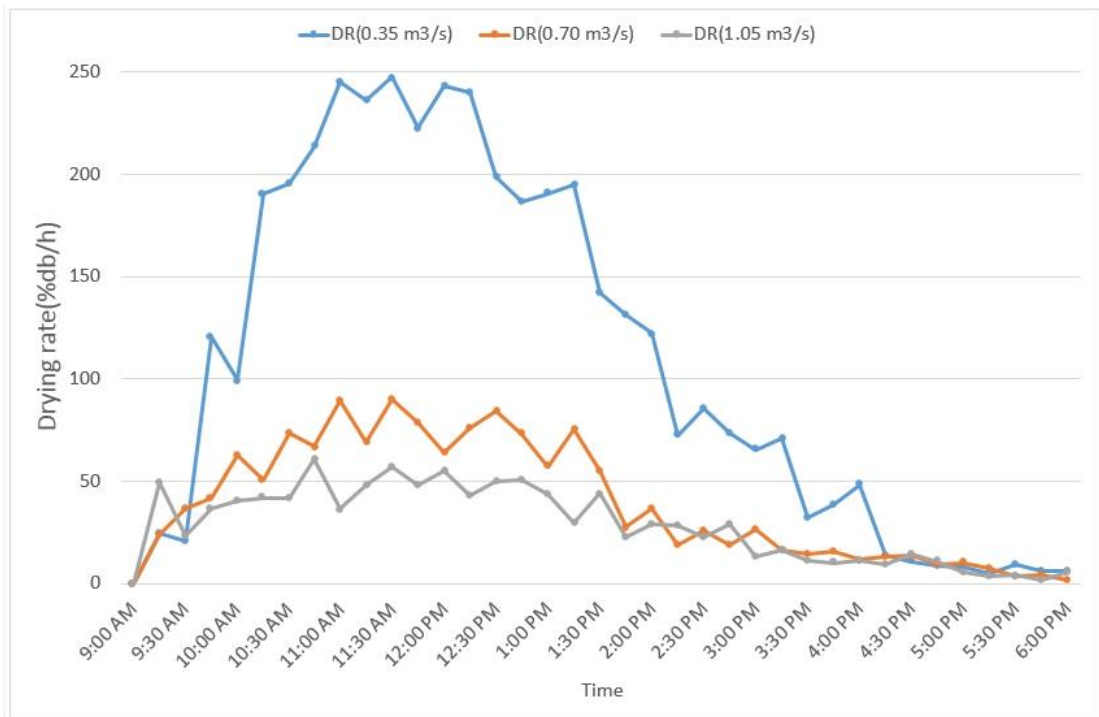
ผลการทำนายผลความสัมพันธ์ระหว่าง DRpredict และ DR พบว่าค่า DR ที่ได้จากการทดลองจริง มีแนวโน้มลดลงจากสูงไปต่ำต่อเนื่องตามเวลาที่ใช้อบแห้งตั้งแต่เริ่มต้นจนสุดท้าย ซึ่งมีความต่างจากกับ DRpredict ที่ได้จากการทำนายความน่าจะเป็นตามข้อมูลทางสถิติ พบว่า การเปลี่ยนแปลง DR มีแนวโน้มลดลงและเพิ่มขึ้น และความชื้นสุดท้ายของการอบแห้ง มีค่าใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้น ดังแสดงตามภาพ 56



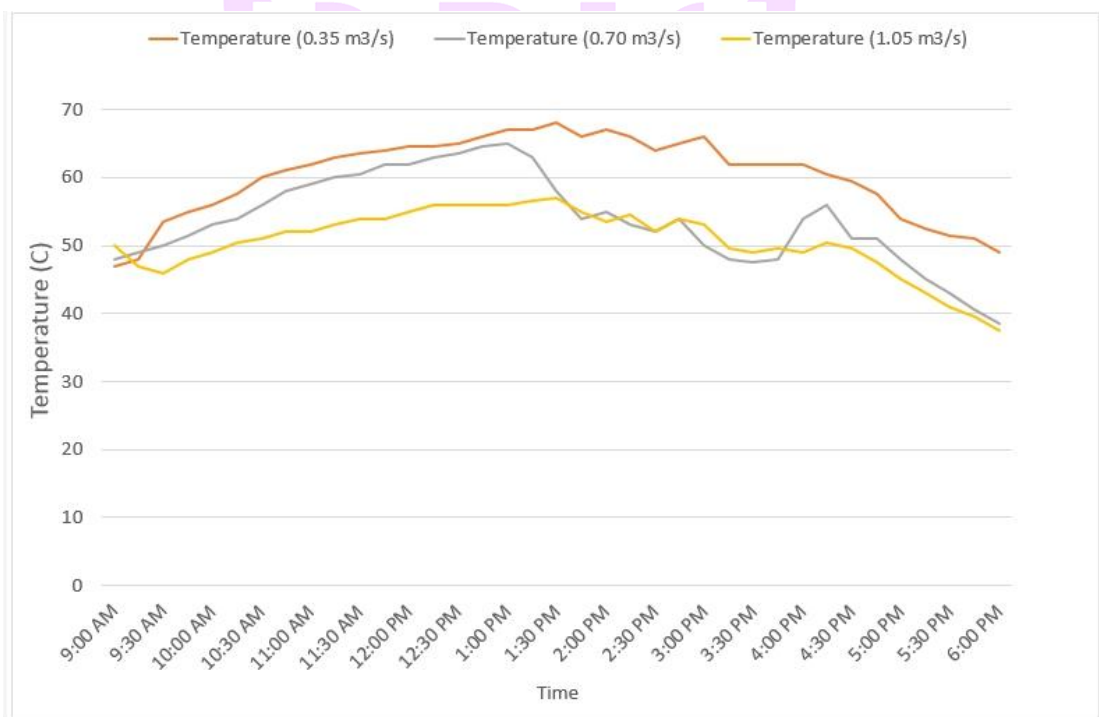
ภาพ 56 การเปรียบเทียบค่าจริงกับค่าจากการพยากรณ์ด้วยตัวแปร Regression แบบรวมตัวแปร

2. ผลการเปรียบเทียบของอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการอบแห้ง

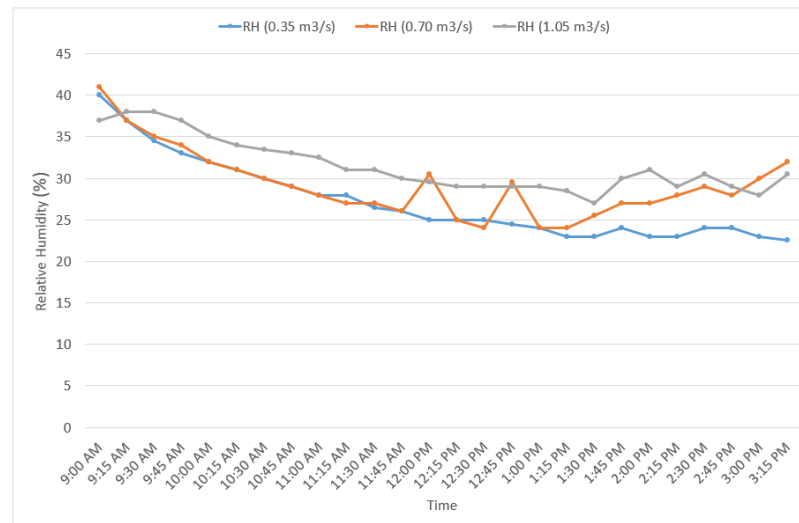
อิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการอบแห้ง จากการทดสอบเปรียบเทียบพบว่า ที่อัตราการไหลของ $0.35 \text{ m}^3/\text{s}$ มีค่าอัตราการอบแห้ง (Drying rate) และ อุณหภูมิสูงที่สุด



ภาพ 57 อิทธิพลของอัตราการไหลอากาศที่มีผลต่อ Drying rate



ภาพ 58 อิทธิพลของอัตราการไหลอากาศที่มีผลต่อ Temperature



ภาพ 59 อิทธิพลของอัตราการไหลอากาศที่มีผลต่อ Relative Humidity

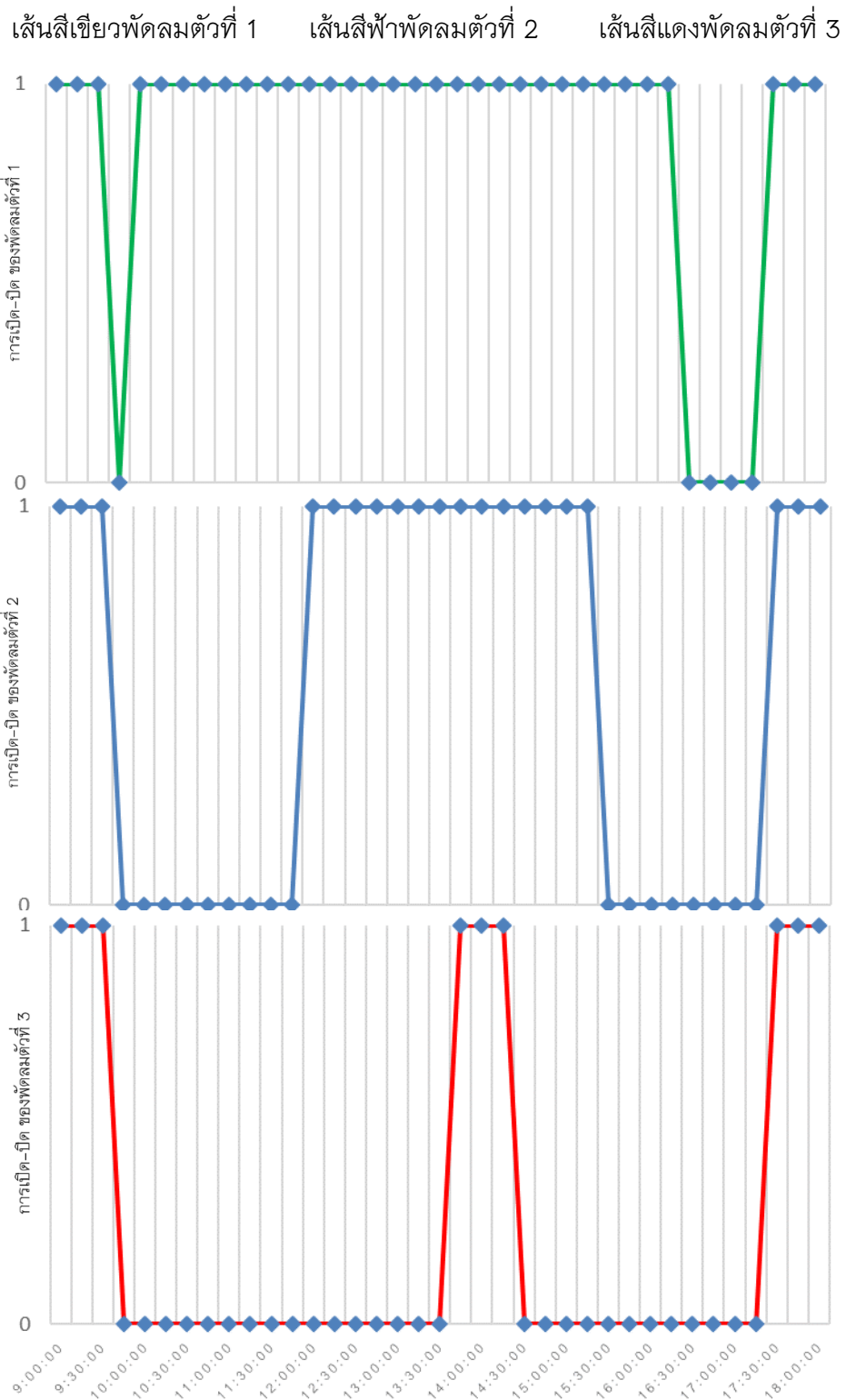
3. ผลการศึกษาอัลกอริทึมควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง

3.1 ความชื้นและอุณหภูมิของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

โดยการทดลองอบแห้งผักตบชวาโดยกำหนดอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 35%

3.1.1 พฤติกรรมการทำงานของชุดคอนโทรล

ทดสอบการทำงานของพัดลมทั้งหมด 3 ตัว ซึ่งกำหนดอัตราการไหลของอากาศ 3 ค่าคือ $0.35 \text{ m}^3/\text{s}$, $0.70 \text{ m}^3/\text{s}$ และ $1.05 \text{ m}^3/\text{s}$ ตามลำดับ โดยทำการบันทึกข้อมูลทุก ๆ 15 นาที หลักการทำงานของพัดลมทั้ง 3 ตัวแบบไม่ต่อเนื่องนั้น แสดงสถานะ On และ Off ซึ่งตั้งค่าการทำงานโดยถ้าความชื้นมากกว่าที่กำหนดพัดลมจะทำงานพร้อมกันทั้ง 3 ตัว ถ้าอุณหภูมิมากกว่าที่กำหนด 1 องศาพัดลมตัวที่ 1 ทำงาน ถ้าอุณหภูมิมากกว่าที่กำหนด 7 องศาพัดลมตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ตัว และถ้าอุณหภูมิมากกว่าที่กำหนด 10 องศาพัดลมทั้ง 3 ตัวทำงานพร้อมกัน ดังแสดงดังภาพที่ 54 ควบคุมการทำงานด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying)



ภาพ 60 ภาพแสดงสภาวะการทำงานของพัคลม 3 ตัว

3.1.2 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น

นำข้อมูลจากการลดลงของน้ำหนักผักตบชวาที่เก็บตั้งแต่เวลา 9.00–18.00 น. เพื่อวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น จากข้อมูลของตารางที่ 8 พบว่าอัตราการไหลของอากาศ, AFR มีค่าเป็น 0 , 0.35 m³/s , 0.70 m³/s และ 1.05 m³/s ตามสถานะของอุณหภูมิและความชื้น โดยทำงานตามอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบไว้

ตาราง 8 ข้อมูลการอบผักตบชวาโดยมีการเก็บข้อมูล Drying rate, DR อุณหภูมิ, T ความชื้น, RH การทำงานอัตราการไหลของอากาศ, AFR ในช่วงเวลาต่าง ๆ

Time	DR(%db/h)	T(°C)	RH(%)	AFR(m ³ /s)
9:00 AM	0.00	42.50	40.3	1.05
9:15 AM	32.15	45.00	38.8	1.05
9:30 AM	28.76	46.90	36.9	1.05
9:45 AM	33.84	50.10	35	0.00
10:00 AM	35.53	51.70	34.7	0.35
10:15 AM	45.69	52.60	36.3	0.35
10:30 AM	30.46	52.00	34.4	0.35
10:45 AM	25.38	53.00	32.8	0.35
11:00 AM	22.50	53.00	32.6	0.35
11:15 AM	77.33	54.10	29.2	0.35
11:30 AM	67.51	55.20	28.7	0.35
11:45 AM	83.08	56.30	28.1	0.35
12:00 PM	57.02	57.40	27.8	0.70
12:15 PM	148.73	58.00	27.2	0.70
12:30 PM	159.73	58.50	27.1	0.70
12:45 PM	113.87	58.60	26.7	0.70
1:00 PM	109.31	58.50	26.6	0.70
1:15 PM	131.64	58.90	26.4	0.70

ตาราง 8 (ต่อ)

Time	DR(%db/h)	T(°C)	RH(%)	AFR(m ³ /s)
1:30 PM	156.35	59.10	26.40	0.70
1:45 PM	140.61	61.00	26.50	1.05
2:00 PM	106.94	61.00	26.80	1.05
2:15 PM	100.68	60.00	27.10	1.05
2:30 PM	113.71	59.00	27.70	0.70
2:45 PM	95.09	58.70	28.50	0.70
3:00 PM	105.58	58.30	29.20	0.70
3:15 PM	128.26	57.30	29.40	0.70
3:30 PM	112.18	56.30	29.80	0.35
3:45 PM	57.02	55.50	31.70	0.35
4:00 PM	30.63	53.80	33.30	0.35
4:15 PM	108.80	52.10	33.00	0.35
4:30 PM	69.71	50.10	33.00	0.00
4:45 PM	56.68	50.00	33.00	0.00
5:00 PM	53.13	50.00	34.00	0.00
5:15 PM	46.19	50.00	34.00	0.00
5:30 PM	28.76	50.00	35.00	1.05
5:45 PM	29.95	50.00	36.00	1.05
6:00 PM	27.07	50.00	36.00	1.05

ตาราง 8 ข้อมูลการอบฟักตบชวาโดยมีการเก็บข้อมูล Drying rate, DR อุณหภูมิ, T ความชื้น, RH การทำงานอัตราการไหลของอากาศ, AFR ในแต่ละช่วงเพื่อให้เห็นว่าข้อมูลทั้งหมดมีความสัมพันธ์กันจริงผู้วิจัยจึงใช้สมการ Multiple Linear Regression มาเป็นตัวพยากรณ์ ซึ่งสมการทั้งหมดแสดงได้ดังนี้

$$\square = \square_0 + (\square_1 \times \square_1) + (\square_2 \times \square_2) + \dots \dots (\square_n \times \square_n) \quad (44)$$

ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น Drying rate, DR Temperature, T Relative Humidity, RH. Air flow rate, ARF ดังแสดงดังตารางที่ 6

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	3	51783.61246	17261.20415	29.4883614	1.85619E-09
Residual	33	19316.76463	585.356504		
Total	36	71100.37709			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	383.7575375	256.6895195	1.495026124	0.14440994	-138.481217	905.9962916	-138.481217	905.9962916
T	-0.23218278	2.888970477	-0.08036869	0.93642946	-6.10983741	5.645471851	-6.10983741	5.645471851
RH	-9.66256298	3.334626347	-2.89764489	0.00663108	-16.4469113	-2.87821467	-16.4469113	-2.87821467
AFR	11.46773341	11.80194585	0.971681582	0.33827776	-12.543506	35.47897278	-12.543506	35.47897278

ภาพ 61 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) และค่าความเชื่อมั่น (Significance)

เมื่อทราบสัมประสิทธิ์และค่าความเชื่อมั่น แล้วผู้วิจัยนำทั้งสองค่ามาแทนในสมการที่

(1) ประมาณค่า DRpredict โดยมีค่า $\beta_0 = 383.7575375$ $\beta_1 = -0.232182778$
 $\beta_2 = -9.662562983$ $\beta_3 = 11.46773341$ เมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์แล้วจึงได้สมการดังนี้

$$DR = 383.7575375 + (-0.232182778 \times T) + (-9.662562983 \times RH) + (11.46773341 \times AFR) \quad (45)$$

เมื่อ DR = อัตราการอบแห้ง (%db/h)

T = อุณหภูมิ (°C)

RH = ความชื้นสัมพัทธ์ (%)

AFR = อัตราการไหลของอากาศ (m³/s)

เมื่อนำมาคำนวณค่า DRpredict จากตาราง 9 จะได้ผลดังตาราง 9 ได้ดังนี้

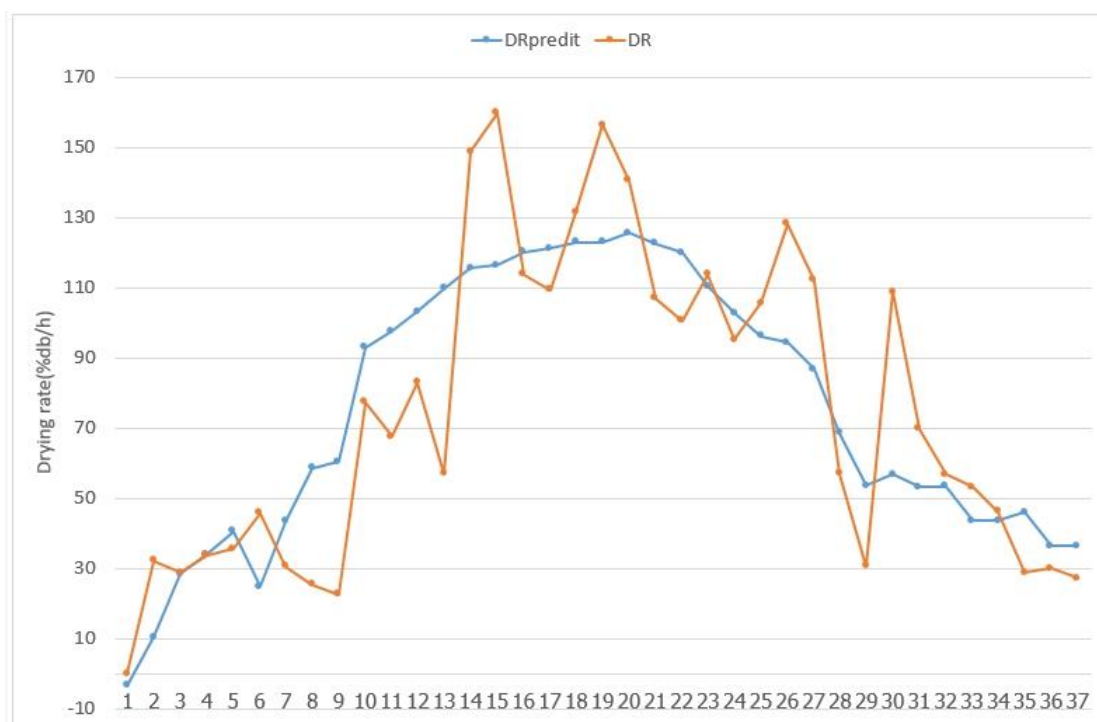
ตาราง 9 ความสัมพันธ์ DRpredict เทียบกับค่า DR

DRpredict(%db/h)	DR(%db/h)	T(°C)	RH(%)	AFR(m ³ /s)
-3.47	0.00	42.50	40.3	1.05
10.44	32.15	45.00	38.8	1.05
28.36	28.76	46.90	36.9	1.05
33.94	33.84	50.10	35.00	0.00
40.48	35.53	51.70	34.70	0.35
24.81	45.69	52.60	36.30	0.35
43.31	30.46	52.00	34.40	0.35
58.53	25.38	53.00	32.80	0.35
60.47	22.50	53.00	32.60	0.35
93.06	77.33	54.10	29.20	0.35
97.64	67.51	55.20	28.70	0.35
103.18	83.08	56.30	28.10	0.35
109.84	57.02	57.40	27.80	0.70
115.50	148.73	58.00	27.20	0.70
116.35	159.73	58.50	27.10	0.70
120.19	113.87	58.60	26.70	0.70
121.18	109.31	58.50	26.60	0.70
123.02	131.64	58.90	26.40	0.70
122.97	156.35	59.10	26.40	0.70
125.58	140.61	61.00	26.50	1.05
122.68	106.94	61.00	26.80	1.05
120.01	100.68	60.00	27.10	1.05
110.43	113.71	59.00	27.70	0.70
102.77	95.09	58.70	28.50	0.70
96.10	105.58	58.30	29.20	0.70
94.40	128.26	57.30	29.40	0.70
86.75	112.18	56.30	29.80	0.35
68.58	57.02	55.50	31.70	0.35

ตาราง 9 (ต่อ)

DRpredict(%db/h)	DR(%db/h)	T(°C)	RH(%)	AFR(m ³ /s)
53.52	30.63	53.80	33.30	0.35
56.81	108.80	52.10	33.00	0.35
53.26	69.71	50.10	33.00	0.00
53.28	56.68	50.00	33.00	0.00
43.62	53.13	50.00	34.00	0.00
43.62	46.19	50.00	34.00	0.00
46.00	28.76	50.00	35.00	1.05
36.34	29.95	50.00	36.00	1.05
36.34	27.07	50.00	36.00	1.05

ผลการทำนายผลความสัมพันธ์ระหว่าง DRpredict และ DR พบว่า แนวโน้มของทั้ง 2 ค่ามีความสอดคล้องไปในทางเดียวกัน ทำให้เห็นได้ว่าสมการของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับความชื้นสัมพัทธ์อุณหภูมิ และอัตราการไหลของอากาศ ที่ได้จากการวิเคราะห์มานั้นสามารถพยากรณ์หาค่าอัตราการอบแห้งของผักตบชวาได้จาก ความชื้นสัมพัทธ์อุณหภูมิ และอัตราการไหลของอากาศ ดังแสดงตามภาพ 62



ภาพ 62 การเปรียบเทียบค่าจริงกับค่าจากการพยากรณ์ด้วยตัวแปร Regression แบบรวมตัวแปร

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตและความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์จะพิจารณาต้นทุนจาก 2 ด้าน คือ 1. ส่วนของราคาต้นทุนชุดโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying) เช่น วัสดุและ อุปกรณ์ และ 2. ราคาต้นทุนแปรผันของการผลิตเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เช่น ราคาผลผลิตทางการเกษตรที่นำมาใช้ในการทดลอง แสดงในตาราง 10

ตาราง 10 แสดงรายการราคาต้นทุนของชุดควบคุมระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

รายละเอียดต้นทุนเครื่องมือ	ราคา (บาท)
Raspberry pi 3B+	6,000
ชุดจอสัมผัส	5,000
ชุดโปรแกรม	2,000
ชุดข้อต่อสายไฟ	3,000
ชุดสายไฟ	8,000

ตาราง 10 (ต่อ)

รายละเอียดต้นทุนเครื่องมือ	ราคา (บาท)
เซ็นเซอร์ 6 ชุด	7,000
ตู้เหล็ก	3,000
ชุดรีเลย์	6,000
อุปกรณ์แปลงไฟ 220V เป็น 12V	3,000
ราคาต้นทุนรวม	43,000

หมายเหตุ: กำหนดให้ระบบมีอายุเฉลี่ย 2 ปี

ตาราง 11 แสดงรายการราคาต้นทุนแปรผันของชุดควบคุมระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

รายละเอียดต้นทุนแปรผัน	ราคา (บาท)
ผักตบชวา กิโลกรัมละ	25
ค่าแรงงาน (สำนักงานแรงงาน)	305

จากข้อมูลในตาราง 10-11 คำนวณจุดคุ้มทุนของการอบผักตบชวา พบว่า ถ้ากำหนดราคาขายที่ 140 บาทต่อกิโลกรัม จุดคุ้มทุนเมื่อจำนวนของหน่วยขายเท่ากับ 373.90 กิโลกรัม จากต้นทุนในการติดตั้งชุดควบคุมระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ 43,000 บาท สามารถตรวจสอบจุดคุ้มทุนได้ดังตาราง 12

ตาราง 12 แสดงการวิเคราะห์ต้นทุนและจุดคุ้มทุนของชุดควบคุมระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

รายการ	ราคา (บาท)
ต้นทุนคงที่	43,000.00
ราคาขายผักตบชวาต่อหน่วย	140
ต้นทุนแปรผันต่อหน่วย	25
จุดคุ้มทุน	373.90 กิโลกรัม

ตาราง 13 แสดงการวิเคราะห์ต้นทุนผันแปร ณ จุดคุ้มทุนของชุดควบคุมระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

งบกำไรขาดทุน (ต้นทุนผันแปร)	ณ จุดคุ้มทุน (บาท)
ขาย	52,346.00
ต้นทุนผันแปร	9,346
กำไรส่วนเกิน	43,000
ต้นทุนคงที่	43,000
กำไร/ขาดทุน	0.00

จากการวิเคราะห์ต้นทุนและต้นทุนผันแปรในตาราง 12-13 พบว่าหน่วยขายที่ 373.9 หน่วย (กิโลกรัม) เป็นหน่วยขายที่เป็นจุดคุ้มทุนของ ชุดควบคุมระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ดังแสดงเป็นหน่วยขาย ณ ที่หน่วยใด ๆ ที่ทำให้ได้ผลกำไรหรือขาดทุน ในตาราง 14

ตาราง 14 แสดงหน่วยการขายฝักตบชวาแห้งจากการใช้ชุดควบคุมระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

รายการ	หน่วยขาย (กิโลกรัม)			
	300	350	400	450
ขาย	42000	49000	56000	63000
ต้นทุนผันแปร	7500	8750	10000	11250
กำไรส่วนเกิน	34500	40250	46000	51750
ต้นทุนคงที่	43000	43000	43000	43000
กำไร/ขาดทุน	-8500	-2750	3000	8750

จากตาราง 14 เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของกำไรและขาดทุนจากการกำหนดหน่วยขาย พบว่าหน่วยขายที่ 400 และ 450 กิโลกรัม ผลการดำเนินงานนั้น ได้กำไรเมื่อเทียบกับต้นทุนคงที่ ดังนั้นการกำหนดหน่วยขายจะต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 373.90 กิโลกรัม หน่วยขายนี้ จึงเป็นตัวแปรที่นำไปสู่การหาระยะเวลาคืนทุน โดยกำหนดระยะเวลาโครงการที่ 5 ปี และมีต้นทุนในการดูแลรักษา 200 บาท ส่วน กระแสเงินสดรับสุทธิต่อปีเป็นรายได้จากการขายฝักตบชวา 30,000 บาท ดังแสดงในตาราง 15

ตาราง 15 แสดงการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนของการใช้ชุดควบคุมระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

ปี	เงินสดจ่ายลงทุนสุทธิเมื่อเริ่มโครงการ (บาท)	กระแสเงินสดรับสุทธิต่อปี (บาท)	ผลตอบแทนสุทธิสะสม (บาท)
0	43,000	-43,000	-43,000
1	200	30,000	-13,200
2	200	30,000	16,600
3	200	30,000	46,400
4	200	30,000	76,200
5	200	30,000	106,000

ตาราง 16 แสดงการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ตัวชี้วัด	ค่าที่ได้	ความหมาย
PB	1 ปี 5 เดือน	ระยะเวลาคืนทุน ≤ 5 ปีตัดสินใจลงทุน
NPV	24,241.90 บาท	NPV > 0 สามารถยอมรับโครงการลงทุนนั้นได้

จากตาราง 16 ในด้านการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น พบว่า การใช้ชุดควบคุมระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากผลตอบแทนที่ได้จากการอบแห้งจะทำให้การลงทุน การใช้ชุดควบคุมระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ คุ้มทุนโดยใช้เวลาประมาณ 1 ปี 5 เดือน ซึ่งถือว่ามีระยะเวลาที่สั้น และการวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 24,241.90 บาท ซึ่งตรงกับเกณฑ์ในการประเมินที่ว่าหากโครงการลงทุนใดที่มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ NPV > 0 ผู้วิเคราะห์ สามารถยอมรับโครงการลงทุนนั้น

การวิเคราะห์ทางสิ่งแวดล้อมของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีระบบอัลกอริทึมควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิ

การวิเคราะห์ทางสิ่งแวดล้อมเพื่อประเมินผลกระทบที่อาจกระทบกับสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากโครงการว่ามีผลกระทบกับสิ่งแวดล้อมหรือไม่ โดยประมาณการผลกระทบที่คาดว่าจะเกิดขึ้น โครงการนี้มีการใช้พลังงานทดแทน คือการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงาน

ความร้อน ให้กับวัตถุดิบ และเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าให้กับพัดลมระบายอากาศ ซึ่งเป็นการใช้พลังงานสะอาดไม่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจก แต่จะคำนวณเพื่อเป็นแนวทางสำหรับกรณีใช้ไฟฟ้าจากสายส่งให้กับพัดลมระบายอากาศ จากการวิเคราะห์ข้อมูลการเปิดปิดพัดลมระบายอากาศทั้ง 3 ตัว โดยพัดลมมีขนาด แรงดันไฟ 12V กระแสไฟฟ้า 0.24A ทำให้ทราบว่าระบบมีการเปิดปิดพัดลมแบบไม่ต่อเนื่องตามเงื่อนไขสามารถลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก 0.67859kgCO₂e ต่อเดือนเมื่อเทียบกับแบบระบบเดิม เนื่องจากมีการสั่งการให้พัดลมหยุดทำงานดังแสดงในตาราง 17

ตาราง 17 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีระบบอัลกอริทึมควบคุมอัตราการไหลของอากาศกับแบบเดิม

รายการ	ปริมาณ (หน่วย/เดือน)	EF (kgCO ₂ e/หน่วย)	ปริมาณก๊าซเรือน กระจก(kgCO ₂ e/เดือน)
พลังงานไฟฟ้า (แบบมีระบบ ควบคุม)	1.1232	0.5610	0.63012
พลังงานไฟฟ้า (แบบเดิม)	2.3328	0.5610	1.308701

บทที่ 5

สรุปผล

การศึกษาอัลกอริทึมควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ครั้งนี้ ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างอัลกอริทึมควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และเสนอแนะแนวทางการจัดการพลังงานเพื่อความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยมีการออกแบบเครื่องอบแห้งและอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมภายในเครื่องอบแห้ง ออกแบบบอร์ด Raspberry pi 3B+ ทำงานร่วมกับ Smart Phone Display และทำการเขียนคำสั่งระบบควบคุมสั่งงานอุปกรณ์ภายใน ติดตั้งอุปกรณ์ภายในเครื่องอบแห้ง และทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้ง สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

สรุปผล

1. การประยุกต์ใช้โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying) แบบเรือนกระจก

โรงอบแบบเดิม

อิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของห้องอบแห้งภายในตู้อบแห้งแบบเดิม มีอุณหภูมิสูงถึง 60 °C ในช่วงเวลา 12:00 – 15:00 น. เท่านั้นเป็นอิทธิพลของความร้อนจากความเข้มรังสีอาทิตย์ และมีอุณหภูมิลดลงในช่วงเวลา 16:00 น. ส่วนความชื้นสัมพัทธ์ลดลงจากช่วงเริ่มต้น 50 – 60% ค่อย ๆ ลดต่ำลงเป็นลำดับ ไปอยู่ที่ 25–30% ใช้เวลาประมาณ 4 hr ในช่วงเวลา 16:00 น. ความชื้นสัมพัทธ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สาเหตุจากความเข้มรังสีอาทิตย์ส่งผลให้อุณหภูมิภายในตู้อบแห้งลดลง

น้ำหนักมีแนวโน้มลดลงต่อเนื่อง โดยใช้เวลา 6 ชั่วโมง น้ำหนักที่วัดได้หลังการอบแห้งพบว่า น้ำหนักของตัวอย่างทั้งสองเฉลี่ย 100 g

ความต่างของอุณหภูมิภายใน (Temp in) กับภายนอก (Temp out) ของตู้อบแห้งพบว่า ภายในมีอุณหภูมิสูงกว่าภายนอก มีความสามารถถ่ายเทความร้อนให้ผลิตภัณฑ์สำหรับระเหยความชื้นออกได้ แต่จะลดลงตั้งแต่ช่วงเวลา 15.00 น.

ความชื้นสัมพัทธ์ภายใน (Humidity in) กับความชื้นสัมพัทธ์ภายนอก (Humidity out) จากการนำความชื้นสัมพัทธ์ออกสู่ภายนอกระบบด้วยการพาความร้อน ผลทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบแห้งลดลง และมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกตู้อบ

โรงอบที่ประยุกต์ใช้โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying)

อิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของโรงอบแห้งภายในโรงอบแห้งมีอุณหภูมิสูงถึง 60 °C ในช่วงเวลา 10:00 – 15:00 น. เป็นอิทธิพลของความร้อนจากความชื้นรังสีอาทิตย์ และระบบก๊าซ LPG ที่ช่วยเร่งอุณหภูมิพร้อมทั้งไล่ความชื้นและรักษาอุณหภูมิให้คงที่ตลอดเวลา จนถึงเวลา 21:30 น. ส่วนความชื้นสัมพัทธ์ลดลงจากช่วงเริ่มต้น 50 – 60% ค่อย ๆ ลดต่ำลงเป็นลำดับ ไปอยู่ที่ 25–30% ใช้เวลาประมาณ 1 hr รักษาความชื้นให้คงที่ตลอดเวลา จนถึงเวลา 21:30 น. เนื่องจากมีระบบก๊าซ LPG ที่เข้ามาร่วมทำให้สามารถรักษาอุณหภูมิและความชื้นจนเป็นเวลา 12 ชั่วโมงต่อวัน

น้ำหนักมีแนวโน้มลดลงต่อเนื่องซึ่งน้ำหนักที่วัดได้หลังการอบแห้ง พบว่า น้ำหนักของตัวอย่างกล้วยทั้งสามเฉลี่ย 100 g ทั้ง 2 รอบการอบต่อวัน

ความต่างของอุณหภูมิภายใน (Temp in) กับภายนอก (Temp out) ของตู้อบแห้ง พบว่า ภายในมีอุณหภูมิสูงกว่าภายนอก นั้นแสดงว่า มีความสามารถถ่ายเทความร้อนให้ผลิตภัณฑ์สำหรับระเหยความชื้นออกได้

ความชื้นสัมพัทธ์ภายใน (Humidity in) กับความชื้นสัมพัทธ์ภายนอก (Humidity out) พบว่า ความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบแห้งลดลง และมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกตู้อบแห้งโดยยังคงรักษาความชื้นอยู่เนื่องจากการทำงานของระบบก๊าซ LPG มีช่วยรักษาความชื้นให้คงที่

การเปรียบเทียบความแตกต่างของระหว่างโรงอบแบบเดิม กับโรงอบที่ใช้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying) พบว่า ระหว่างโรงอบระบบอบแห้งอัจฉริยะ กับโรงอบแบบเดิม น้ำหนักสดของวัตถุดิบที่ใช้อบแห้งแต่ละครั้ง น้ำหนักแห้งของวัตถุดิบที่ใช้อบแห้งแต่ละครั้ง ของทั้ง 2 ระบบไม่มีความแตกต่างกัน ส่วนอุณหภูมิในห้องอบ ความชื้นในห้องอบ ของโรงอบที่ใช้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying) พบว่า โรงอบอัจฉริยะ สามารถรักษาอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องอบได้ดีกว่าตั้งแต่เวลา 9.00 น. – 21.30 น. ทำให้สามารถเพิ่มรอบการอบแห้งได้ 2 รอบต่อวัน

2. ผลการศึกษาอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง

ที่อัตราการไหลของอากาศ ที่ $0.35 \text{ m}^3/\text{s}$ ส่งผลต่ออัตราการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้ดีและเหมาะสม เนื่องจากพื้นที่รับรังสีอาทิตย์สามารถผลิตความร้อนที่เหมาะสมกับการอบแห้งภายในของเครื่องอบ และประกอบกับความชื้นถ่ายเทให้กับผลิตภัณฑ์ภายใน ส่งผลให้ความชื้นระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ และอัตราการไหลของอากาศที่ $0.35 \text{ m}^3/\text{s}$ มีความเร็วเหมาะสมที่ดึงความชื้นภายในตู้อบออกสู่ภายนอก ส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นลง หรือเรียกง่ายว่า ผลิตภัณฑ์แห้ง

การใช้อัตราการไหลของอากาศ ที่ $0.70 \text{ m}^3/\text{s}$ ส่งผลต่ออัตราการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้น้อยกว่าการใช้ อัตราการไหลของอากาศ ที่ $0.35 \text{ m}^3/\text{s}$ จึงเป็นข้อมูลเพื่อประกอบการออกแบบอัลกอริทึมการทำงานของพัสดลมแบบไม่ต่อเนื่อง

การใช้อัตราการไหลของอากาศ ที่ $1.05 \text{ m}^3/\text{s}$ ส่งผลต่ออัตราการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้น้อยกว่าการใช้ อัตราการไหลของอากาศ ที่ $0.70 \text{ m}^3/\text{s}$ ทำให้มีข้อมูลการอบแห้งสำหรับประกอบการออกแบบอัลกอริทึมการทำงานของพัสดลมแบบไม่ต่อเนื่องเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด และมีการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า

3. ผลการศึกษาอัลกอริทึมควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

ผลการทำนายผลความสัมพันธ์ระหว่าง DRpredict และ DR พบว่า แนวโน้มของทั้ง 2 ค่ามีความสอดคล้องไปในทางเดียวกัน ทำให้เห็นได้ว่าสมการของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และอัตราการไหลของอากาศ ที่ได้จากการวิเคราะห์มานั้นสามารถพยากรณ์หาค่าอัตราการอบแห้งของผักตบชวาได้จาก ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และอัตราการไหลของอากาศ

4. การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตและความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

ผลตอบแทนที่ได้จากการอบแห้งจะทำให้การลงทุน การใช้ชุดควบคุมระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ คุ้มทุนโดยใช้เวลาประมาณ 1 ปี 5 เดือน ซึ่งถือว่ามีระยะเวลาที่สั้น และการวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 24,241.90 บาท

อภิปรายผล

จากผลการศึกษาอัลกอริทึมควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ครั้งนี้ สามารถอภิปรายผลการศึกษาดังต่อไปนี้

จากการเปรียบเทียบความแตกต่างของระหว่างโรงอบแบบเดิม กับโรงอบที่ใช้ระบบ ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying) อบแห้ง อัจฉริยะ พบว่า ระหว่างโรงอบระบบอบแห้งอัจฉริยะ กับโรงอบแบบเดิม น้ำหนักสดของกล้วย ที่ใช้อบแห้งแต่ละครั้ง น้ำหนักแห้งของกล้วยที่ใช้อบแห้งแต่ละครั้ง ของทั้ง 2 ระบบ ไม่มีความ แตกต่างกัน ส่วนอุณหภูมิในห้องอบ ความชื้นในห้องอบ ของโรงอบที่ใช้ระบบ ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบอบแห้งอัจฉริยะ (Smart Solar Drying) อบแห้ง อัจฉริยะ สามารถรักษาอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องอบได้ดีกว่าตั้งแต่เวลา 9.00 น. - 21.30 น. ทำให้สามารถเพิ่มรอบการอบแห้งได้ 2 รอบต่อวัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ พรพิมล กันทะวงศ์ และคณะ (2557) ได้ศึกษาการควบคุมตู้อบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนด้วย ระบบสมองกลฝังตัว พบว่า การนำระบบสมองกลฝังตัว (Embedded system) เข้ามาควบคุม การทำงานให้ระบบมีความชาญฉลาดทำให้กระบวนการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนมี ประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และสามารถควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น และเวลาได้ตามที่กำหนดไว้ ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการอบแห้งสูงมาก และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ อัญชณา อุประกุล (2558) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การอบแห้งผักตบชวาโดยใช้ระบบปั๊มความร้อน พบว่า ตู้อบด้วยลมร้อนนี้สามารถทำการกำจัด ความชื้นออกจากผักตบชวาแทนการตากแดด ซึ่งเป็น กระบวนการที่ใช้เวลาในการกำจัดความชื้นนาน จากผลการทดลองพบว่าทั้งอุณหภูมิ และเวลา มีผลต่อการอัตราการอบแห้ง โดยสภาวะที่เหมาะสมในการอบไล่ความชื้นของผักตบชวา พบว่า อุณหภูมิ 50°C และเวลาที่ใช้ในการอบ อยู่ที่ 4 ชั่วโมง ได้ผักตบชวาไม่แห้งกรอบเกินไป เมื่อ เทียบกับการตากแห้งแบบธรรมชาติแล้วจะต้องใช้เวลาใน การตากแห้งอยู่ที่ 3-4 วัน ทำให้ลด เวลาในการเตรียมวัตถุดิบสำหรับการผลิตสินค้าจักสานได้

จากผลการศึกษาผลตอบแทนที่ได้จากการอบแห้งจะทำให้การลงทุน การใช้ชุด ควบคุมระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ คุ่มทุนโดยใช้เวลาประมาณ 1 ปี 5 เดือน ซึ่งถือว่ามี ระยะเวลาที่สั้น และการวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 24,241.90 บาท ซึ่ง สอดคล้องกับงานวิจัยของ ปิยะวรา วัฒนนะ (2562) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การพัฒนาเครื่อง อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบครึ่งทรงกลมสำหรับอบแห้ง ผลผลิตทางการเกษตร พบว่า การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ของโครงการ เท่ากับ 48,541.47 บาท อัตราผลตอบแทนของโครงการ (IRR) เท่ากับ 27 % มีระยะเวลาคืนทุน (PB) เท่ากับ 2.9 ปี และการวิเคราะห์ด้านสิ่งแวดล้อมของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบครึ่ง ทรงกลมสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเมื่อเทียบกับการใช้ก๊าซหุงต้มลดลงเท่ากับ 1.494 kgCO₂e

ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาค้างนี้มีข้อเสนอแนะที่ได้รับจากการศึกษาดังต่อไปนี้

1. จากผลการศึกษาพบว่า ที่อัตราการไหลของอากาศ ที่ $0.35 \text{ m}^3/\text{s}$ ส่งผลต่ออัตราการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้ดีและเหมาะสม เนื่องจากพื้นที่รับรังสีอาทิตย์สามารถผลิตความร้อนที่เหมาะสมกับการอบแห้งภายในของเครื่องอบ แต่ที่อัตราการไหลของอากาศ ที่ $0.70 \text{ m}^3/\text{s}$ และ $1.05 \text{ m}^3/\text{s}$ ไม่เหมาะสมกับการอบแห้ง ดังนั้น จึงควรมีการพัฒนาและปรับปรุง เกี่ยวกับการใช้พัดลม โดยการปรับให้มีความละเอียดในการทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง เพื่อหาทางปรับปรุงแก้ไขในการเปิดปิดพัดลม ที่อาจจะสามารถลดเวลาในการอบให้ได้เร็วยิ่งขึ้น และใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า
2. จากผลการศึกษานำไปประยุกต์ใช้งานกับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนต่าง ๆ ได้ เนื่องจากง่ายต่อการสร้างหรือการติดตั้ง อีกทั้งยังสามารถประหยัดพลังงาน ประหยัดค่าใช้จ่าย และสามารถลดต้นทุนทั้งพลังงาน และวัตถุดิบได้
3. อาจมีศึกษาการเพิ่มเติมอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในโรงอบแห้งเพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

บรรณานุกรม

- กฤษฎา เตชะ และธีระพงษ์ บุญส่ง. (2550). **ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับก๊าซ LPG.** งานวิจัย นครสวรรค์: มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์.
- กิตติมา งามสาย และอมรชัย อารณวิธานพ. (2556). Energy Storage เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงาน. **Technology Promotion and INNOMag**, 40(230), 20–40.
- กรมธุรกิจพลังงาน. (2557). บทความเรื่องก๊าซปิโตรเลียมเหลว LPG โดยกรมธุรกิจพลังงาน. สืบค้นเมื่อ 16 มีนาคม 2562, จาก <http://www.pap-gasone.com/topic.php?id=15>.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน. (2547). **รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทย.** สืบค้นเมื่อ 22 สิงหาคม 2561, จาก <http://www.dede.go.th/dede/index.php?id=750>.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน. (2554). **การพัฒนาพลังงานทดแทน.** กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน.
- กระทรวงพลังงาน. (2554). **แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ.2554–2563).** กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- กระทรวงพลังงาน. (2561). **ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์.** กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- จงจิตร หิรัญลาภ. (2541). **กระบวนการพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปความร้อน.** กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จารุวัฒน์ เจริญจิต. (2555). การประยุกต์ใช้พลังงานจากรังสีแสงอาทิตย์มาลด ความชื้น ผลผลิตทางการเกษตร อาหารต่าง ๆ เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน การอบแห้งด้วย รังสีแสงอาทิตย์ในประเทศไทย. **วารสารวิจัย มข**, 17(1),110–124.
- จุไรวัลย์ รัตนพิสิฐ. (2549). **การศึกษาเบื้องต้น เพื่อประเมินคุณลักษณะน้ำส้มควันไม้จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา.** รายงานการวิจัย สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- จำนงค์ นุกุลคาม และคณะ. (2542). **กระบวนการผลิตกล้วยตากแบบต่อเนื่องด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า.** ลำปาง: ศูนย์การศึกษานอกกระบบและการศึกษาตามอัธยาศัยอำเภอแจ้ห่ม จังหวัดลำปาง.
- ฐานข้อมูลส่งเสริมและยกระดับคุณภาพสินค้า OTOP. (2023). **สรรพคุณและประโยชน์ของ**

กล้วยน้ำว้า. กรุงเทพฯ: สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.

ทันพงษ์ ภูริรักษ์. (มปป). **เอกสารประกอบการสอน วิชาไมโครคอนโทรลเลอร์เบื้องต้น.**

สระบุรี: วิทยาลัยเทคนิคสระบุรี.

ธีระภัทร์ แมนมิตร. (2558). ระบบกักเก็บพลังงานโดยใช้แบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับผู้ใช้ไฟที่มีการคิดอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาการใช้งาน. **วารสารวิจัยพลังงาน**, 12(2), 20–36.

นักสิทธิ์ คุ้มวัฒนาชัย. (2532). **การถ่ายเทความร้อน.** กรุงเทพฯ: พิสิกส์เซนเตอร์.

ปาณิตา อ่อนดอกไม้. (2560). **การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยโรงอบพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ (Greenhouse Solar Dryer).** ลำปาง: สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง.

ปิติภัทร ธีระเกียรติ (ผู้บรรยาย). (31 พฤษภาคม–2 มิถุนายน 2560). โครงสร้างค่าไฟฟ้าสำหรับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีระบบกักเก็บพลังงาน. **ในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13** (หน้า 144). เชียงใหม่: โรงแรม ดิเอ็มเพรส เชียงใหม่.

ปีย์วรา วัฒนนะ. (2562). **การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบครึ่งทรงกลมสำหรับอบแห้ง ผลผลิตทางการเกษตร.** วิทยานิพนธ์ วท.ม., มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา

พงศ์ ไชยมงคล. (2557). **การจัดการพลังงานไฟฟ้าในระบบจำหน่าย แบบสมาร์ตกริดอย่างมีประสิทธิภาพ.** งานวิจัย กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

พรพิมล กันทะวงศ์ และคณะ. (2557). **การควบคุมตู้อบแห้งแบบใช้ป้มความร้อนด้วยระบบสมองกลฝังตัว.** สืบค้นเมื่อ 22 สิงหาคม 2561, จาก https://prezi.com/wif-rg4q_ize/presentation/.

พิชัย ถิ่นสันติสุข. (2557). **ความอัจฉริยะของสมาร์ตกริด.** สืบค้นเมื่อ 22 สิงหาคม 2561, จาก <http://zerowaste.co.th/images/Smart%20Grid%20Energy%20Policy.pdf>

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิตยา รัตนปนนท์. (2557). **ระบบการบรรจุแบบปลอดเชื้อ.** สืบค้นเมื่อ 9 สิงหาคม 2561, สืบค้นเมื่อ <http://www.foodnetworksolution.com/>

wiki/word/1547.

พิภพ นราแก้ว และปกรณ์ สันตกิจ. (2558). **การพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์.**

ลำปาง: สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.) และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

(MTEC). (2556). **ระบบสมาร์ทกรีต.** กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม

เกล้าธนบุรี.

รวิภา ยงประยูร. (2558). ศึกษาเรื่องการพัฒนากระบวนการผลิตเห็ดอบแห้งด้วยเครื่อง

อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก โดยการมีส่วนร่วมของกลุ่มวิสาหกิจ

ชุมชน กลุ่มอาชีพเพาะเห็ดบ้านทุ่งป่อแค้น ตำบลปงยางคก อำเภอห้างฉัตร จังหวัด

ลำปาง. **วารสารการพัฒนาชุมชนและคุณภาพชีวิต**, 3(2),133-140.

वलันต์ จินดาตา. (2560). **ลักษณะรูปทรงของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่งผลต่อ**

การอบแห้งยางพาราแผ่น. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 21(1), 89-99.

วิวัฒน์ คล่องพานิช และชลทิศ ศรีสัตบุตร. (2533). **รายงานการศึกษาการอบแห้งลำไย**

โดยใช้ก๊าซหุงต้ม. ทูลสนับสนุนงานวิจัย เชียงใหม่: คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

วิศิษฐ์ ชูประเสริฐ. (2555). **การนำความร้อนปล่อยทิ้งจากระบบทำน้ำเย็นร่วมกับการ**

ใช้ฮีตปั๊มในการผลิตน้ำร้อน. วารสารวิจัยพลังงาน, 9(2), 48-59.

วิโรจน์ ล้อมตระการ และคณะ. (2551). **การพัฒนาพลาสติกคอมโพสิตเพิ่มช่วงแสงสำหรับ**

ใช้เป็นพลาสติกคลุมแปลงเพื่อเพิ่มคุณภาพของผลิตผลทางการเกษตร. กรุงเทพฯ:

สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.)

สรารุณี แนนเียร. (2552). **การศึกษาศมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์**

แบบกรีนเฮาส์ขนาดใหญ่ที่มีอุปกรณ์ให้ความร้อนเสริม. วิทยานิพนธ์ วท.ม.,

มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพฯ.

สมชาย โสภณธรณฤทธิ. (2540). **การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท.** กรุงเทพฯ:

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สมพล โคศิริ. (2554). **ระบบควบคุมและจัดการพลังงานสมาร์ทกรีตสำหรับระบบผลิต**

ไฟฟ้าแบบแยกเดี่ยวจากพลังงานทดแทน. วิทยานิพนธ์ วศ.ม., มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, กรุงเทพฯ.

สรารุช พลวงษ์ศรี. (2556). **การเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนของระบบทำน้ำร้อน แสงอาทิตย์ที่มีป้อนความร้อนเสริมโดยการใช้สารละลายเงินนาโนในตัวรับรังสีอาทิตย์.** วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง. 6(2), 106–120.

สุญาณี เสสบุตร และคณะ. (2545). **ผักตบชวา". ใน วีระชัย ณ นคร (บ.ก.). พรรณไม้น้ำบึง บอระเพ็ด.** กรุงเทพฯ: องค์การสวนพฤกษศาสตร์ สำนักนายกรัชมณฑล.

อัญชณา อุประกุล. (2558). การอบแห้งผักตบชวาโดยใช้ระบบป้อนความร้อน. **สัปดาห์ : วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สทวท.)**, 2(1), 35–40.

Abhay, L., Chandramohan, V.P., Raju, V.R. & Anil, K. (2014). Development of indirect type solar dryer and experiments for estimation of drying parameters of apple and watermelon, **Thermal Science and Engineering Progress**, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100477>

Ali Hassana, Ali M. Nikbahkta, Zachary Welsha, Prasad Yarlagadda, Sabrina Fawziab, Azharul Karima, (2014). Experimental and thermodynamic analysis of solar air dryer equipped with V-groove double pass collector: Techno-economic and exergetic measures. **Energy Conversion and Management: X**, 16(1), 1–16.

Alok, R.P. & Richard, W.P. (1994). Milliarsecond Structures in Gravitationally Lensed Systems. **Astrophysical Applications of Gravitational Lensing**. 59(8), 305–310.

Beaudin, M., Zareipour, H., Achellenberglobe, A. and Rosehart, W., (2010). Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review. **Energy for Sustainable Development**, 14, 302–314.

Boussinesq, J. (1877). **Theorie de lcoulement tourbillonnant et tumultueux des liquides dans les lits rectilignes a grande section**, Paris: Fautiers–Villars.

Brooker et al. (1992). **“A policy analysis of performance-based budgeting in Arkansas Higher Education,”** Dissertation Ed.D., Arkansas: The Univ. of Arkansas.

- Hohenheim University. (2003). **การพัฒนาาระบบอบแห้งไม้แบบกรีนเฮ้าส์**. Stuttgart: Hohenheim University.
- Iglesia, H.A. and Chirife, J. (1982). **Handbook of Food Isotherms, Water Sorption Parameters for Food and Food Components**. Waltham: Academic Press.
- Malan, L., van Rooyen, J.M., et al. (2009). **Nocturnal Blood Pressure**. 3-methoxy-4-hydroxyphenylglycol and Carotid Intima-Media Thickness: The SABPA.
- Modern Manufacturing. (2019). **MODERN MANUFACTURING**. Bangkok: Modern Manufacturing.
- Pragnan Lada, Rahul Kumarb, Rajat Saxenac, Jatin Patela. (2023). Numerical investigation of phase change material assisted indirect solar dryer for food quality preservation. **International Journal of Thermofluids**, 18, 1-24.
- Promise, J.E., Akachukwu, B.E. & Kayode, J.S. (2020). Design and development of an active indirect solar dryer for cooking banana. **Journal of the Association of Energy Engineers**, 118(5), 1-24.
- Sodha, M.S. & et, al. (1987). A mathematical model for A deep-bed grain drying system. **International Journal of Energy Research** Volume, 11(1), 95-111.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	ณัฐวิทย์ ทองมงคล
วัน เดือน ปี เกิด	20 ตุลาคม 2529
สถานที่เกิด	ฉะเชิงเทรา
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2555 วท.ม. (พลังงานทดแทน), มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก พ.ศ. 2552 วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา, จังหวัดชลบุรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	36 หมู่ 4 ตำบลบางคา อำเภอราชสาส์น จังหวัดฉะเชิงเทรา
ผลงานตีพิมพ์	[1] ณัฐวิทย์ ทองมงคล, วัชระ วงศ์ปัญญา และบุญวัฒน์ วิจารณ์พล. (2563). การพัฒนาโรงอบแห้งอัจฉริยะร่วมกับระบบสมาร์ตกริด เทคโนโลยีเพื่อการจัดการการแปรรูปกล้วยของกลุ่มกล้วยราชสาส์น อำเภอราชสาส์น จังหวัดฉะเชิงเทรา. สักทอง วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี, 7(2), 13-30. [2] ณัฐวิทย์ ทองมงคล, วัชระ วงศ์ปัญญา และบุญวัฒน์ วิจารณ์พล. (2564). การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์กล้วย กรณีศึกษา กลุ่มกล้วยอบ จังหวัดฉะเชิงเทรา. วารสารวิชาการ เทพสตรี I-TECH, 16(2), 108-116.
รางวัลที่ได้รับ	-