

การออกแบบสร้างและทดสอบระบบอบแห้งแบบผสมผสาน  
เพื่อการประหยัดพลังงาน



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน  
มหาวิทยาลัยแม่โจ้  
พ.ศ. 2564

การออกแบบสร้างและทดสอบระบบอบแห้งแบบผสมผสาน  
เพื่อการประหยัดพลังงาน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน  
สำนักบริหารและพัฒนาระบบสารสนเทศ มหาวิทยาลัยแม่โจ้  
พ.ศ. 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การออกแบบสร้างและทดสอบระบบอบแห้งแบบผสมผสาน  
เพื่อการประหยัดพลังงาน

พิบูลย์ สีคำ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา คงกระพันธ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หยาดฝน ทนงการกิจ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี ปฏิบัติการแทน

อธิการบดี มหาวิทยาลัยแม่โจ้

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

ชื่อเรื่อง	การออกแบบสร้างและทดสอบระบบอบแห้งแบบผสมผสานเพื่อการประหยัดพลังงาน
ชื่อผู้เขียน	นายพิบูลย์ สีคำ
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญ คงกระพันธ์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการออกแบบและสร้างระบบอบแห้งแบบผสมผสานเพื่อการประหยัดพลังงานในกระบวนการอบแห้ง ระบบอบแห้งนี้ติดตั้งห้องอบแห้งที่มีขนาดความจุประมาณ  $5 \text{ m}^3$  ความร้อนที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งมาจากแหล่งความร้อน 3 ชนิดที่ทำงานผสมผสานกัน ได้แก่ 1) ป้อนความร้อนขนาด  $5.5 \text{ kW}_{\text{electric}}$  2) ฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด  $18 \text{ kW}_{\text{electric}}$  และ 3) อินฟราเรดขนาด  $5 \text{ kW}_{\text{electric}}$  โดยอุปกรณ์ทั้งสามสามารถผลิตความร้อนรวมกันได้ประมาณ  $29 \text{ kW}_{\text{thermal}}$  เครื่องอบแห้งนี้สามารถผลิตลมร้อนที่มีความเร็วลมและอุณหภูมิสูงสุดประมาณ  $3 \text{ m/s}$  และ  $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ โดยเมื่อผนวกรวมกับการให้ความร้อนด้วยอินฟราเรดจะสามารถสร้างอุณหภูมิที่ผิววัสดุอบแห้งได้มากกว่า  $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  จากผลการทดลองอบแห้งใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำพบว่าระบบอบแห้งแบบผสมผสานในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ  $55.88 \%$  และ  $58.96 \%$  ซึ่งมีค่าสูงกว่าการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นแหล่งความร้อนเพียงอย่างเดียวเท่ากับ  $56 \%$  และ  $41 \%$  ลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ประมาณ  $69 \%$  และ  $38 \%$  และลดการใช้พลังงานในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิดได้ประมาณ  $36 \%$  และ  $29 \%$  ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวจึงคุ้มค่าที่จะดำเนินการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรด้วยระบบอบแห้งแบบผสมผสานแหล่งความร้อนเนื่องจากประหยัดเวลาทำให้สามารถเพิ่มกำลังการผลิตต่อวันได้ และยังลดต้นทุนทางด้านพลังงานอีกด้วย ทั้งนี้เมื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ในการใช้ระบบอบแห้งต้นแบบในงานวิจัยนี้เพื่อผลิตใบมะกรูดส่งขายในเชิงพาณิชย์พบว่า มีระยะเวลาในการคืนทุนของโครงการประมาณ  $461 \text{ day}$

คำสำคัญ : กระบวนการอบแห้ง, ผลิตผลทางการเกษตร, ระบบผสมผสาน, การประหยัดพลังงาน, การอนุรักษ์พลังงาน

<b>Title</b>	DESIGN CONSTRUCTION AND TEST OF A HYBRID DRYING SYSTEM FOR ENERGY SAVING
<b>Author</b>	Mr. Phibun Ssekham
<b>Degree</b>	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
<b>Advisory Committee Chairperson</b>	Assistant Professor Dr. Parin Khongkrapan

### ABSTRACT

The purpose of this research was to design and construct a prototype hybrid drying system in order to reduce energy consumption throughout the drying process. This drying system has a drying chamber volume of around 5 m<sup>3</sup>. The heat utilized in the drying process was provided by a combination of three heat sources, 1) Heat pump (5.5 kW<sub>electric</sub>) 2) Electric heater (18.0 kW<sub>electric</sub>) and 3) Infrared (5.0 kW<sub>electric</sub>), they generated a total thermal supply capacity of around 29 kW for this drying system. The dryer can generate hot air with a maximum velocity of 3 m/s and a temperature of 120 °C. When integrated with infrared heating, the surface temperature of drying materials reached above 200 °C. According to the results of kaffir lime leaves and wood ear mushroom drying experiments, the hybrid drying system in this study obtained maximum efficiency of 55.88 % and 58.96 %, there was 56 % and 41% greater than utilizing simply electric heater as a heat source. The drying time was decreased by 69 % and 38 %, while the energy usage for drying both types of products was reduced by 36 % and 29 %, respectively. Based on this information, it is worthwhile to dry agricultural products with hybrid heat source drying system, because it saves time, increases daily production capacity, and lowers energy cost all at the same time. However, when this research investigated at the economic feasibility of employing a prototype hybrid drying system to manufacture dried kaffir lime leaves for commercial purposes, it was found that the project's payback period was around 461 days.

Keywords : drying process, agricultural, products, hybrid system, energy saving,  
energy conservation



## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ยาวุฑฒิ ซึ่งได้ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจนให้คำปรึกษาและแนะนำแก้ไขปรับปรุงวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริณู คงกระพันธ์ที่ได้รับเป็นประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และกรุณาให้ความรู้คำแนะนำต่าง ๆ รวมถึงคำปรึกษาตลอดจนให้ความดูแล และเอาใจใส่จนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ลุล่วงสำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวงและขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หยาดฝน ทนงการกิจ ซึ่งให้เกียรติเป็นที่ปรึกษาร่วมในการทำวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์รวมถึงตรวจแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์นี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่ให้ทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ใน "โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงาน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา" ครั้งนี้

ขอขอบคุณ "ทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ทุนศิษย์ก้นกุฏิ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปี 2562" และ "ทุนวิจัยบัณฑิตศึกษาด้านการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร จากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ประจำปี 2563" ที่ให้ทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบคุณครอบครัวและพี่ ๆ เพื่อน ๆ ทุกท่าน รวมถึงอาจารย์และบุคลากรวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่คอยให้ความช่วยเหลือสนับสนุนหลาย ๆ ด้านพร้อมทั้งคำแนะนำและเป็นกำลังใจจนทำให้สำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

พิบูลย์ สีคำ



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
ขอบเขตการวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร.....	5
กระบวนการอบแห้ง.....	5
ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง.....	7
จลนศาสตร์การอบแห้ง.....	11
ความชื้นของวัสดุ.....	13
ระบบอบแห้ง.....	15
ระบบอบแห้งแบบลมร้อน (Hot Air Dryer).....	15
ระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อน (Heat Pump Dryer).....	17
ระบบอบแห้งด้วยรังสีความร้อนจากอินฟราเรด (Infrared Dryer).....	21
ระบบอบแห้งแบบผสมผสาน (Hybrid Drying).....	22



การออกแบบเครื่องอบแห้ง.....	23
การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้ง.....	28
การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์.....	29
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
งานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบ การทดสอบระบบ และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้ง.....	30
ตรวจเอกสาร.....	37
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	40
การออกแบบและสร้างระบบอบแห้งแบบผสมผสานสำหรับผลิตผลทางการเกษตร.....	41
การเลือกอุปกรณ์และการสร้างเครื่องอบแห้ง.....	49
ขั้นตอนการทดลอง.....	61
การทดลองส่วนที่ 1 การศึกษาการแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	61
การทดลองส่วนที่ 2 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง.....	62
การทดลองส่วนที่ 3 การทดลองอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร.....	63
การเตรียมผลิตผลทางการเกษตรเพื่อการทดลองอบแห้ง.....	65
การประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์อบแห้ง.....	69
อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับงานวิจัย.....	72
บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลการทดลอง.....	81
ผลการวิจัยส่วนที่ 1 ผลการจำลองการทำงานของระบบอบแห้งแบบผสมผสานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	81
ผลการวิจัยส่วนที่ 2 ผลการทดสอบระบบอบแห้งแบบผสมผสาน.....	85
ผลการวัดค่าความเร็วลมเหนือถาดอบแห้ง.....	85
ผลการวัดค่าอุณหภูมิเหนือถาดอบแห้ง.....	87
ผลการทดสอบสมรรถนะการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด.....	91
ผลการวัดค่าการใช้พลังงานของระบบอบแห้ง.....	91

ผลการวิจัยทดลองส่วนที่ 3 การทดลองอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร .....	96
ผลการทดลองอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร .....	96
ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง.....	98
ผลความสัมพันธ์ของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาในการอบแห้ง .....	100
การวิเคราะห์ผลทางด้านเศรษฐศาสตร์.....	105
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ .....	107
ข้อเสนอแนะ .....	107
บรรณานุกรม.....	108
ภาคผนวก.....	111
ภาคผนวก ก แบบเครื่องอบแห้งแบบผสมผสานเพื่อการประหยัดพลังงาน สำหรับการอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร .....	112
ภาคผนวก ข ตัวอย่างข้อมูลจากการทดลองอบแห้งใบมะกรูด.....	121
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณ .....	125
สัญลักษณ์และอักษรย่อ .....	129
ประวัติผู้วิจัย.....	131

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สรุปสาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	37
ตารางที่ 2 รายละเอียดในการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบผสมผสาน .....	48
ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความเร็วลมกรณีไม่ติดตั้งชุดกระจายลมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	82
ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความเร็วลมกรณีติดตั้งชุดกระจายลมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	83
ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบค่าความเร็วลมเหนือถาดอบแห้ง .....	85
ตารางที่ 6 การใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่าง ๆ .....	96
ตารางที่ 7 ผลการทดลองอบแห้งใบมะกรูด .....	102
ตารางที่ 8 ผลการทดลองอบแห้งเห็ดหูหนูดำ .....	103
ตารางที่ 9 ข้อมูลทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการผลิตใบมะกรูดอบแห้งเชิงพาณิชย์ .....	106
ตารางที่ 10 ข้อมูลทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเห็ดหูหนูดำอบแห้งเชิงพาณิชย์ .....	106

## สารบัญรูป

	หน้า
ภาพที่ 1 แผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart) .....	8
ภาพที่ 2 การอ่านค่าสมบัติความชื้นจากแผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart) .....	10
ภาพที่ 3 การลดลงของความชื้นวัสดุ .....	12
ภาพที่ 4 การไหลแบบเวียนผ่านผิว (Concurrent Flow).....	16
ภาพที่ 5 การไหลแบบเวียนแทรก (Through Flow).....	16
ภาพที่ 6 การทำงานทั่วไปของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน.....	18
ภาพที่ 7 ประเภทของระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อน .....	19
ภาพที่ 8 ตำแหน่งในการพิจารณาสมบัติของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง .....	24
ภาพที่ 9 แผนผังของเครื่องอบความร้อนด้วยปั๊มระบบปิด .....	30
ภาพที่ 10 กราฟการอบแห้งของเห็ดด้วยลมร้อน (HA) การทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบ สูญญากาศ (MWV) และการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน (MWC) .....	32
ภาพที่ 11 แสดงการใช้พลังงานตามเวลาการอบแห้ง .....	33
ภาพที่ 12 เปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าและระยะเวลาการอบแห้ง .....	33
ภาพที่ 13 เปรียบเทียบการลดลงของความชื้นเฉลี่ยของเนื้อลำไยด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่าง ๆ .....	36
ภาพที่ 14 การพิจารณาสมบัติของอากาศ ณ จุดต่าง ๆ ของระบบอบแห้ง .....	42
ภาพที่ 15 สมบัติของอากาศแวดล้อม .....	43
ภาพที่ 16 สมบัติของอากาศก่อนอบแห้ง .....	44
ภาพที่ 17 สมบัติของอากาศหลังอบแห้ง.....	45
ภาพที่ 18 ปั๊มความร้อนขนาดกำลังการผลิตความร้อน (Heating capacity) 10.5 kW.....	50
ภาพที่ 19 เครื่องอัดไอ (Compressor) แบบก้านหอย .....	50
ภาพที่ 20 ส่วนควบแน่น (Condenser) .....	51

ภาพที่ 21 ส่วนทำระเหย (Evaporator).....	51
ภาพที่ 22 ฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาดกำลังไฟฟ้าจ่าย (Power input) รวม 14.5 kW.....	52
ภาพที่ 23 การติดตั้งหลอดอินฟราเรดไฟฟ้าพร้อมคอมสัทอนรังสี.....	53
ภาพที่ 24 ระบบท่อหมุนเวียนลมร้อน .....	54
ภาพที่ 25 ชุดกระจายลมร้อน.....	55
ภาพที่ 26 การติดตั้งพัดลมสำหรับหมุนเวียนอากาศภายในระบบอบแห้ง .....	55
ภาพที่ 27 ห้องอบแห้งที่ติดตั้งถาดหมุนจำนวน 10 ถาด .....	56
ภาพที่ 28 ถาดอบแห้งแบบวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 cm.....	57
ภาพที่ 29 เพลหมุนถาด.....	57
ภาพที่ 30 ระบบเพื่อทดปรับความเร็วรอบของถาดหมุน .....	58
ภาพที่ 31 เครื่องอบแห้งแบบผสมผสานด้านหน้า .....	58
ภาพที่ 32 เครื่องอบแห้งแบบผสมผสานด้านหลัง .....	59
ภาพที่ 33 เครื่องอบแห้งแบบผสมผสานด้านข้าง .....	59
ภาพที่ 34 เครื่องอบแห้งแบบผสมผสานด้านบน .....	60
ภาพที่ 35 ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งแบบผสมผสาน.....	60
ภาพที่ 36 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับ .....	61
ภาพที่ 37 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและความเร็วลมภายในห้องอบแห้ง .....	62
ภาพที่ 38 การติดตั้งประตูกันลมเพื่อจำลองสภาวะการทำงานจริงของเครื่องอบแห้ง.....	63
ภาพที่ 39 การเตรียมวัตถุดิบในการอบแห้ง.....	66
ภาพที่ 40 หาความชื้นเริ่มต้นของใบมะกรูดและเห็ดหูหนู.....	66
ภาพที่ 41 การเตรียมความพร้อมของเครื่องอบแห้ง .....	67
ภาพที่ 42 การจัดวางใบมะกรูดและเห็ดหูหนูด้านบนถาดอบแห้ง.....	67
ภาพที่ 43 ตำแหน่งการตรวจวัดและบันทึกข้อมูลการอบแห้ง .....	68
ภาพที่ 44 หน้าจอแสดงผลและควบคุมแบบ HMI (Human Machine Interface).....	69

ภาพที่ 45 การวัดค่าสีของผลิตภัณฑ์อบแห้งด้วยเครื่อง Spectrophotometer .....	70
ภาพที่ 46 การทดสอบคุณภาพด้านการคืนตัวของผลิตภัณฑ์อบแห้ง .....	71
ภาพที่ 47 ค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water Activity; aw).....	71
ภาพที่ 48 เครื่องอบแห้งแบบผสมผสานที่ใช้ในการทดสอบ .....	72
ภาพที่ 49 มอเตอร์ไฟฟ้า .....	72
ภาพที่ 50 เกียร์ทดรอบอัตราทด 1:60.....	73
ภาพที่ 51 ชุดอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์หมูนกอบแห้ง.....	73
ภาพที่ 52 ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ.....	74
ภาพที่ 53 อุปกรณ์ตรวจวัดการใช้พลังงาน .....	74
ภาพที่ 54 Current transformer.....	75
ภาพที่ 55 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ยี่ห้อ Uni-T รุ่น A12T .....	75
ภาพที่ 56 เครื่องวัดอัตราเร็วลม ยี่ห้อ Lutron รุ่น AM-4215SD แบบ Hot wire .....	76
ภาพที่ 57 เครื่องตรวจวัดและบันทึกอุณหภูมิแบบ Data logger.....	76
ภาพที่ 58 สายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple type k).....	77
ภาพที่ 59 ไบเมทรูคและเห็ดหูหนูดำที่ใช้ในการทดลองอบแห้ง .....	77
ภาพที่ 60 ถุงพอลิเอทิลีนสำหรับเก็บตัวอย่างที่ได้จากการทดลองอบแห้ง .....	78
ภาพที่ 61 เครื่องชั่งดิจิตอลยี่ห้อ Ohaus รุ่น Defender 2000 .....	78
ภาพที่ 62 เครื่องวิเคราะห์ความชื้นยี่ห้อ Ohaus รุ่น MB25 .....	79
ภาพที่ 63 เครื่องวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำอิสระ (aw) ยี่ห้อ AQUA LAB รุ่น AQUA LAB Series 3 TE .....	79
ภาพที่ 64 เครื่องวิเคราะห์ค่าสี ยี่ห้อ Hunter lab รุ่น Mini Scan XE Plus.....	80
ภาพที่ 65 ผลจำลองทางคอมพิวเตอร์ของความเร็วอากาศเหนือถาดอบแห้ง .....	82
ภาพที่ 66 ผลจำลองทางคอมพิวเตอร์ของความเร็วอากาศเหนือถาดอบแห้ง .....	83
ภาพที่ 67 ผลจำลองการกระจายตัวของอนุภาคน้ำที่ติดตั้งชุดกระจายลม .....	84



ภาพที่ 68 ผลจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิกรณีไม่ติดตั้งชุดกระจายลม.....	84
ภาพที่ 69 ความเร็วลมเหนือถาดอบแห้งกรณีไม่ติดตั้งช่องช่องกระจายลมร้อน.....	86
ภาพที่ 70 ความเร็วลมเหนือถาดอบแห้งกรณีไม่ติดตั้งช่องช่องกระจายลมร้อน.....	87
ภาพที่ 71 ผลการตรวจวัดค่าความเร็วลมกรณีไม่ติดตั้งชุดกระจายลมภายในห้องอบแห้ง .....	88
ภาพที่ 72 ผลการตรวจวัดค่าความเร็วลมกรณีติดตั้งชุดกระจายลมภายในห้องอบแห้ง .....	88
ภาพที่ 73 สมรรถนะสูงสุดในการผลิตลมร้อนโดยใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าและปั๊มความร้อน .....	90
ภาพที่ 74 สมรรถนะการผลิตลมร้อนโดยใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้า ปั๊มความร้อน และแบบผสม.....	90
ภาพที่ 75 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของพัดลมหมุนเวียนอากาศ.....	93
ภาพที่ 76 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบหมุนถาดบรรจุผลิตภัณฑ์อบแห้ง.....	93
ภาพที่ 77 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของปั๊มความร้อน (Heat Pump; HP).....	94
ภาพที่ 78 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Heater; HT).....	94
ภาพที่ 79 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของอินฟราเรด (Infrared; IR).....	95
ภาพที่ 80 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งกรณีอบแห้งใบมะกรูด.....	99
ภาพที่ 81 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งกรณีอบแห้งเห็ดหูหนูดำ.....	99
ภาพที่ 82 ความสัมพันธ์ของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาในการอบแห้ง .....	101
ภาพที่ 83 ความสัมพันธ์ของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาในการอบแห้ง .....	101



## บทที่ 1 บทนำ

### การออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบอบแห้งแบบผสมผสานเพื่อการประหยัดพลังงาน DESIGN CONSTRUCTION AND TEST OF A HYBRID DRYING SYSTEM FOR ENERGY SAVING

#### ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ประเทศไทยเป็นประเทศที่อุดมสมบูรณ์มีผลผลิตทางการเกษตรที่หลากหลาย เช่น ผัก ผลไม้ เครื่องเทศ และสมุนไพร เป็นต้น ผลผลิตทางการเกษตรของประเทศไทยนอกเหนือจากการค้าขายภายในประเทศแล้วยังเป็นที่นิยมของต่างประเทศ จึงมีการส่งออกสินค้าไปขายทั่วโลกในหลากหลายรูปแบบทั้งของสด อาหารแปรรูปแช่แข็ง ผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้ง และอื่น ๆ ทั้งนี้การขนส่งไปจำหน่ายยังต่างประเทศจะใช้ระยะเวลาอันยาวนานการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหาร จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่สามารถนอมและยืดอายุการจัดเก็บอาหารได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าทางการเกษตรที่มีจำนวนมากของประเทศไทย และปัจจุบันตลาดโลกมีแนวโน้มความต้องการสินค้าเกษตรที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ประเทศไทยตั้งเป้าหมายในการการส่งออกสินค้าประเภทผักผลไม้ และผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปในปี พ.ศ. 2562 ไว้มากกว่าสองพันล้านเหรียญสหรัฐ ซึ่งเป็นการขยายตัวประมาณ 3 % ของมูลค่าการส่งออกสินค้าทั้งหมด โดยผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งก็เป็นสินค้าที่ได้รับการส่งเสริมให้ส่งออกเพื่อจำหน่ายทั่วโลกเป็นอันดับต้น ๆ ในหมวดสินค้าเกษตรของประเทศไทย (สำนักงานนโยบายและยุทธศาสตร์การค้ากระทรวงพาณิชย์, 2562) จากความต้องการผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งที่เพิ่มมากขึ้นของตลาดโลกดังกล่าวข้างต้น ส่งผลให้ผู้ประกอบการต้องเพิ่มกำลังการผลิตเพื่อตอบสนองตลาดและต้องลดต้นทุนการผลิตเพื่อเพิ่มโอกาสในการแข่งขัน แต่ระบบอบแห้งที่ใช้กันโดยทั่วไปใช้แหล่งความร้อนจากเชื้อเพลิงฟอสซิลประเภทก๊าซหุงต้ม (LPG) ซึ่งมีราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและก่อมลพิษนำไปสู่ปัญหาโลกร้อน อีกทั้งตลาดผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปอบแห้งยุคใหม่มีเพียงมีความต้องการในเชิงปริมาณด้านเดียว แต่ผู้บริโภคกลับเลือกพิจารณาในด้านคุณภาพ สี สัน และคุณค่าทางอาหารของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ด้วย ทำให้ผู้ประกอบการในประเทศไทยจำต้องปรับตัวพัฒนาระบบอบแห้งเดิมให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น สามารถประหยัดพลังงานเพื่อลดต้นทุน และต้องคงสี สัน รวมถึงคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ไว้ให้ได้มากที่สุด จากเหตุผลดังกล่าวผู้ประกอบการจึงมีความจำเป็นต้องเลือกใช้เทคโนโลยีที่สามารถลดการใช้พลังงานในระบบอบแห้งผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะใช้เทคโนโลยีปั๊มความร้อน (Heat Pump) ที่มีจุดเด่นด้านประหยัดพลังงาน มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง ระบบปั๊มความร้อนโดยทั่วไปมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ตั้งแต่ 3 ขึ้นไป

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าว คือ ค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการทำความร้อนของปั๊มความร้อน หมายถึง เมื่อป้อนพลังงานไฟฟ้าให้กับปั๊มความร้อน 1 หน่วย ปั๊มความร้อนนั้นจะสามารถสร้างความร้อนได้ถึง 3 หน่วย ทั้งนี้พลังงานความร้อน 2 หน่วยที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการดึงความร้อนจากอากาศภายนอกโดยสารทำความเย็นที่ใช้ในระบบนั่นเอง ดังนั้นปั๊มความร้อนจึงเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อการผลิตความร้อนที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้เป็นอย่างดี แต่ขณะเดียวกันปั๊มความร้อนยังมีข้อจำกัดด้านการผลิตความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 80 °C เนื่องจากความดันของสารทำงานที่สูงเกินไปจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องเสริมสมรรถนะของปั๊มความร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric Heater) เพื่อช่วยเพิ่มอุณหภูมิให้กับลมร้อนหากมีความจำเป็นต้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอุณหภูมิสูงกว่าข้อจำกัดดังกล่าว อีกทั้งงานวิจัยนี้ยังเล็งเห็นถึงการเพิ่มศักยภาพในการผลิตโดยได้บูรณาการเทคโนโลยีการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared) ซึ่งมีอัตราการให้ความร้อนที่รวดเร็ว และสามารถสร้างอุณหภูมิที่ผิววัสดุได้โดยตรงเพื่อลดเขยอุณหภูมิลมร้อนที่ไม่สูงนักจากปั๊มความร้อน และเป็นที่ทราบกันดีว่าเทคโนโลยีการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดสามารถคงสีส่นของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าการอบแห้งแบบอื่น ๆ เนื่องจากใช้เวลาในการอบน้อยกว่าทำให้ผลิตภัณฑ์สัมผัสกับอากาศน้อยลงจึงลดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งมีส่วนทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์มีสีคล้ำ ทั้งนี้การบูรณาการเทคโนโลยีทั้งสามดังกล่าวจะสามารถตอบสนองความต้องการด้านการลดการใช้พลังงานและด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปอบแห้งเพื่อเป็นการส่งเสริมผู้ประกอบการขนาดเล็กถึงขนาดกลางหรือ SME ต่อไป

### วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบอบแห้งแบบผสมผสานสำหรับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร
2. เพื่อประเมินสมรรถนะทางด้านพลังงานของระบบอบแห้งแบบผสมผสาน
3. เพื่อประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบอบแห้งแบบผสมผสาน

### ขอบเขตการวิจัย

1. ออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบอบแห้งแบบผสมผสานที่ใช้แหล่งความร้อนจากปั๊มความร้อน (Heat Pump) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric Heater) และอินฟราเรด (Infrared)
2. ศึกษาการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ได้แก่ ใบมะกรูด และ เห็ดหูหนู
3. ศึกษาการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรด้วยลมร้อนที่มีอุณหภูมิในช่วง 50 °C ถึง 70 °C และความเร็วลมในช่วง 1 m/s ถึง 2 m/s โดยการใช้ปั๊มความร้อน (Heat Pump) และ ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric Heater) เป็นแหล่งความร้อน
4. ศึกษาการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรด้วยอินฟราเรดที่มีกำลังไฟฟ้าในช่วง 100 W ถึง 500 W
5. ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่
  - 1) ระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งด้วยแหล่งความร้อนชนิดต่าง ๆ ดังนี้
    - 1.1) ปั๊มความร้อน (Heat Pump)
    - 1.2) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric Heater)
    - 1.3) อินฟราเรด (Infrared)
    - 1.4) ปั๊มความร้อน (Heat Pump) + ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric Heater)
    - 1.5) ปั๊มความร้อน (Heat Pump) + อินฟราเรด (Infrared)
    - 1.6) ปั๊มความร้อน (Heat Pump) + ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric Heater) + อินฟราเรด (Infrared)
  - 2) สมบัติทางอาหารของผลิตภัณฑ์อบแห้ง ได้แก่ ความชื้น สี และคุณค่าทางอาหาร

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ระบบบอบแห้งแบบผสมผสานเพื่อการประหยัดพลังงาน
2. ได้ระบบบอบแห้งที่สามารถพัฒนาและประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอาหารประเภทต่าง ๆ

ต่อไป

3. ได้ทราบถึงตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบบอบแห้งแบบผสมผสาน
4. ลดการใช้พลังงานในระบบบอบแห้ง



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

การอบแห้งเป็นกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวที่สำคัญกระบวนการหนึ่งที่สามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตรได้ เนื่องจากความชื้นที่ลดลงจะหยุดยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ สำหรับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอบแห้ง และการออกแบบระบบอบแห้งแบบต่าง ๆ ที่นิยมใช้กันทั่วไปมีดังต่อไปนี้

#### กระบวนการอบแห้ง

กระบวนการอบแห้ง (Drying) คือกระบวนการลดความชื้นหรือน้ำที่มีอยู่ในวัสดุให้อยู่ในปริมาณที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา หรือนำน้ำออกจากวัสดุจนกระทั่งวัสดุนั้นไม่มีความชื้นหรือเข้าใกล้มวลแห้ง ถ้ากระบวนการทำแห้งวัสดุเป็นการระเหยน้ำโดยใช้ความร้อนจะเรียกว่า การอบแห้งด้วยความร้อน (Thermal Drying) ซึ่งเกิดจากกระบวนการ 2 กระบวนการร่วมกันดังนี้

- 1) กระบวนการถ่ายเทพลังงาน คือ การถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อมไปสู่วัสดุขึ้น
- 2) กระบวนการถ่ายเทความชื้น คือ การที่ความชื้นถ่ายเทจากภายในวัสดุไปยังผิวของวัสดุขึ้น และถ่ายเทออกสู่สิ่งแวดล้อม (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2550)

ความร้อนที่ถ่ายเทจากแหล่งพลังงานความร้อนไปสู่วัสดุขึ้นอาจเกิดจากการพาความร้อน (Heat Convection) การนำความร้อน (Heat Conduction) และการแผ่รังสีความร้อน (Heat Radiation) วิธีใดวิธีหนึ่งหรือหลายวิธีร่วมกัน การนำน้ำในรูปแบบไอน้ำออกจากผิววัสดุขึ้นสู่อากาศ แวดล้อมจะขึ้นกับอุณหภูมิ ความดัน และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ สำหรับการเคลื่อนตัวของความชื้นจากภายในวัสดุขึ้นออกมายังผิวของวัสดุขึ้นจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางกายภาพของวัสดุขึ้น อุณหภูมิ และปริมาณความชื้นของวัสดุนั้น ๆ โดยทั่วไปการเคลื่อนตัวของความชื้นจากภายในของวัสดุขึ้นออกมาที่ผิวของวัสดุเกิดจากกลไกหนึ่งหรือหลายอย่างพร้อมกันที่สำคัญมีดังนี้

- การแพร่ของของเหลว (Liquid diffusion) เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของวัสดุขึ้นมีค่าต่ำกว่าจุดเดือดของของเหลวหรือน้ำภายในวัสดุขึ้น
- การแพร่ของไอน้ำ (Vapour diffusion) เกิดขึ้นเมื่อน้ำหรือความชื้นระเหยกลายเป็นไอภายในวัสดุ

- ความแตกต่างของความดันไฮโดรสแตติกส์ (Hydrostatic pressure) เกิดขึ้นเมื่ออัตราการระเหยของน้ำภายในวัสดุชิ้นมีมากกว่าอัตราการถ่ายเทมวลของไอน้ำที่ผิววัสดุขึ้นไปสู่อากาศแวดล้อม เนื่องจากโครงสร้างทางกายภาพของวัสดุชิ้นอาจเปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการอบแห้ง ดังนั้นกลไกการถ่ายเทความชื้นจึงอาจเปลี่ยนแปลงระหว่างการอบแห้งได้

การอบแห้งวัสดุประเภทอาหารเพื่อให้สามารถเก็บรักษาไว้ได้นานที่อุณหภูมิห้องโดยไม่เน่าเสียจะต้องลดความชื้นของอาหารนั้นให้มีค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water Activity; aw) ต่ำกว่า 0.6 และมีค่าความชื้นฐานเปียกต่ำกว่า 15 %wb เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ เช่น เชื้อรา ยีสต์ และแบคทีเรีย เป็นต้น ซึ่งเชื้อเหล่านี้เป็นสาเหตุทำให้อาหารเสื่อมสภาพหรือเน่าเสีย ทั้งนี้ควรใช้บรรจุกฎบัตรรวมทั้งการเลือกสถานที่ในการเก็บรักษาที่เหมาะสม โดยสถานที่เก็บรักษาควรมีความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) ต่ำเพื่อป้องกันการดูดน้ำกลับเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ เนื่องจากน้ำเป็นส่วนประกอบสำคัญของอาหารสด ซึ่งมีผลโดยตรงต่ออายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ (ประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 144, 2535)





## ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง

สภาวะการอบแห้งสามารถเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากการดำเนินงานและการควบคุมสภาพห้องอบแห้งที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง (Drying rate) ได้แก่ อุณหภูมิของลมร้อน ความชื้น ความสัมพันธ์ของลมร้อน และปริมาณของวัสดุอบแห้งต่อหน่วยพื้นที่ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ เช่น การหมุนวนของลมร้อน การกวนวัสดุ การหมุนถาดอบแห้ง การแบ่งขนาดวัสดุอบแห้ง เป็นต้น เนื่องจากระบวนการอบแห้งทั่วไปจะใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการพาความร้อนเข้าสู่วัตถุดิบเพื่อระเหยความชื้นออกจากวัสดุอบแห้ง ดังนั้นความชื้นในลมร้อนที่ใช้จึงเป็นตัวแปรหนึ่งที่ต้องพิจารณาเนื่องจากลมร้อนที่มีความชื้นในตัวเองสูงจะมีความสามารถในการพาความชื้นออกจากวัสดุได้น้อยกว่าลมร้อนที่มีความชื้นต่ำ (ณรัฐฉวี ดุษฎี, 2559) โดยคุณสมบัติของอากาศจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

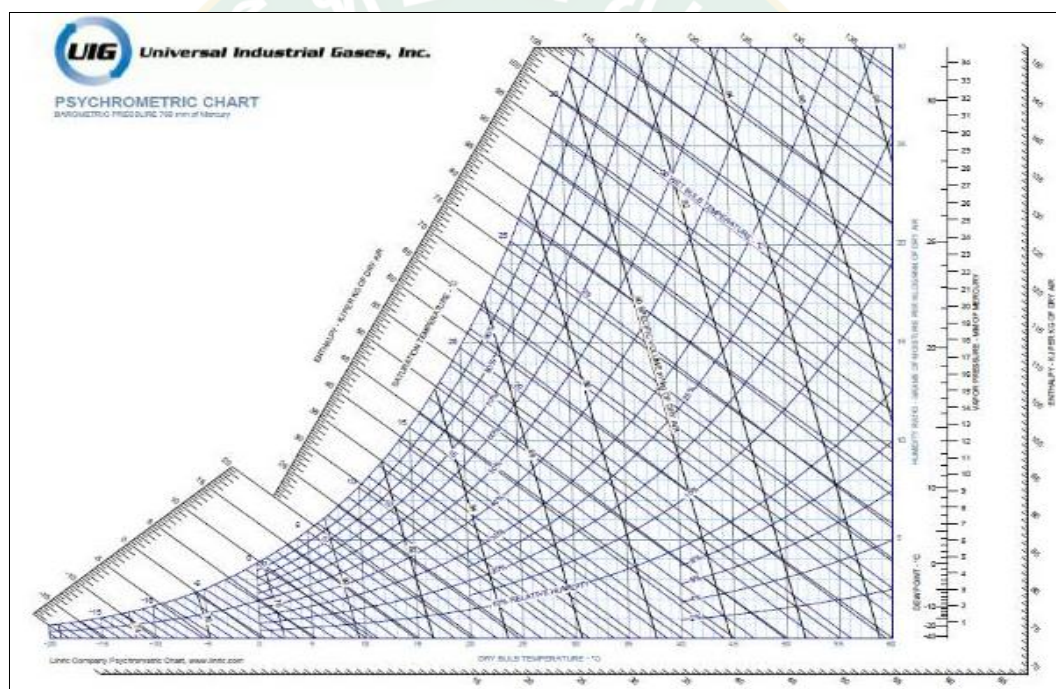
- ความดันไอ (Vapor Pressure;  $P_v$ ) คือ ส่วนของความดันย่อยที่กระทำต่อโมเลกุลของไอน้ำในอากาศชื้น ถ้าอากาศนี้อิ่มตัวด้วยไอน้ำจะเรียกความดันไอชนิดนี้ว่าความดันไออิ่มตัว ( $P_{vs}$ ) มีหน่วยเป็น kPa
- ความชื้นสัมพัทธ์ ((Relative Humidity, RH) คือ อัตราส่วนระหว่างความดันไอน้ำในอากาศต่อความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน มีหน่วยเป็น %RH
- เอนทัลปี (Enthalpy;  $h$ ) คือ ปริมาณความร้อนของอากาศชื้นต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศมีหน่วยเป็น kJ/kg
- ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume;  $V$ ) คือ ปริมาตรของอากาศต่อหนึ่งน้ำหนักของอากาศแห้งมีหน่วยเป็น  $m^3/kg$
- อัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio;  $w$ ) คือ ปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศต่อหนึ่งหน่วยมวล มีหน่วยเป็น  $kg_{water}/kg_{dry\ air}$  โดยค่าอัตราส่วนความชื้นนี้จะบอกถึงปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศในขณะใดขณะหนึ่ง ซึ่งค่านี้จะมีค่าสำคัญที่จะบอกว่าอากาศนั้น ๆ จะสามารถรับน้ำได้อีกเท่าใด
- อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry bulb temperature;  $T_{db}$ ) คือ อุณหภูมิที่อ่านค่าได้จากเทอร์โมมิเตอร์โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงอุณหภูมิจะหมายถึงอุณหภูมิกระเปาะแห้ง มีหน่วยเป็น  $^{\circ}C$
- อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature;  $T_{wb}$ ) คือ อุณหภูมิที่อ่านค่าได้จากเทอร์โมมิเตอร์ที่มีกระเปาะหุ้มด้วยสำลีหรือผ้าชุมน้ำ มีหน่วยเป็น  $^{\circ}C$  อุณหภูมิกระเปาะเปียกมักจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งเมื่อวัดในเวลาเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อน้ำระเหยจากผ้าสู่บรรยากาศจะดึงเอาความร้อนไปด้วยทำให้ผ้าที่หุ้มกระเปาะอยู่เย็นตัวลง สำหรับในกรณีที่อากาศมีไอน้ำ



น้ำอิ่มตัวแล้วหรือความชื้นสัมพัทธ์ 100 %RH น้ำจะไม่สามารถระเหยจากผ้าได้ทำให้ค่าอุณหภูมิ กระเปาะเปียกที่อ่านได้จะเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะแห้ง

- อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature;  $T_{dp}$ ) คือ อุณหภูมิที่ไอน้ำในอากาศชื้นเริ่มควบแน่นเป็นหยดน้ำ มีหน่วยเป็น °C

การวิเคราะห์สมบัติของอากาศชื้นในทางปฏิบัติสามารถอ่านค่าสมบัติต่าง ๆ ได้จากแผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของสมบัติอากาศ 7 ค่า ได้แก่ 1) อุณหภูมิกระเปาะแห้ง 2) อุณหภูมิกระเปาะเปียก 3) อุณหภูมิจุดน้ำค้าง 4) อัตราส่วนความชื้น 5) ความชื้นสัมพัทธ์ 6) ปริมาตรจำเพาะ และ 7) เอนทัลปี โดยตัวอย่างของแผนภูมิอากาศชื้นแสดงดังภาพที่ 1 แผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart) (Brooker D.B. (1992))



ภาพที่ 1 แผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart)

ที่มา: Brooker D.B. (1992)

จากภาพที่ 1 การอ่านค่าสมบัติอากาศชื้นจากแผนภูมิอากาศชื้นจำเป็นต้องทราบค่าสมบัติอากาศชื้นเริ่มต้น 2 ค่า จากสมบัติอากาศชื้น 7 ค่า แล้วทำการลากเส้นลงบนแผนภูมิจนเส้นทั้งสองตัดกัน จากจุดตัดของเส้นดังกล่าว (ภาพที่ 2) ที่ตำแหน่ง ก จะสามารถหาค่าสมบัติอื่น ๆ ได้โดยลากเส้นจากจุดตัดไปสู่แกนที่ระบุค่าสมบัติอากาศชื้นค่าอื่น ๆ ที่ต้องการบนแผนภูมิอากาศชื้นได้ดังนี้

- อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry bulb temperature;  $T_{db}$ ) การอ่านค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งจากแผนภูมิอากาศชื้นนั้นได้จากการเส้นตรงในแนวดิ่งโดยตัวเลขของอุณหภูมิจะอยู่ด้านล่างของแผนภูมิ ดังภาพที่ 2 (ก)

- อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature;  $T_{dp}$ ) จากแผนภูมิอากาศชื้นจะอ่านค่าได้จากเส้นตรงในแนวนอน ตัวเลขที่แสดงใช้ตัวเลขเดียวกันกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกที่แสดงอยู่บนส่วนโค้งด้านซ้ายของแผนภูมิหรือเส้นความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 % ดังภาพที่ 2 (ข)

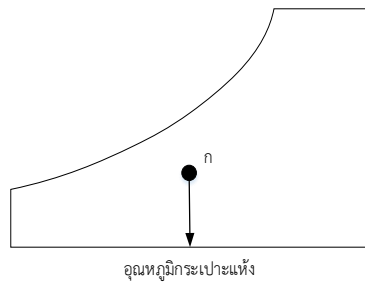
- อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature;  $T_{wb}$ ) จากแผนภูมิอากาศชื้นจะอ่านค่าได้จากเส้นที่ลากขนานกับเส้นอุณหภูมิกระเปาะแห้งไปตัดเส้นความชื้นสัมพัทธ์ 100 %RH แล้วลากลงตั้งฉากกับแกนนอนแล้วอ่านค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกจากแกนนอนของแผนภูมิ ดังภาพที่ 2 (ค)

- เอนทัลปี (Enthalpy;  $h$ ) จากแผนภูมิอากาศชื้นจะใช้เส้นที่ลากขนานกับเส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียกไปตัดเส้นเอนทัลปี ดังภาพที่ 2 (ง)

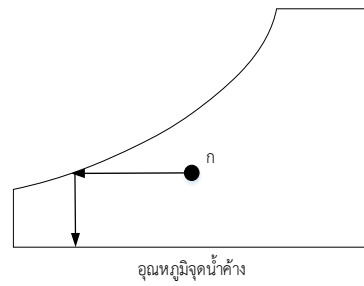
- อัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio;  $w$ ) จากแผนภูมิอากาศชื้นจะอ่านได้จากเส้นที่ลากขนานกับแกนราบให้ไปตัดเส้นอัตราส่วนความชื้นที่แกนอัตราส่วนความชื้นทางขวามือ อ่านค่าอัตราส่วนความชื้นจากแกนอัตราส่วนความชื้น ดังภาพที่ 2 (จ)

- ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume;  $V$ ) จากแผนภูมิอากาศชื้นจะอ่านได้จากเส้นที่ลากขนานกับเส้นปริมาตรจำเพาะผ่านจุดที่กำหนด การอ่านค่าปริมาตรจำเพาะจะใช้วิธีการประมาณค่าจากตำแหน่งระหว่างเส้นปริมาตรจำเพาะ 2 เส้น ดังภาพที่ 2 (ฉ)

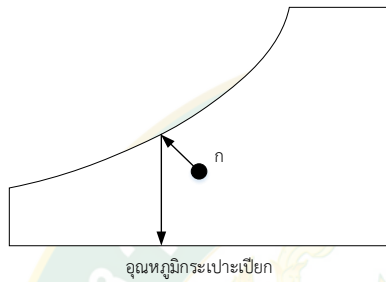
- ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) จากแผนภูมิอากาศชื้นจะอ่านได้จากเส้นที่ลากขนานกับเส้นความชื้นสัมพัทธ์ผ่านจุดที่กำหนดการอ่านค่าความชื้นสัมพัทธ์จะใช้วิธีประมาณค่าจากตำแหน่งระหว่างเส้นความชื้นสัมพัทธ์ 2 เส้นเช่นเดียวกับการอ่านค่าปริมาตรจำเพาะ ดังภาพที่ 2 (ช)



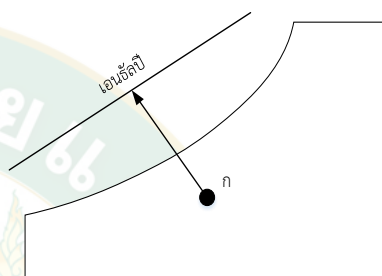
(ก) การอ่านค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้ง



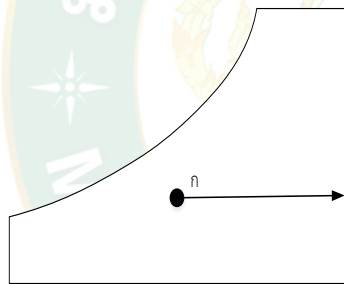
(ข) การอ่านค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง



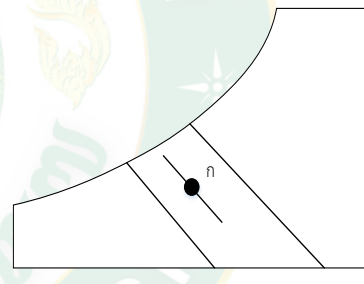
(ค) การอ่านค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก



(ง) การอ่านค่าเอนทัลปี



(จ) การอ่านค่าอัตราส่วนความชื้น



(ฉ) การอ่านค่าปริมาตรจำเพาะ



(ซ) การอ่านค่าความชื้นสัมพัทธ์

ภาพที่ 2 การอ่านค่าสมบัติความชื้นจากแผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart)

ที่มา: Brooker D.B. (1992)

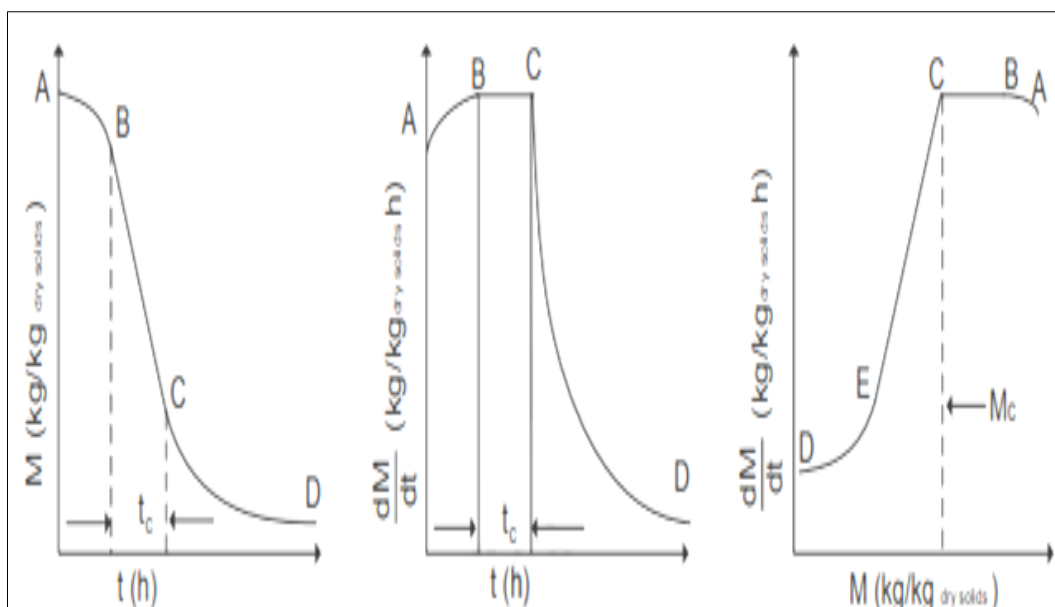
### จลนศาสตร์การอบแห้ง

การอบแห้งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุเพื่อไล่ความชื้นออกด้วยการระเหย ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ อัตราการไหลของอากาศ และ ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง โดยพฤติกรรมการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการพา ความชื้นออกจากวัสดุเมื่อสมมติให้ อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของอากาศเหนือผิวของวัสดุ อบแห้งมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการและมีการถ่ายเทความร้อนสู่วัสดุโดยการพาความร้อน การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุที่เกิดขึ้นตลอดกระบวนการอบแห้งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังภาพที่ 3 โดยมีรายละเอียดดังนี้ (สมชาติ โสภณธรรณฤทธิ์, 2540)

ช่วง A-B คือ ช่วงสภาวะที่ผิวของวัสดุเข้าสู่สมดุลกับอากาศเกิดขึ้นเมื่อเริ่มทำการอบแห้ง ความร้อนจากลมร้อนจะถ่ายเทสู่ผิววัสดุจนถึงค่า ๆ หนึ่งซึ่งมีความสมดุลระหว่างผิววัสดุกับอากาศ

ช่วง B-C คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period of drying) ช่วงนี้ผิววัสดุ ยังคงชุ่มไปด้วยน้ำซึ่งจะถูกนำออกจากผิววัสดุด้วยการระเหยซึ่งอัตราการอบแห้งในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับ อัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังผิวของการอบแห้ง อัตราการถ่ายเทความร้อนมีความสมดุลกับอัตราการ ถ่ายเทความร้อนจึงทำให้อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุอบแห้งคงที่ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก ของอากาศอบแห้ง

ช่วง C-D คือ ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period of drying) เนื่องจาก ปริมาณความชื้นภายในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่มาสู่ผิวด้านนอกลดลง ณ จุด C ในภาพที่ 3 อัตราการอบแห้ง จะเริ่มลดลง ความชื้นของวัสดุที่จุดนี้ เรียกว่า ความชื้นวิกฤต เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อไป อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการ โดยปกติช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ประกอบไปด้วยสองช่วงย่อย คือ 1) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงส่วนที่ 1 (C-E) ช่วงนี้ผิวของวัสดุจะ แห้งและอัตราการอบแห้งลดลง 2) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงส่วนที่ 2 (E-D) ช่วงนี้ระนาบของการ ระเหยจะเคลื่อนตัวเข้าสู่ภายในเนื้อวัสดุ



ภาพที่ 3 การลดลงของความชื้นวัสดุ

ที่มา: (Bala, 1997)

อัตราการอบแห้งวัสดุที่ใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการส่งผ่านความร้อนจะเกิดขึ้นช้าหรือเร็วขึ้น มีปัจจัยที่สำคัญดังนี้

1. ลักษณะทางธรรมชาติของวัสดุเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยถ้าสภาพทางธรรมชาติของวัสดุเอื้ออำนวยต่อการส่งผ่านความร้อนไปยังโมเลกุลของน้ำภายในเนื้อวัสดุ และเอื้ออำนวยต่อการเคลื่อนที่ของไอน้ำออกจากวัสดุ เช่น วัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน โมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุสามารถเคลื่อนที่ออกมาได้ง่ายทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

2. ขนาดและรูปร่างของวัสดุ วัสดุที่มีขนาดและรูปร่างที่ส่งผลต่ออัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรมากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนให้ทั่วชิ้นวัสดุทำให้การระเหยน้ำออกจากเนื้อวัสดุดีขึ้นอัตราการอบแห้งจึงเร็วขึ้น

3. ปริมาณและการจัดเรียงวัสดุ วัสดุที่นำมาจัดเรียงซ้อนกันหลาย ๆ ชั้นในถาดทำให้ปริมาณของวัสดุต่อถาดมากเกินไปจะทำให้วัสดุที่อยู่บริเวณตรงกลางได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงทำให้วัสดุบริเวณนั้น ๆ มีอัตราการอบแห้งที่ช้า การจัดเรียงที่เหมาะสมควรทำการจัดเรียงเป็นแบบชั้นบางเพื่อให้วัสดุได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ

4. อุณหภูมิของลมร้อน เมื่ออุณหภูมิของลมร้อนสูงขึ้นอัตราการอบแห้งจะเร็วขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของลมร้อนกับวัสดุที่มีค่ามากทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสู่น้ำภายในเนื้อวัสดุสูงขึ้นทำให้น้ำในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่ และระเหยได้เร็วขึ้น ถึงแม้ว่าอุณหภูมิที่สูงจะทำให้อัตราการ



อบแห้งเร็วขึ้นแต่ก็ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ในการอบแห้งด้วย เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงอาจทำให้วัสดุบิดงอหรือไหม้ได้

5. ความชื้นของลมร้อน หากความชื้นของลมร้อน มีค่ามากจะมีผลให้การเคลื่อนที่ของน้ำและการระเหยของไอน้ำออกจากเนื้อวัสดุได้ยาก

6. ความดันของบรรยากาศ การอบแห้งโดยทั่วไปมักทำที่ความดันบรรยากาศ ถ้าหากมีการลดความดันของบรรยากาศในขณะที่ทำการอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากจะทำให้จุดเดือดของน้ำลดลง ซึ่งการอบแห้งประเภทนี้เหมาะกับการอบแห้งวัสดุที่เสื่อมคุณภาพได้ง่ายเนื่องจากความร้อน เครื่องอบแห้งมีการลดความดันในสภาวะการอบแห้ง ได้แก่ เครื่องอบแห้งสุญญากาศ (Vacuum Drier)

7. ความเร็วลมร้อน ถ้าความเร็วของลมร้อนมีค่ามากจะทำให้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าวัสดุได้ดีขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

8. สมบัติเชิงความร้อนและฟิสิกส์ของวัสดุ สมบัติเชิงความร้อนของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้ง ได้แก่ ความร้อนจำเพาะ สภาพการนำความร้อน และการแพร่ความร้อน ส่วนสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นปรากฏ และสัดส่วนช่องว่างอากาศในกองวัสดุ

ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อพลังงานที่ใช้การอบแห้ง คือ สมบัติและประเภทของความชื้นวัสดุโดยปกติความชื้นที่อยู่ในวัสดุจะประกอบด้วย ความชื้นรอบผิว (Boundary Moisture) และความชื้นในเนื้อวัสดุ (Absorbed Moisture) ซึ่งความชื้นรอบผิวจะเป็นความชื้นที่ถูกดึงออกไปได้ง่ายนอกจากนี้ ยังมีความชื้นของบรรยากาศ (Relative Humidity) ซึ่งหากมีค่ามากจะส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้น โดยปกติในการอบแห้งวัสดุใด ๆ ความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่ยังคงเหลืออยู่ในเนื้อวัสดุ จะสมดุลกับความชื้นของลมร้อนที่ใช้ในการอบ กล่าวคือความชื้นในวัสดุจะไม่ลดต่ำกว่านี้อีกแม้ว่าจะใช้เวลานานเท่าใดก็ตามเราเรียกความชื้น ณ จุดนี้ว่า ค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content)

### ความชื้นของวัสดุ

ความชื้นของวัสดุแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1) ปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบของเซลล์หรือเนื้อเยื่อ ความชื้นประเภทนี้จะมีลักษณะเป็นพันธะทางเคมี โดยทั่วไปจะไม่กล่าวถึงความชื้นในลักษณะนี้เนื่องจากความชื้นดังกล่าวจะถูกพิจารณาเป็นสารเนื้อเดียวกับวัสดุ และ 2) ปริมาณน้ำอิสระและปริมาณน้ำที่ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำและผิวของวัสดุ ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่เกาะกันอยู่อย่างหลวม ๆ

การตรวจวัดความชื้น คือ การวัดปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเทียบกับมวลของวัสดุโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ 1) การคำนวณความชื้นเทียบกับมวลของวัสดุชื้น เรียกว่า ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis) เป็นความชื้นที่นิยมระบุในการค้าหรือการซื้อขายผลผลิตทางการเกษตร และ 2) การคำนวณความชื้นเทียบกับมวลของวัสดุแห้ง เรียกว่า ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis) ซึ่งนิยมใช้ในเอกสารวิชาการเนื่องจากมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในการอบแห้งจึงง่ายต่อการใช้อ้างอิง ซึ่งความชื้นทั้งสองมาตรฐานและปริมาณน้ำที่ต้องการระเหยจากวัสดุสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 ถึง 3 ตามลำดับ (เกรียงไกร ศิวเดชสกุล และคณะ, 2554)

ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis)

$$M_W = \frac{W - D}{W} \times 100\%$$

สมการที่ 1

ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis)

$$M_D = \frac{W - D}{D} \times 100\%$$

สมการที่ 2

เมื่อ	$M_W$	คือ	ความชื้นมาตรฐานเปียก (%wb)
	$M_D$	คือ	ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%db)
	$W$	คือ	มวลของวัสดุ (kg)
	$D$	คือ	มวลของวัสดุแห้ง (kg)

ปริมาณน้ำที่ต้องการระเหยจากวัสดุ

$$m_w = m - d$$

สมการที่ 3

เมื่อ	$m_w$	คือ	ปริมาณน้ำที่ต้องการระเหยจากวัสดุ (kg)
	$m$	คือ	มวลของวัสดุก่อนการอบแห้ง (kg)
	$d$	คือ	มวลของวัสดุหลังการอบแห้ง (kg)

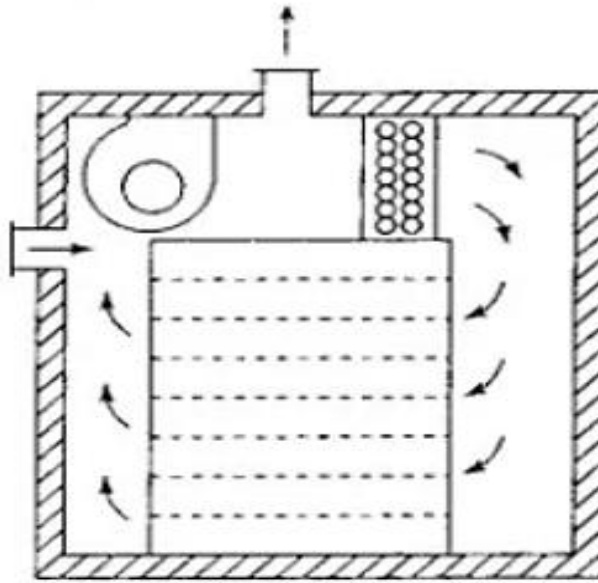


## ระบบอบแห้ง

ระบบอบแห้งที่มีใช้กันในปัจจุบันมีมากมายหลายแบบ เช่น ระบบอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze Dryer) ระบบอบแห้งแบบลมร้อน (Hot Air Dryer) ระบบอบแห้งแบบไมโครเวฟ (Microwave Dryer) ระบบอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray Dryer) ระบบอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidize Bed Dryer) และระบบอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum Dryer) เป็นต้น ซึ่งระบบอบแห้งแต่ละชนิดจะมีข้อดี ข้อเสีย และการใช้งานที่แตกต่างกัน โดยงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบอบแห้งแบบลมร้อนที่ผสมผสานเทคนิคการสร้างความร้อนด้วยปั๊มความร้อน (Heat Pump) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ประหยัดพลังงานร่วมกับอุปกรณ์สร้างรังสีอินฟราเรด (Infrared) เพื่อช่วยในการเพิ่มอัตราการให้ความร้อน (Heating Rate) โดยระบบที่จะทำการศึกษามีรายละเอียดดังต่อไปนี้

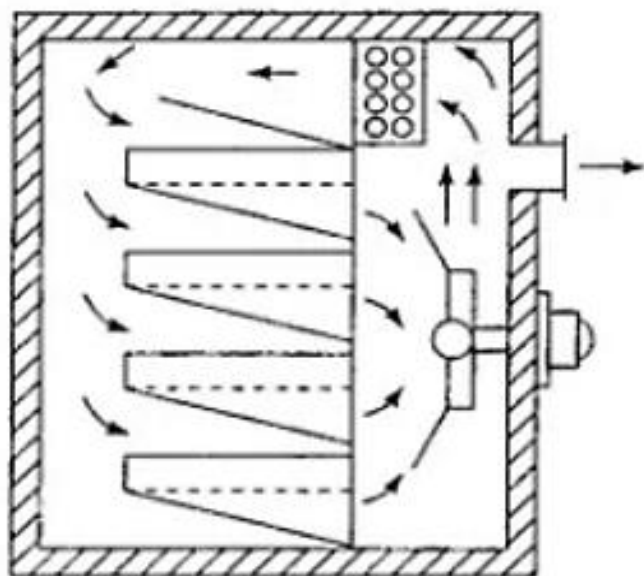
### ระบบอบแห้งแบบลมร้อน (Hot Air Dryer)

ระบบอบแห้งแบบลมร้อน คือ ระบบอบแห้งที่ใช้หลักการพาความร้อน (Heat Convection) ด้วยลมร้อนที่ไหลวนภายในห้องอบแห้งในการถ่ายเทความร้อนสู่ผิวของวัตถุดิบเพื่อการระเหยน้ำออก โดยทั่วไปอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งจะอยู่ในช่วง  $50\text{ }^{\circ}\text{C} - 80\text{ }^{\circ}\text{C}$  ความเร็วลมอยู่ในช่วง  $1\text{ m/s} - 2\text{ m/s}$  และทำการควบคุมความชื้นของอากาศภายในห้องอบแห้งให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ หากพิจารณาจากลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุดิบกับลมร้อนที่เคลื่อนที่ภายในห้องอบแห้งจะสามารถจำแนกลักษณะการไหลของลมร้อนได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ 1) การไหลแบบเวียนผ่านผิว (Concurrent Flow) คือ การอบแห้งที่ควบคุมการไหลของลมร้อนให้ไหลขนานกับผิวของวัสดุอบแห้ง ดังภาพที่ 4 ลมร้อนจะไหลผ่านผิวด้านบน ผิวด้านล่าง หรือผ่านผิวทั้งสองด้านของผลิตภัณฑ์พร้อม ๆ กัน ตัวอย่างการอบแห้งประเภทนี้ได้แก่ การอบแห้งแบบชั้นบาง ซึ่งมีการจัดเรียงวัสดุอบแห้งที่หันเป็นชั้นบาง ๆ ในอัตราที่วางขนานกับทิศทางการไหลของลมร้อน และ 2) การไหลแบบเวียนแทรก (Through Flow) คือ การอบแห้งที่ควบคุมการไหลของลมร้อนให้ไหลแทรกผ่านชั้นของวัสดุอบแห้ง ดังภาพที่ 5 ลมร้อนอาจเคลื่อนที่จากผิวด้านบนแทรกสู่ผิวด้านล่างของชั้นวัสดุอบแห้งแล้วผ่านตะแกรงออกไป หรือในทางกลับกันลมร้อนอาจเคลื่อนที่จากผิวด้านล่างแทรกสู่ผิวด้านบนก็ได้เช่นกัน



ภาพที่ 4 การไหลแบบเวียนผ่านผิว (Concurrent Flow)

ที่มา: (การศึกษากระบวนการอบแห้งด้วยระบบลมร้อนแบบไหลเวียน, 2560)



ภาพที่ 5 การไหลแบบเวียนแทรก (Through Flow)

ที่มา: (การศึกษากระบวนการอบแห้งด้วยระบบลมร้อนแบบไหลเวียน, 2560 )

การสมดุลความร้อนในกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อน สามารถคำนวณจากการสมดุลพลังงานของอากาศกับความชื้นของวัสดุ โดยกำหนดให้ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำจากวัสดุขึ้นมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงความร้อนสัมผัสของอากาศ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 4 (Brooker D.B., 1992)

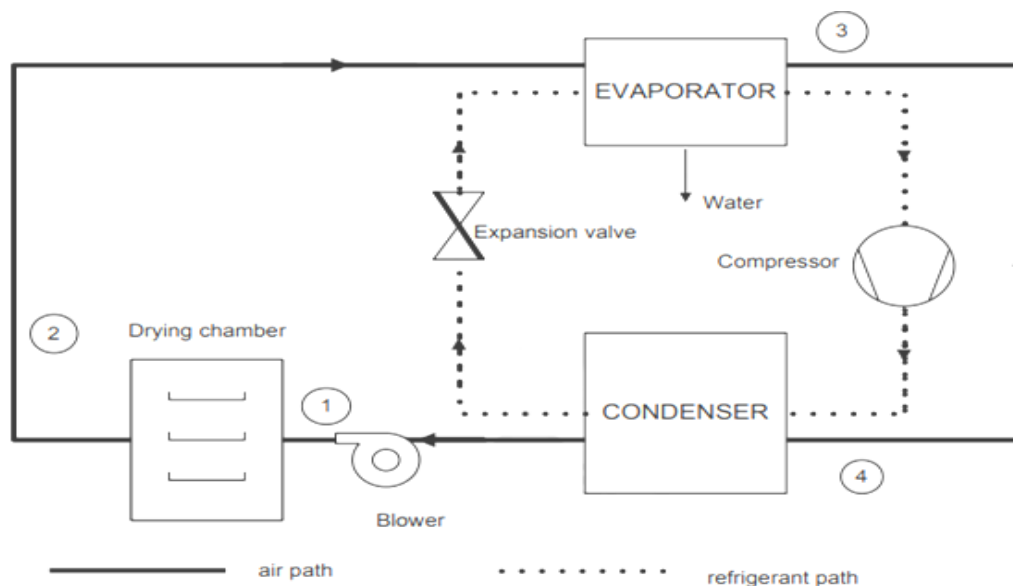
$$m_w h_{fg} = \dot{m}_a c_a (T_{ai} - T_{af}) t$$

สมการที่ 4

เมื่อ	$m_w$	คือ	มวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ (kg)
	$h_{fg}$	คือ	ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (kJ/kg)
	$\dot{m}_a$	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)

### ระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อน (Heat Pump Dryer)

ระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อน มีหลักการทำงาน คือ ลมร้อนจะไหลเข้าสู่ห้องอบแห้ง ณ ตำแหน่งที่ 1 เพื่อระเหยความชื้นจากวัสดุจนแปรสภาพเป็นลมร้อน ชื้นและระบายออกจากห้องอบแห้ง ณ ตำแหน่ง 2 และแล้วไหลเข้าสู่เครื่องทำระเหย (Evaporator) เพื่อทำการลดความชื้นโดยการควบแน่นน้ำออกจากอากาศจนแปรสภาพเป็นอากาศเย็นและแห้ง จากนั้นอากาศที่ผ่านการลดความชื้นไหลผ่านและรับความร้อนจากเครื่องควบแน่น (Condenser) แล้ววนกลับเข้าสู่ห้องอบแห้ง เพื่อระเหยความชื้นจากวัสดุอบแห้งต่อไปเป็นวัฏจักร แสดงดังภาพที่ 6 โดยระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่



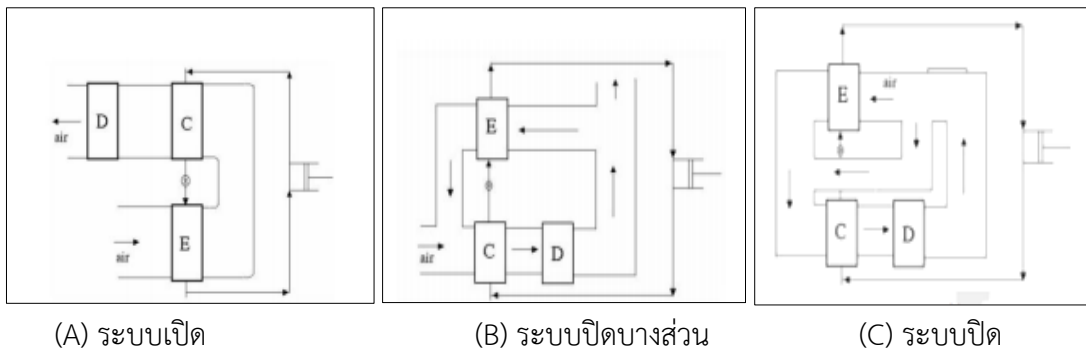
ภาพที่ 6 การทำงานทั่วไปของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

ที่มา : Chua et al., (2000)

1. การอบแห้งระบบเปิด (Open system) มีหลักการคือ เมื่ออากาศร้อนที่มีความชื้นต่ำถูกนำไปใช้อบแห้งแล้วทำให้มีความชื้นสูงขึ้นแล้วอากาศนี้จะถูกปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศทั้งหมด ซึ่งการอบแห้งระบบเปิดนี้จะมีการใช้ประโยชน์จากระบบปั๊มความร้อนในการอุ่นอากาศเพียงอย่างเดียวหรืออาจมีการลดความชื้นอากาศก่อนปล่อยสู่บรรยากาศก็ได้ลักษณะการอบแห้งระบบเปิดแสดงในภาพที่ 7 (A)

2. การอบแห้งระบบปิดบางส่วน (Partial closed system) มีหลักการคือ เมื่อลมร้อนที่มีความชื้นต่ำถูกนำไปใช้อบแห้งแล้วจะถูกปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศบางส่วน โดยส่วนที่เหลือจะถูกลดความชื้นก่อนนำกลับมาใช้ผสมกับอากาศใหม่ การอบแห้งรูปแบบนี้จึงมีการใช้ประโยชน์จากปั๊มความร้อนทั้งการอุ่นอากาศและลดความชื้นอากาศลักษณะการอบแห้งระบบปิดบางส่วนแสดงในภาพที่ 7 (B)

3. การอบแห้งระบบปิด (Closed system) การอบแห้งรูปแบบนี้จะนำอากาศที่ผ่านการอบแห้งแล้วกลับมาใช้ใหม่ทั้งหมด โดยอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือส่วนแรกจะถูกนำไปลดความชื้นที่เครื่องทำระเหย อีกส่วนหนึ่งจะนำมาผสมกับอากาศส่วนแรกที่ผ่านการลดความชื้นแล้วการอบแห้งระบบปิดนี้จึงมีการใช้ประโยชน์จากระบบปั๊มความร้อนทั้งการอุ่นอากาศและการลดความชื้นลักษณะการอบแห้งระบบปิดแสดงในภาพที่ 7 (C)



ภาพที่ 7 ประเภทของระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

ที่มา: Chua et al., (2000)

เนื่องจากระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนเป็นการรวมเอาส่วนประกอบหลักสองส่วนเข้าด้วยกัน คือ ส่วนอบแห้งกับระบบปั๊มความร้อน ดังนั้นการออกแบบระบบปั๊มความร้อนจึงต้องมีความสัมพันธ์กับส่วนอบแห้ง สำหรับการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนแบบปิด เมื่อพิจารณาที่วงจรอากาศจะพบว่าอากาศหลังการอบแห้งที่เวียนกลับมาใช้ใหม่จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกนำไปลดความชื้นที่เครื่องทำระเหย อีกส่วนจะไหลข้ามเครื่องทำระเหย (bypass) ไปผสมกับอากาศส่วนแรก แล้วนำไปอุ่นที่เครื่องควบแน่นต่อไป การออกแบบจึงเริ่มจากการหาขนาดของเครื่องทำระเหยซึ่งจากการสมดุลความพลังงานสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$Q_e = \dot{m}_{ac} c_a (T_{ei} - T_{eo})$$

สมการที่ 5

เมื่อ	$Q_e$	คือ	อัตราการทำความเย็นของเครื่องทำระเหย (kW)
	$\dot{m}_{ac}$	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศผ่านเครื่องทำระเหย (kg/s)
	$T_{ei}$	คือ	อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเครื่องทำระเหย ( $^{\circ}\text{C}$ )
	$T_{eo}$	คือ	อุณหภูมิของอากาศออกจากเครื่องทำระเหย ( $^{\circ}\text{C}$ )

ในการอบแห้งระบบปิดจะมีเครื่องควบแน่น 2 ชุด เป็นชุดเครื่องควบแน่นตัวในซึ่งใช้ในการอุ่นอากาศและเครื่องควบแน่นตัวนอกใช้สำหรับระบายความร้อนส่วนเกินออกจากระบบ ในการคำนวณขนาดเครื่องควบแน่นตัวในซึ่งจำเป็นต้องทราบอุณหภูมิของอากาศผสมระหว่างอากาศที่ออกจากเครื่องทำระเหยกับอากาศ bypass ซึ่งเป็นสภาวะอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น ซึ่งจากการสมดุลความร้อนสัมผัสของอากาศผสมจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6

$$\dot{m}_a T_{ci} = \dot{m}_{bp} T_f + \dot{m}_{ae} T_{co}$$

สมการที่ 6

เมื่อ	$\dot{m}_a$	คือ	อัตราการไหลของอากาศทั้งหมด (kg/s)
	$\dot{m}_{ae}$	คือ	อัตราการไหลของอากาศผสม (kg/s)
	$\dot{m}_{bp}$	คือ	อัตราการไหลของอากาศ bypass (kg/s)
	$T_{ci}$	คือ	อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น (°C)
	$T_{co}$	คือ	อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากเครื่องควบแน่น (°C)
	$T_f$	คือ	อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากห้องอบแห้ง (°C)

เมื่อทราบอุณหภูมิของอากาศผสมแล้วก็สามารถหาขนาดของเครื่องควบแน่นตัวในได้จากสมการการถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7

$$Q_{c, in} = \dot{m}_a c_a (T_{co} - T_{ci})$$

สมการที่ 7

เมื่อ	$Q_{c,in}$	คือ	อัตราการทำความร้อนของเครื่องควบแน่นตัวใน (kW)
-------	------------	-----	---

เมื่อได้ขนาดของเครื่องทำระเหยและเครื่องควบแน่นตัวในแล้ว สามารถนำไปคำนวณขนาดของเครื่องอัดไอและเมื่อได้เครื่องอัดไอแล้วขนาดของเครื่องควบแน่นตัวนอกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 8

$$Q_{c,ex} = Q_e + W_c - Q_{in}$$

สมการที่ 8

เมื่อ	$Q_{c, ex}$	คือ	อัตราการทำความร้อนของเครื่องควบแน่นตัวนอก (kW)
	$W_c$	คือ	กำลังของเครื่องอัดไอ (kW)

ทั้งนี้ ประสิทธิภาพด้านพลังงานหรือค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance, COP) ของปั๊มความร้อนซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9 (Chua et al.,2000)

$$COP = \frac{\text{useful heat output}}{\text{power input}} = \frac{Q_{cin}}{W_c}$$

สมการที่ 9



### ข้อดี-ข้อเสียของการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน

#### ข้อดีของปั๊มความร้อน

- 1) ประหยัดพลังงาน
- 2) สามารถนำความร้อนที่ไม่ใช้แล้วกลับมาใช้ในระบบได้

#### ข้อเสียปั๊มความร้อน

- 1) ทำอุณหภูมิที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ต่ำ
- 2) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิใช้เวลานาน

### ระบบอบแห้งด้วยรังสีความร้อนจากอินฟราเรด (Infrared Dryer)

การสร้างความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared; IR) เป็นการให้ความร้อนในลักษณะของการแผ่รังสีความร้อน (Heat Radiation) ด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วงของรังสีอินฟราเรด (700 nm - 1 mm) ซึ่งเป็นย่านที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ การดูดซับรังสีอินฟราเรดของวัตถุต่าง ๆ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความยาวของคลื่นอินฟราเรด มุมการตกกระทบของรังสี ส่วนประกอบ ลักษณะพื้นผิว และสีของวัตถุ ความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุดูดซับรังสีอินฟราเรดไว้ ดังนั้นวัสดุที่เหมาะสมกับการให้ความร้อนโดยรังสีอินฟราเรดจะต้องมีสมบัติในการดูดซับรังสีอินฟราเรดได้ดี ไม่มีผิวมันวาวสะท้อนแสงซึ่งจะทำให้รังสีถูกสะท้อนออกทำให้ประสิทธิภาพการให้ความร้อนลดลง

#### ข้อดีของการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด

- 1) ทำความร้อนและลดความร้อนได้อย่างรวดเร็ว
- 2) ไม่ก่อมลพิษและไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
- 3) มีการควบคุมที่แม่นยำ
- 4) มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูง
- 5) ต้นทุนและค่าบำรุงรักษาต่ำ



## ระบบอบแห้งแบบผสมผสาน (Hybrid Drying)

การอบแห้งแบบผสมผสานเป็นการใช้เครื่องอบแห้งหลายลักษณะหรือหลายขั้นตอนในการทำแห้งผลิตภัณฑ์ชนิดใดชนิดหนึ่ง เพื่อการแก้ไขข้อบกพร่องของการอบแห้งแบบขั้นตอนเดียว โดยมีลักษณะการทำงานหลายรูปแบบ เช่น การใช้เครื่องอบแห้งชนิดเดียวกันแต่มีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของการทำแห้งในแต่ละขั้นตอน การเปลี่ยนความดัน หรือการพักในที่อับอากาศระหว่างการอบแห้ง หรือการนำวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ หรือใช้เครื่องอบแห้งต่างชนิดกันมาใช้ร่วมกัน เพื่อผสมผสานข้อดีของเครื่องอบแห้งแต่ละชนิด โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีขึ้น เพิ่มอัตราการอบแห้ง ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และลดการใช้พลังงาน (Kudra T. and Mujumdar A., 2009) การอบแห้งแบบผสมผสานสามารถแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่

1. การผสมผสานลักษณะการถ่ายเทความร้อน (Combined modes of heat transfer) แบ่งเป็นลักษณะต่างๆ ได้แก่

- การพาความร้อนร่วมกับการนำความร้อน (Convection and conduction) เช่น การใช้ลมร้อนร่วมกับภาตร้อน

- การพาความร้อนร่วมกับการแผ่รังสี (Convection and radiation) เช่น การใช้ลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

2. การทำแห้งแบบหลายขั้นตอน (Multistage dryer) แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

- Each stage same dryer type คือ การอบแห้งหลายขั้นตอนหรือหลายระดับอุณหภูมิโดยแต่ละขั้นตอนใช้เครื่องอบแห้งชนิดเดียวกัน

- Each stage different dryer type คือ การอบแห้งหลายขั้นตอนหรือหลายระดับอุณหภูมิโดยแต่ละขั้นตอนใช้เครื่องอบแห้งต่างชนิดกัน

- Different drying technologies per stage คือ การใช้เครื่องอบแห้งต่างชนิดกันในแต่ละขั้นตอน

3. การทำแห้งร่วมกับกระบวนการอื่น ๆ (Multiprocessing dryer) ได้แก่

- Drying and Cooling คือ การอบแห้งร่วมกับการทำเย็น

- Drying and Granulation/Agglomeration คือ การอบแห้งร่วมกับการขึ้นรูปเป็นอนุภาค

- Drying and Coating คือ การอบแห้งร่วมกับการเคลือบ

- Drying and Filtration คือ การอบแห้งร่วมกับการกรอง

## การออกแบบเครื่องอบแห้ง

การออกแบบและสร้างระบบอบแห้งแบบผสมผสานสำหรับผลิตผลทางการเกษตรโดยใช้แหล่งความร้อนแบบผสมผสานเพื่อช่วยในการประหยัดพลังงานและลดระยะเวลาการอบแห้งมีขั้นตอนและรายละเอียดการออกแบบดังต่อไปนี้

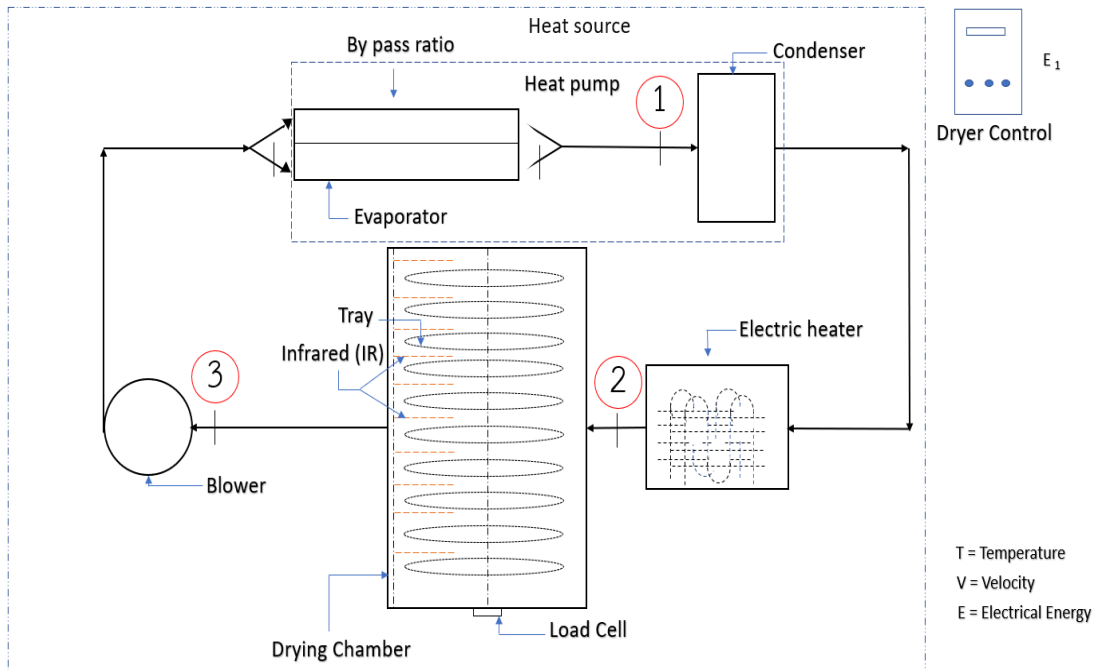
### ขั้นตอนที่ 1 การตั้งสมมติฐานและการกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบ

การออกแบบระบบอบแห้งอาจตั้งสมมติฐานในการออกแบบในกรณี Worst Case Scenario กล่าวคือ ทำการออกแบบระบบอบแห้งโดยกำหนดให้ระบบสามารถรองรับการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรที่มีความชื้นสูงที่สุดที่มีในท้องตลาด (ประมาณ 99 %wb) และกำหนดให้ระบบอบแห้งนี้เป็นแบบระบบเปิด (Open system) ซึ่งระบบอบแห้งลักษณะนี้จะทำการระบายอากาศชื้นที่ระเหยน้ำจากวัตถุดิบออกจากห้องอบแห้งทั้งหมดแล้วเติมอากาศแห้งจากภายนอกผ่านแหล่งความร้อนเพื่อเข้าไประเหยน้ำจากวัตถุดิบต่อไปทำให้ระบบชนิดนี้ใช้พลังงานในการอบแห้งสูงที่สุด หลังจากตั้งสมมติฐานแล้วจึงกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบซึ่งจะนำไปสู่การคำนวณสมบัติของอากาศ ณ จุดต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้ง ปริมาณน้ำที่ต้องการระเหย อัตราการระเหยน้ำระหว่างการอบแห้ง ปริมาณอากาศที่ต้องใช้ในการอบแห้ง สมดุลพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการอบแห้ง โดยเงื่อนไขในการออกแบบเครื่องอบแห้งที่ควรกำหนดในเบื้องต้นมีดังต่อไปนี้

1. ขนาดห้องอบแห้งที่ต้องการ
2. น้ำหนักและความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบที่ต้องการอบแห้ง
3. ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ต้องการ
4. อุณหภูมิความร้อนสูงสุดที่ใช้ในการอบแห้ง
5. อุณหภูมิความร้อนหลังการอบแห้ง (ค่าจากการประมาณการ)
6. ความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้ง
7. อุณหภูมิอากาศแวดล้อม
8. ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม
9. ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง
10. ค่าความปลอดภัย (Safety Factor; SF)

เมื่อทำการกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบเบื้องต้นได้ครอบคลุมความต้องการแล้วผู้ออกแบบจะต้องทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังขั้นตอนต่อไปนี้ (Ian C. Kemp, 2012)

ขั้นตอนที่ 2 รวบรวมข้อมูลสมบัติของอากาศ ณ จุดต่าง ๆ ของระบบอบแห้ง ดังภาพที่ 8 ดังนี้



ภาพที่ 8 ตำแหน่งในการพิจารณาสมบัติของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง

**จุดที่ 1** อากาศร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้ง (อากาศแวดล้อมที่ผ่านแหล่งความร้อน ดังภาพที่ 8 ตำแหน่งที่ 1) จากแผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart) โดยกำหนดอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ  $T_{db,1}$  และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม  $RH_1$  ตามเงื่อนไขในการออกแบบ แล้วอ่านค่าเอนทาลปี (Enthalpy)  $h_1$  และค่าอัตราส่วนความชื้น  $w_1$  จากแผนภูมิอากาศชื้น (Ian C., 2012)

**จุดที่ 2** อากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง (อากาศที่ออกจากแหล่งความร้อน ดังภาพที่ 8 ตำแหน่งที่ 2) จากแผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart) โดยกำหนดอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ  $T_{db,2}$  ตามเงื่อนไขในการออกแบบ และกำหนดให้ค่าอัตราส่วนความชื้น  $w_2$  ของอากาศ ณ ตำแหน่งนี้ให้มีค่าคงที่เท่ากับค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศแวดล้อม  $w_1$  ( $w_2 = w_1$  เนื่องจากอากาศที่ผ่านแหล่งความร้อนไม่มีปริมาณน้ำในอากาศเพิ่มขึ้น) แล้วอ่านค่าเอนทาลปี  $h_2$  และค่าปริมาตรจำเพาะ  $v_2$  จากแผนภูมิอากาศชื้น (Ian C. K, 2012)

**จุดที่ 3** อากาศชื้นที่ออกจากห้องอบแห้ง (ดังภาพที่ 8 ตำแหน่งที่ 3) จากแผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart) โดยกำหนดอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ  $T_{db,3}$  ตามเงื่อนไขในการออกแบบ และกำหนดให้ค่าเอนทาลปี  $h_3$  ของอากาศ ณ ตำแหน่งนี้ให้มีค่าคงที่เท่ากับค่าเอนทาลปี  $h_2$  ของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง ( $h_3 = h_2$  เนื่องจากเป็นกระบวนการ Adiabatic) แล้วอ่านค่าอัตราส่วนความชื้น  $w_3$  จากแผนภูมิอากาศชื้น (Ian C, 2012)

**ขั้นตอนที่ 3** คำนวณน้ำหนักสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้ง ( $W_f$ ) โดยกำหนดน้ำหนักเริ่มต้นของวัตถุดิบ ( $W$ ) ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ ( $M_i$ ) และความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้ง ( $M_f$ ) ตามเงื่อนไขการออกแบบที่กำหนด แล้วทำการคำนวณน้ำหนักสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้งด้วยสมการที่ 10

$$W_f = \frac{w_i(100-M_i)}{(100-M_f)} \quad \text{สมการที่ 10}$$

**ขั้นตอนที่ 4** คำนวณปริมาณน้ำที่ต้องระเหยออกจากวัตถุดิบ ( $m_w$ ) ด้วยค่าน้ำหนักเริ่มต้นของวัตถุดิบ ( $W$ ) ตามเงื่อนไขการออกแบบและน้ำหนักสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้ง ( $W_f$ ) จากขั้นตอนที่ 3 ด้วยสมการที่ 11

$$m_w = W_i - W_f \quad \text{สมการที่ 11}$$

**ขั้นตอนที่ 5** คำนวณอัตราการระเหยน้ำระหว่างการอบแห้ง ( $\dot{m}_w$ ) ด้วยค่าปริมาณน้ำที่ต้องระเหยออกจากวัตถุดิบ ( $m_w$ ) จากขั้นตอนที่ 4 และระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ( $t$ ) ตามเงื่อนไขการออกแบบด้วยสมการที่ 12

$$\dot{m}_w = \frac{m_w}{t} \quad \text{สมการที่ 12}$$

**ขั้นตอนที่ 6** คำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ( $\dot{m}_a$ ) ที่ต้องใช้ในการอบแห้งด้วยค่าอัตราการระเหยน้ำระหว่างการอบแห้ง ( $\dot{m}_w$ ) จากขั้นตอนที่ 5 และผลต่างของอัตราส่วนความชื้นของอากาศเข้า ( $w_2$  จากขั้นตอนที่ 2) และออกจากห้องอบแห้ง ( $w_3$  จากขั้นตอนที่ 2) ด้วยสมการที่ 13

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_w}{w_f - w_i} = \frac{\dot{m}_w}{w_3 - w_2} \quad \text{สมการที่ 13}$$

**ขั้นตอนที่ 7** คำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ ( $\dot{V}_a$ ) ที่ต้องใช้ในการอบแห้งด้วยค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ( $\dot{m}_a$ ) จากขั้นตอนที่ 6 และค่าปริมาตรจำเพาะของอากาศเข้าห้องอบแห้ง ( $v_2$  จากขั้นตอนที่ 2) ด้วยสมการที่ 14

$$\dot{V}_a = \dot{m}_a \cdot v_i = \dot{m}_a \cdot v_2 \quad \text{สมการที่ 14}$$

**หมายเหตุ:** ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศนี้ใช้สำหรับการเลือกขนาดพัดลมหมุนเวียนอากาศภายในระบบอบแห้ง

**ขั้นตอนที่ 8** คำนวณพลังงานความร้อนที่ระบบอบแห้งต้องการ ( $Q_{\text{dryer}}$ ) ในขั้นตอนนี้จะทำการคำนวณค่าพลังงานที่ต้องใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศแวดล้อม (อากาศก่อนเข้าสู่แหล่งความร้อน ดังภาพที่ 8 ตำแหน่งที่ 1) ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเท่ากับเงื่อนไขในการออกแบบ (เท่ากับอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากแหล่งความร้อน ดังภาพที่ 8 ตำแหน่งที่ 2) โดยการคำนวณจะพิจารณาจากความสัมพันธ์ของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ( $\dot{m}_a$ ) ที่ต้องใช้ในการอบแห้งจากขั้นตอนที่ 6 และผลต่างของเอนทาลปีของอากาศเข้า ( $h_1$  จากขั้นตอนที่ 2) และออกจากแหล่งความร้อน ( $h_2$  จากขั้นตอนที่ 2) ด้วยสมการที่ 15

$$Q_{\text{dryer}} = \dot{m}_a \times \frac{(h_2 - h_1)}{3,600} \quad \text{สมการที่ 15}$$

**หมายเหตุ:** ค่าพลังงานความร้อนที่ระบบอบแห้งต้องการนี้ใช้สำหรับการเลือกขนาดแหล่งความร้อนเพื่อติดตั้งให้กับระบบอบแห้ง

**ขั้นตอนที่ 9** การเผื่อค่าความปลอดภัยเชิงวิศวกรรมนั้น เนื่องจากระบบอบแห้งเมื่อทำงานในสภาวะจริงจะเกิดการสูญเสียความร้อนจากปัจจัยที่นอกเหนือการควบคุม ได้แก่ การสูญเสียความร้อนไปสู่ชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ประกอบขึ้นเป็นระบบอบแห้ง อาทิ โครงสร้างของตู้อบ ถาดอบ แขนหมุน ถาด ช่องกระจายอากาศ ท่อหมุนเวียนอากาศ รวมถึงการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม จากเหตุผลดังกล่าวผู้ออกแบบจึงต้องเผื่อภาระการทำงานให้แก่ระบบที่ทำการออกแบบด้วยค่าความปลอดภัย (Safety Factor; SF) เชิงวิศวกรรมเพื่อให้แหล่งความร้อนที่จะออกแบบและติดตั้งให้กับระบบอบแห้งไม่ทำงานหนักจนเกินไปหรือเกิดการเสียหายโดยค่าพลังงานงานความร้อนออกแบบ ( $Q_{design}$ ) สามารถคำนวณได้จากค่าพลังงานงานความร้อนที่ระบบอบแห้งต้องการ ( $Q_{dryer}$ ) จากการคำนวณในขั้นตอนที่ 8 และค่าความปลอดภัย (Safety Factor; SF) ดังสมการที่ 16

$$Q_{design} = Q_{dryer} \times \text{Safety Factor (SF)}$$

สมการที่ 16

**หมายเหตุ:** ในการออกแบบเชิงอุณหพลศาสตร์ (Thermal design) ที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายถึงชีวิตจะเผื่อค่าความปลอดภัย (SF) ในช่วง 10 % - 50 % หรือ 1.1 – 1.5 (Driscoll T. and Johnson B., 2009)



## การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้ง

การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งสามารถพิจารณาได้จากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

1) อัตราการอบแห้ง (Drying Rate; DR) คือ ค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนของปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาในการอบแห้งหรือปริมาณความชื้นต่อระยะเวลาในการอบแห้ง โดยค่าอัตราการอบแห้ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 17

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t}$$

สมการที่ 17

เมื่อ	DR	คือ	อัตราการอบแห้ง ( $\text{kg}_{\text{water}}/\text{h}$ หรือ %db/h)
	$W_i$	คือ	น้ำหนักเริ่มต้นของวัตถุดิบ (kg)
	$W_f$	คือ	น้ำหนักสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้ง (kg)
	t	คือ	ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

2) อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) คือ ค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนของปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อพลังงานที่ใช้ทั้งหมดตลอดการอบแห้ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 18

$$SMER = \frac{W_i - W_f}{P_E}$$

สมการที่ 18

เมื่อ	SMER	คือ	อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ ( $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kWh}$ )
	$P_E$	คือ	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh)

3) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) คือ ค่าที่แสดงถึงพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยซึ่งเป็นค่าส่วนกลับของ SMER สามารถคำนวณจากสมการที่ 19

$$SEC = \frac{3.6P_E}{W_i - W_f}$$

สมการที่ 19

เมื่อ	SEC	คือ	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ( $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{water}}$ )
-------	-----	-----	--

4) ประสิทธิภาพของระบบบอบแห้ง (Effectiveness) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 20

$$\eta_{\text{system}} = \frac{m_w h_{fg}}{E_{\text{total}}} \times 100\% \quad \text{สมการที่ 20}$$

เมื่อ	$\eta_{\text{system}}$	คือ	ประสิทธิผลของระบบบอบแห้ง (%)
	$m_w$	คือ	มวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัตถุดิบ (kg)
	$h_{fg}$	คือ	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (kJ/kg)
	$E_{\text{Total}}$	คือ	พลังงานไฟฟ้ารวมที่ป้อนให้กับระบบ (kJ)

### การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์

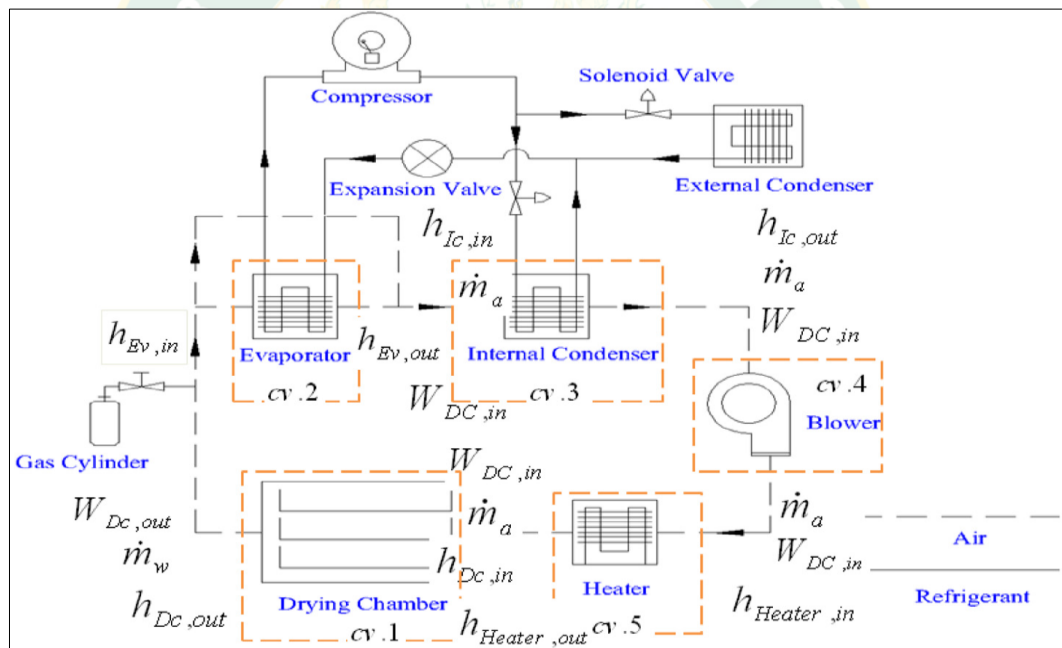
การออกแบบระบบทางวิศวกรรมหรืองานวิจัยทางวิศวกรรมนั้นในกระบวนการที่จะทำการสร้างหรือออกแบบขนาดต่าง ๆ ก่อนการดำเนินงานจะใช้กระบวนการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ (Economics) เข้ามาช่วยในการตัดสินใจเพื่อพิจารณาความคุ้มค่าในการลงทุน และเพื่อควบคุมค่าใช้จ่ายให้น้อยที่สุดและให้ผลตอบแทนมากที่สุด อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่น เช่น ผลกระทบทางด้านสังคมและสิ่งแวดล้อมที่จะตามมา ในการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ก่อนการตัดสินใจเลือกอุปกรณ์หรือออกแบบระบบการทำงานมักจะพิจารณาจากผลตอบแทนที่ได้รับมากที่สุด หรือระยะเวลาคืนทุนเร็วที่สุด วิธีที่นิยมใช้ในการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ได้แก่ ระยะเวลาคืนทุน (Payback period) ซึ่งเป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิสะสมจากการดำเนินงานมีค่าเท่ากับมูลค่าในการลงทุนทั้งหมด โครงการใดที่มีระยะเวลาลงทุนยิ่งสั้นยิ่งมีความต้องการสูง เนื่องจากสามารถนำเงินที่คืนทุนไปลงทุนในกิจการอื่น ๆ ได้ ระยะเวลาคืนทุนที่นิยมใช้ในการประเมินโครงการจะใช้วิธีระยะคืนทุนแบบง่าย (Simple payback period) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 21 (เพชรรัตน์ ใจบุญ, 2549)

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{มูลค่าในการลงทุนรวม}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิสะสมรายปี}} \quad \text{สมการที่ 21}$$

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### งานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบ การทดสอบระบบ และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้ง

Morris et al. (2016) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการอบแห้งและการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนดังแสดงในภาพที่ 9 โดยทำการอบแห้งขิงสดที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 780 %db ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 200 min โดยเปรียบเทียบการใช้อากาศ (Air) กับไนโตรเจน ( $N_2$ ) เป็นตัวกลาง จากการทดลองพบว่า การอบแห้งด้วยตัวกลางทั้งสองชนิดที่อุณหภูมิและระยะเวลาในการอบแห้งเท่ากันสามารถผลิตขิงอบแห้งที่มีความชื้นสุดท้ายได้ใกล้เคียงกัน โดยการอบแห้งด้วยอากาศใช้พลังงานทั้งหมดเท่ากับ 11.6 MJ ในขณะที่การใช้ไนโตรเจนใช้พลังงานทั้งหมดเท่ากับ 12.5 MJ อีกทั้งการใช้ไนโตรเจนเป็นตัวกลางยังส่งผลต่อสีส้มของผลิตภัณฑ์ที่ต่ำกว่าเนื่องจากลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งส่งผลต่อการเกิดสีคล้ำของผลิตภัณฑ์อีกด้วย

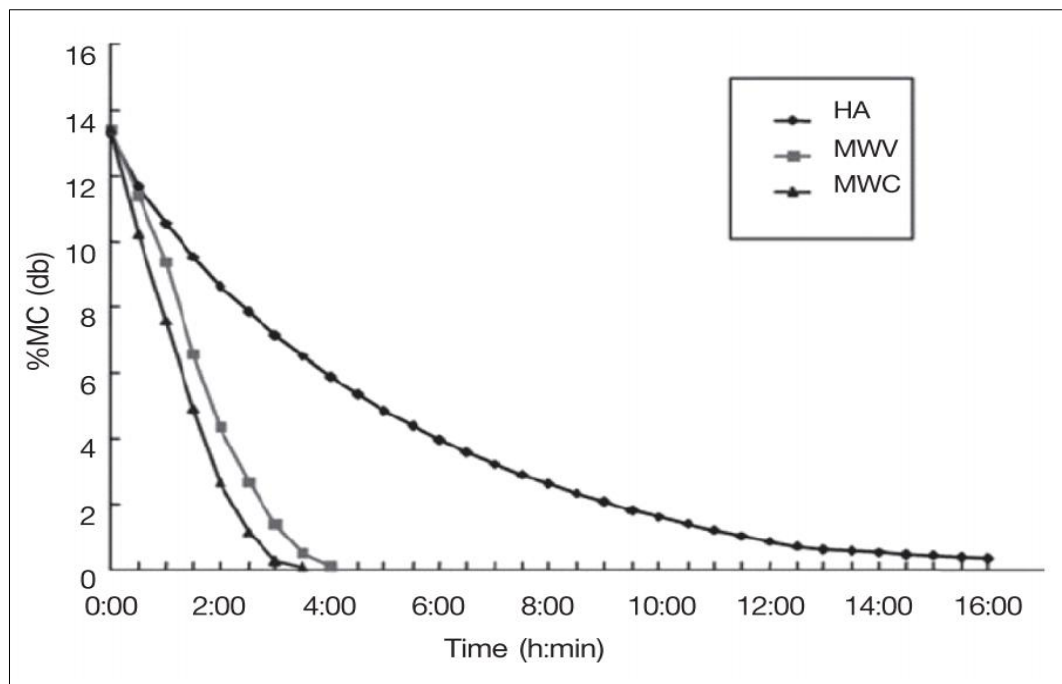


ภาพที่ 9 แผนผังของเครื่องอบความร้อนด้วยปั๊มระบบปิด

ที่มา : Morris et al. (2016)

Borompichaichartkul et al. (2009) ทำการศึกษาการอบแห้งถั่วแมคคาเดเมียทั้งกะลาด้วย ป้อนความร้อนแบบหลายชั้นตอนโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ ) และอากาศ (Air) เป็นตัวกลางในการ ถ่ายเทความร้อนให้แก่วัสดุอบด้วยการอบแห้งแบบ 2 ชั้นตอน โดยการปรับอุณหภูมิในการอบแห้ง ช่วงแรกเท่ากับ  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  และปรับอุณหภูมิในช่วงที่ 2 เท่ากับ  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  หรือ  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  ทำการอบแห้ง จนกระทั่งความชื้นของถั่วแมคคาเดเมียลดลงเหลือ  $2\text{ \%wb}$  พบว่าสภาวะการอบแห้ง  $40\text{ }^{\circ}\text{C} - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่า  $40\text{ }^{\circ}\text{C} - 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  และการใช้ไนโตรเจนเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนเพียงอย่างเดียวสามารถรักษากลิ่นรสของแมคคาเดเมียได้ดีกว่าใช้อากาศเป็นตัวกลาง โดยการอบ ในสภาวะ  $40\text{ }^{\circ}\text{C } N_2 - 50\text{ }^{\circ}\text{C } N_2$  และ  $40\text{ }^{\circ}\text{C } \text{AIR} - 50\text{ }^{\circ}\text{C } \text{AIR}$  จะมีค่า Peroxide value (PV) เท่ากับ  $0.38\text{ meqO}^2/\text{kg}_{\text{oil}}$  และ  $1.15\text{ meqO}^2/\text{kg}_{\text{oil}}$  ทั้งนี้เมื่อปรับอุณหภูมิในช่วงที่สองเท่ากับ  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะทำให้กลิ่นของของแมคคาเดเมียลดลงโดยค่า Peroxide value (PV) ของการอบแห้งโดยใช้ไนโตรเจน และอากาศเป็นตัวกลางที่อุณหภูมิดังกล่าวมีค่าเท่ากับ  $0.15\text{ meqO}^2/\text{kg}_{\text{oil}}$  และ  $1.53\text{ meqO}^2/\text{kg}_{\text{oil}}$  ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงสีส้มของผลิตภัณฑ์พบว่าการใช้ตัวกลางทั้งสองชนิดและอุณหภูมิอบแห้งที่ ต่างกันส่งผลต่อค่าสี (L, a, b) ที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยค่า L และ a ของเมล็ดถั่วแมคคาเดเมีย ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญจึงสามารถ สรุปได้ว่าชนิดของตัวกลางส่งผลต่อกลิ่นรสของแมคคาเดเมีย อบแห้งอย่างมีนัยยะสำคัญแต่ไม่ส่งผลต่อสีส้มของผลิตภัณฑ์

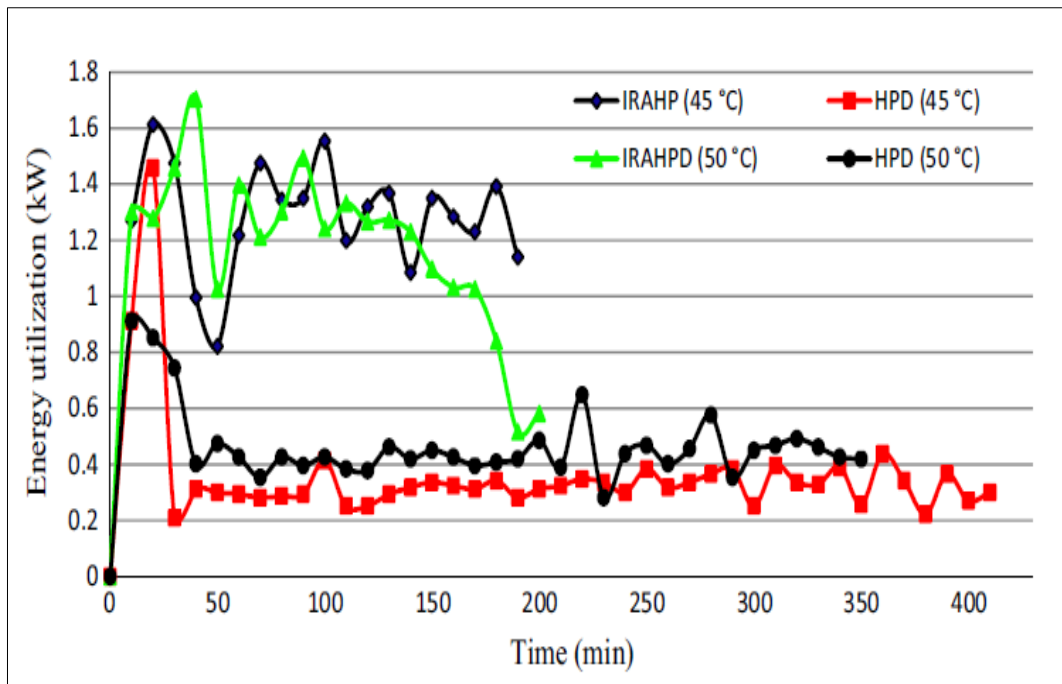
Arora et al. (2018) ศึกษาการอบแห้งเห็ด *Agaricus bisporus* ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $3\text{ cm} - 5\text{ cm}$  ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ  $94\text{ \%wb}$  ด้วยวิธีต่าง ๆ ได้แก่ การอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบ สูญญากาศ พบว่าอัตราการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน และการอบแห้งด้วยคลื่น ไมโครเวฟร่วมกับระบบสูญญากาศมีค่าใกล้เคียงกันและใช้เวลาน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวดังแสดงในภาพที่ 10 โดยการใช้เทคนิคคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลม ร้อนสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนให้ดีกว่าใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว เมื่อพิจารณาอัตราการ อบแห้งของการใช้เทคนิคต่าง ๆ พบว่าการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสูญญากาศมีอัตรา การอบแห้งต่ำกว่าการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ลมร้อนจะ สามารถพัดพาความชื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ออกไปได้ดีกว่าจึงช่วยเร่งอัตราการทำให้เร็วขึ้นใน ขณะที่การอบแห้งแบบสูญญากาศไม่มีตัวกลางในการพาความชื้นออกจากระบบ และเมื่อพิจารณา อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์อบแห้งพบว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสูญญากาศมี อุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนอีกด้วย ทำให้การใช้เทคนิคคลื่นไมโครเวฟ ร่วมกับลมร้อนสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งจากเทคนิคการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวและ เทคนิคการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสูญญากาศประมาณ  $12\text{ h}$  และ  $1\text{ h}$  ตามลำดับ



**ภาพที่ 10** กราฟการอบแห้งของเห็ดด้วยลมร้อน (HA) การทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ (MWW) และการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน (MWC)

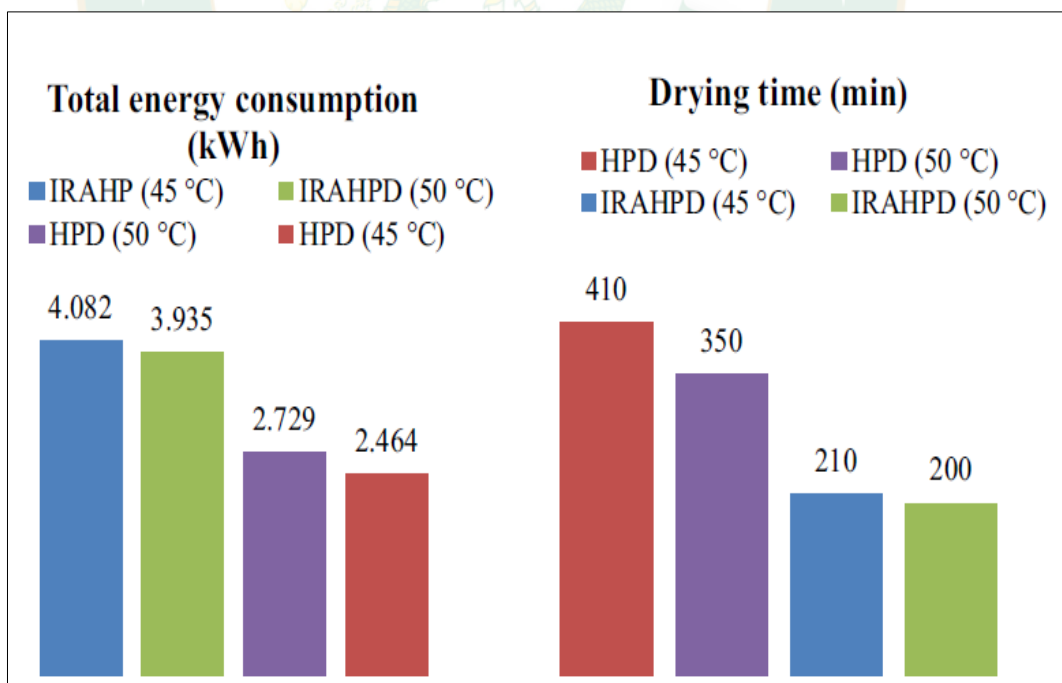
ที่มา : Arora et al. (2018)

Aktag et al. (2017) ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าพลังงานของการอบแห้งแครอทด้วยป้มความร้อน และป้มความร้อนร่วมกับอินฟราเรด โดยใช้อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 45 °C และ 50 °C ที่ความเร็วลม 0.5 m/s จากการทดลองพบว่า การอบแห้งด้วยป้มความร้อนร่วมกับอินฟราเรดใช้พลังงานในการอบแห้งสูงกว่าการใช้ป้มความร้อนเพียงอย่างเดียวแต่สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งแครอทด้วยอุณหภูมิ 45 °C และ 50 °C ได้ถึง 49 % และ 43 % ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 11 และ 12 ตามลำดับ



ภาพที่ 11 แสดงการใช้พลังงานตามเวลาการอบแห้ง

ที่มา: Aktag et al. (2017)



ภาพที่ 12 เปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าและระยะเวลาการอบแห้ง

ที่มา: Aktag et al. (2017)



Wang et al. 2014 ได้ศึกษาผลกระทบของความยาวคลื่นอินฟราเรดที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์หมักแห้งที่อุณหภูมิอบแห้งปานกลางเท่ากับ 50 °C โดยเปรียบเทียบกับกรอบแห้งด้วยลมร้อนแบบธรรมดา (HAD) จากผลการทดสอบพบว่าอัตราการให้ความร้อนด้วยอินฟราเรดเพิ่มขึ้นเร็วกว่า HAD ค่าพลังงานจำเพาะในการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นตามความยาวคลื่นและความเร็วลม ผลิตภัณฑ์หมักที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดมีการหดตัวน้อยกว่า มีโครงสร้างเส้นใยกล้ำเนื้อคล้ายกับตัวอย่างสด และมีสีน้ำตาลกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก HAD การอบแห้งด้วยอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นในช่วง 2.5 – 3.0  $\mu\text{m}$  และความเร็วลม เท่ากับ 0.5 m/s เป็นเงื่อนไขการอบแห้งที่ดีที่สุดสำหรับหมักแห้งในการศึกษา

นริศ และคณะ (2551) ศึกษาอิทธิพลของกำลังอินฟราเรด อุณหภูมิลมร้อน และความเร็วลมที่มีผลต่อการอบแห้งเนื้อลำไย พร้อมทั้งทำการพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ของการอบแห้งทางทฤษฎี โดยทำการทดลองอบแห้งเนื้อลำไยที่ความชื้นเริ่มต้นในช่วง 450 - 500 %db ด้วยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนในห้องปฏิบัติการโดยกำหนดกำลังอินฟราเรด ความเร็ว และอุณหภูมิลมร้อนในช่วง 200 - 800 W, 0.3 - 0.7 m/s และ 40 - 60 °C ตามลำดับ โดยวางตัวอย่างห่างจากแท่งอินฟราเรดเป็นระยะ 250 mm ทำการทดลองอบแห้งจนตัวอย่างมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 18 %db จากการศึกษาพบว่าอัตราการแพร่ของน้ำของลำไยเพิ่มขึ้นตามกำลังของอินฟราเรด และอุณหภูมิลมร้อนทำให้ใช้เวลาอบแห้งลดลง โดยที่ความเร็วลมไม่มีผลต่อเวลาอบแห้งและอุณหภูมิ

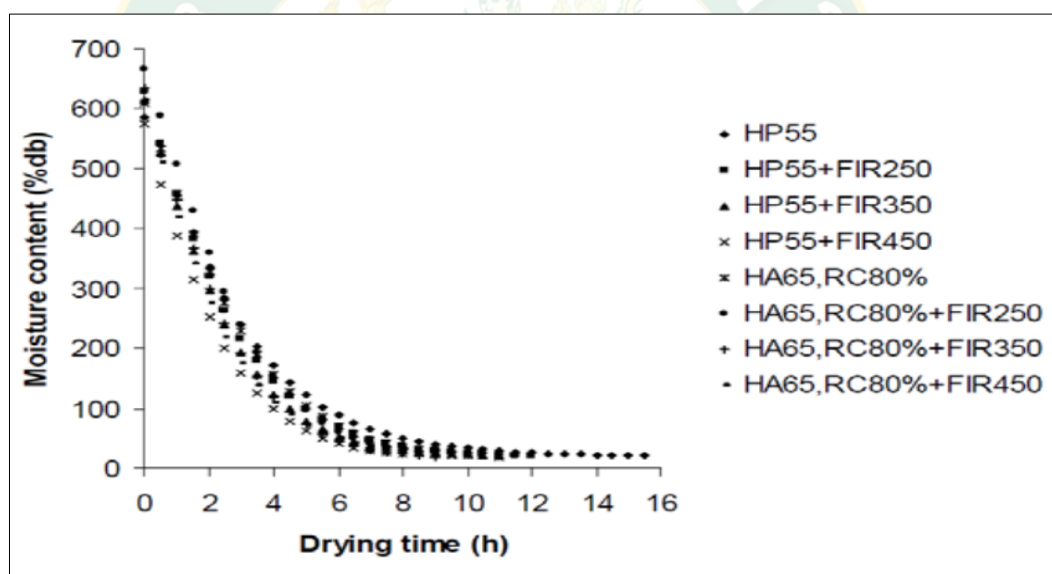
รัฐพร และคณะ (2547) ได้ทำการทดลองอบแห้งเมล็ดกาแฟที่มีความชื้นเริ่มต้นในช่วง 178 - 209 %db จนตัวอย่างมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 15 - 16 %db ด้วยบีมความร้อน โดยทำการศึกษาอิทธิพลของความเร็วและอุณหภูมิลมร้อนในช่วง 50 - 70 °C และ 0.8 - 1.3 m/s ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยความเร็วของลมร้อนไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง

ภราดร และคณะ (2551) สร้างเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนสำหรับห้องปฏิบัติการ แล้วทำการหาความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งและความชื้นของตัวอย่างหลังการอบแห้ง พร้อมทั้งศึกษาอิทธิพลของกำลังอินฟราเรด และอุณหภูมิลมร้อนที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยทำการทดลองอบแห้งมันฝรั่ง แต่ละขนาด 10 mm x 10 mm x 50 mm 3 จำนวน จำนวนละ 1 kg ที่กำลังอินฟราเรดขนาด 100 W, 500 W และ 1000 W ที่อุณหภูมิลมร้อน 40 °C, 50 °C และ 80 °C ความเร็วลมคงที่ 0.7 m/s และระยะห่างระหว่างมันฝรั่งกับแท่งอินฟราเรด 200 mm ลดความชื้นมันฝรั่งจนเหลือ 10 %db จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งและ

ความชื้นของมันฝรั่งหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ อีกทั้งยังพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว หรือการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่กำลังอินฟราเรดต่ำ ๆ อิทธิพลของกำลังอินฟราเรดมีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับผลของอุณหภูมิ ลมร้อนที่มีผลอย่างมากต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิวัสดุและการเพิ่มขึ้นของอัตราการอบแห้งทำให้ใช้เวลาการอบแห้งลดลง ส่วนการอบแห้งมันฝรั่งด้วยอินฟราเรดอย่างเดียวหรือการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่กำลังสูง ๆ พบว่าอิทธิพลของกำลังอินฟราเรดมีผลอย่างมากเมื่อเทียบกับผลของอุณหภูมิ ลมร้อนที่มีผลน้อยต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิวัสดุและการเพิ่มขึ้นของอัตราการอบแห้ง

รุ่งศิริ และคณะ (2549) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งเนื้อวัวด้วยรังสีอินฟราเรด พารามิเตอร์ที่ศึกษาได้แก่ อัตราการไหลอากาศจำเพาะ กำลังไฟฟ้า ความหนาของชั้นเนื้อวัว และระยะห่างระหว่างอินฟราเรดกับเนื้อวัวโดยมีเงื่อนไขที่ศึกษาดังนี้ 1) อัตราการไหลอากาศจำเพาะ  $0.08 \text{ m}^3_{\text{air}}/\text{s}/\text{kg}_{\text{product}}$ ,  $0.12 \text{ m}^3_{\text{air}}/\text{s}/\text{kg}_{\text{product}}$  และ  $0.16 \text{ m}^3_{\text{air}}/\text{s}/\text{kg}_{\text{product}}$  2) กำลังไฟฟ้า 260 W, 370 W และ 470 W 3) ความหนาของเนื้อ 0.5 cm, 1.0 cm และ 1.5 cm และ 4) ระยะห่างระหว่างอินฟราเรดกับเนื้อ 10 cm, 15 cm และ 20 cm พบว่าอัตราการอบแห้งจะสูงและอัตราความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อลดอัตราการไหลอากาศจำเพาะ ความหนาของเนื้อ ระยะห่างระหว่างอินฟราเรดกับเนื้อ และเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอินฟราเรด นอกจากนี้ยังพบว่า การอบแห้งเนื้อวัวที่มีความชื้นเริ่มต้น 35 %db จนได้ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการคือ 14 %db จะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด กำลังไฟฟ้า 470 W อัตราการไหลอากาศ  $0.08 \text{ m}^3_{\text{air}}/\text{s}/\text{kg}_{\text{product}}$  ความหนาของเนื้อวัว 0.5 cm และระยะห่างระหว่างอินฟราเรดกับเนื้อ 10 cm คิดเป็นพลังงานที่ทำให้น้ำระเหยออกไปเท่ากับ  $16.27 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$  ในส่วนของการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพพบว่าเพิ่มกำลังไฟฟ้าของอินฟราเรด ลดความหนาของเนื้อ หรืออัตราการไหลของอากาศจำเพาะ มีแนวโน้มจะมีผลทำให้การหดตัว การเปลี่ยนแปลงของสี และค่าความแข็งของเนื้อเพิ่มขึ้น สำหรับผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของเนื้อ พบว่าปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้า มีค่าไม่แตกต่างกันมาก จากผลการทดลองการอบแห้งเนื้อด้วยอินฟราเรดพบว่าระยะเวลาในการอบแห้งจะลดลงเร็วที่สุดเมื่อใช้กำลังไฟฟ้า 470 W อัตราการไหลอากาศ  $0.08 \text{ m}^3_{\text{air}}/\text{s}/\text{kg}_{\text{product}}$  ความหนาของเนื้อ 0.5 cm และระยะห่างของอินฟราเรดกับเนื้อ 10 cm โดยการเปิดข้างมองสีตลอดเวลา และสมบัติทางกายภาพกับสมบัติทางเคมีของเนื้อก็ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเนื้อสดมากนักจึงทำให้การอบแห้งเนื้อด้วยรังสีอินฟราเรดนี้มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ดังนั้นการนำวิธีการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมาใช้แทนการตากแดดแบบเก่าจึงน่าจะเป็นทางเลือกใหม่สำหรับผู้บริโภคเนื้อแห้งหรือเนื้อแดดเดียวหรือเพื่อการค้าอีกทั้งยังสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนัก

เพชรรัตน์ และคณะ (2549) ศึกษาการนำรังสีอินฟราเรดเข้ามาร่วมในการอบแห้งเนื้อลำไย ด้วยลมร้อน และป้อนความร้อนเทียบกับการอบแห้งลำไยด้วยลมร้อนและป้อนความร้อนเพียงอย่างเดียว ในด้านลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง สี การหดตัว การคืนตัว ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ วอเตอร์แอกทิวิตี เนื้อสัมผัส โครงสร้างระดับจุลภาพและการทดสอบด้านประสาทสัมผัสดังแสดงใน ภาพที่ 13 โดยทำการอบแห้งเนื้อลำไย จากความชื้นเริ่มต้น 550-600 %db (84-86 %wb) จนเหลือ ความชื้นสุดท้ายประมาณ 20 %db (18 %wb) ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 65 °C สำหรับลมร้อน ในส่วน ของป้อนความร้อนอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 55 °C ความเร็วลม 0.3 m/s สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน มีสัดส่วนการนำความร้อนหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ 80 % ในส่วนการนำรังสีอินฟราเรดไกลเข้าร่วมใน การอบแห้งใช้กำลังไฟฟ้ากับหลอดรังสีอินฟราเรดไกลที่ 250 W, 350 W และ 450 W จากผลการ ทดลองพบว่าการนำรังสีเข้ามาร่วมกับการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยลมร้อนหรือป้อนความร้อนช่วยเพิ่ม อัตราการอบแห้งและลดเวลาการอบแห้งลง



ภาพที่ 13 เปรียบเทียบการลดลงของความชื้นเฉลี่ยของเนื้อลำไยด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่าง ๆ

ที่มา : เพชรรัตน์ และคณะ (2549)

**ตารางเอกสาร**

ตารางที่ 1 สรุปสาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชื่อผู้วิจัย	ชื่องานวิจัย	แหล่งความร้อน	วัตถุดิบ	สาระสำคัญ
Morris J.et.al (2016)	Thermal characteristics of heat pump dryer for ginger drying	Heat pump	Fresh ginger	การใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้งซึ่งสามารถประหยัดพลังงานในการอบแห้งมากกว่าการใช้ก๊าซไนโตรเจน โดยผลิตผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้มีคุณภาพใกล้เคียงกัน
Mustafa A. et al. (2017)	Performance analysis of heat pump and infrared-heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology	Heat pump and Infrared-Heat pump drying	carrot	การเปรียบเทียบร่วมกับอินฟราเรดใช้พลังงานในการอบแห้งสูงกว่าการใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียวเล็กน้อยแต่สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้อย่างมีนัยยะสำคัญ
Wang Y. et al. (2014)	Drying and Quality Characteristics of Shredded Squid in an Infrared-Assisted Convective Dryer	Heat pump and Infrared	Squid	การอบแห้งหมึกแห้งผอมด้วยอินฟราเรดจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างเส้นใยกล้ามเนื้อคล้ายกับตัวอย่างสด ผลิตภัณฑ์มีการหดตัวน้อยกว่า และมีสีที่สดกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งแบบร้อนธรรมดา

ชื่อผู้วิจัย	ชื่องานวิจัย	แหล่งความร้อน	วัตถุดิบ	สาระสำคัญ
Borompichaichartkul C. et al. (2010)	Multistage Heat Pump Drying of Macadamia Nut under Modified Atmosphere	Heat Pump	Macadamia	การใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวกลางในการอบแห้งสามารถรักษากลิ่นรสของถั่วแมคคาเดเมียได้ดีกว่าใช้อากาศเป็นตัวกลาง แต่สีของผลิตภัณฑ์ที่ไม่แตกต่างกัน
Aroa S. et al. Shivhare Aroa S., U.S., Ahmed, J. and Raghavan G. (2003)	Drying kinetics of agaricus bisporus and pleurotus florida mushrooms	Microwave, Air and Heat Pump	Mushroom	1) การใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งที่ต่ำกว่าเดิมที่ใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวได้ประมาณ 400 % 2) อัตราการอบแห้งที่ด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการอบแห้งที่ตัดด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ
นริศ พัวพันวิฒนวรรณ และคณะ (2551b)	จลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อ ลำไยด้วยเครื่องอบแห้ง อินฟราเรดร่วมกับลมร้อน	อินฟราเรดร่วมกับ ลมร้อน	ลำไย	อัตราการแพร่ของอุณหภูมิภายในเนื้อลำไยเพิ่มขึ้นตามการกำลังของอินฟราเรดและอุณหภูมิร้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง แต่ความเร็วลมไม่มีผลต่อระยะเวลาในการอบแห้ง



ชื่อผู้วิจัย	ชื่องานวิจัย	แหล่งความร่วมมือ	วัสดุดิบ	สาระสำคัญ
รัฐพร บัวชม (2547)	การออกแบบแผงเมลิตกาแพสโตโดยใช้ปริมาณความร้อนและลมร้อน	ปริมาณความร้อน และ ฮีตเตอร์ไฟฟ้า	เมลิตกาแพสโต	อัตราการลดลงของความร้อนภายในเมลิตกาแพสโตค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิความร้อน โดยความร้อนไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง
ภราดร หนูทองธีรพงษ์ วุฒิมานรวัฒน์ ปันพะ สงศ์ศิวัช อัจฉริยวิริยะ และคณะอาจารย์ อัจฉริยะ (2551)	การพัฒนาเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ	อินฟราเรดร่วมกับลมร้อน	มันฝรั่ง	การอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่กำลังอินฟราเรดต่ำจะทำให้อิทธิพลของอินฟราเรดมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับผลของอุณหภูมิความร้อนมีผลอย่างมากต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิวัสดุ
รุ่งศิริ และคณะ (2549)	การแผ่รังสีอินฟราเรดสำหรับการอบแห้งเนื้อ	อินฟราเรด	เนื้อวัว	การเพิ่มกำลังของอินฟราเรด การลดความหนาของชิ้นเนื้อ และการลดอัตราการไหลของอากาศจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งส่งผลต่อการหดตัว การเปลี่ยนแปลงสี และค่าความแข็งของเนื้อที่เพิ่มขึ้น
เพชรรัตน์ ใจบุญ (2549)	การศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งลำไยด้วยเทคนิคแบบต่าง ๆ	อินฟราเรดร่วมกับลมร้อน	ลำไย	การใช้อินฟราเรดร่วมกับลมร้อนในการอบแห้งเนื้อลำไยช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งและลดเวลาการอบแห้งลงอย่างมีนัยยะสำคัญ



### บทที่ 3

#### ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานของงานวิจัยนี้แบ่งเป็นขั้นตอนการออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบอบแห้งแบบผสมผสานเพื่อการประหยัดพลังงาน โดยทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลการออกแบบเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความเหมาะสม จากการรวบรวมข้อมูลพบว่าโดยทั่วไปการอบแห้งโดยใช้แหล่งความร้อนเพียงแหล่งเดียวอาจไม่เพียงพอต่อเนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งนาน และอาจสิ้นเปลืองพลังงานในระหว่างการอบแห้งมาก ทั้งนี้สมรรถนะของเครื่องอบแห้งจะขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีแหล่งความร้อนที่ใช้ ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้กับเครื่องอบแห้งจึงต้องใช้แหล่งความร้อนที่มีประสิทธิภาพหลายชนิดมาทำงานร่วมกัน (อนิรุทธิ์ ต่ายขาว และสมบัติ ทีฆทรัพย์, 2556) จากเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่ใช้แหล่งความร้อนที่ผสมผสานเทคโนโลยีปั๊มความร้อน ฮีตเตอร์ไฟฟ้า และหลอดอินฟราเรดเข้าด้วยกัน และทำการทดลองอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร 2 ชนิด ได้แก่ ใบมะกรูด และเห็ดหูหนูดำ เนื่องจากวัตถุประสงค์ดังกล่าวมีจำนวนมากในท้องถิ่น โดยการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งผลิตภัณฑ์พิจารณาจาก ชนิดของแหล่งความร้อน อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงาน และคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้ โดยขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

## การออกแบบและสร้างระบบอบแห้งแบบผสมผสานสำหรับผลิตผลทางการเกษตร

การออกแบบและสร้างระบบอบแห้งแบบผสมผสานสำหรับผลิตผลทางการเกษตรโดยใช้แหล่งความร้อนแบบผสมผสานเพื่อช่วยในการประหยัดพลังงานและลดระยะเวลาการอบแห้งมีขั้นตอนและรายละเอียดการออกแบบดังต่อไปนี้

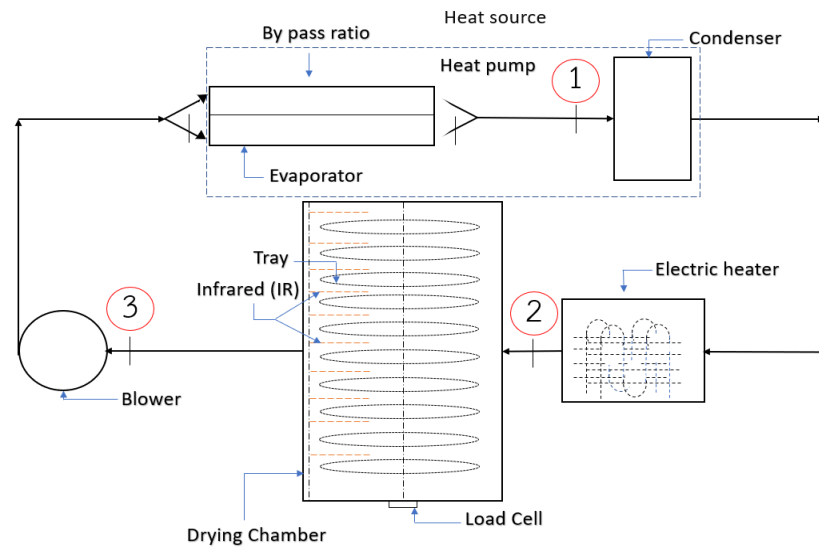
### ขั้นตอนที่ 1 การตั้งสมมติฐานและการกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบ

ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบระบบอบแห้งโดยตั้งสมมติฐานในการออกแบบในกรณี Worst Case Scenario กล่าวคือ ทำการออกแบบระบบอบแห้งโดยกำหนดให้ระบบสามารถรองรับการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรที่มีความชื้นสูงที่สุดที่มีในท้องตลาด (99 %wb) และกำหนดให้ระบบอบแห้งนี้เป็นแบบระบบเปิด (Open system) ซึ่งระบบอบแห้งลักษณะนี้จะทำการระบายอากาศขึ้นที่ระเหยน้ำจากวัตถุดิบออกจากห้องอบแห้งทั้งหมดแล้วเติมอากาศแห้งจากภายนอกผ่านแหล่งความร้อนเพื่อเข้าไประเหยน้ำจากวัตถุดิบต่อไปทำให้ระบบชนิดนี้ใช้พลังงานในการอบแห้งสูงที่สุด จากสมมติฐานข้างต้นจะทำให้แหล่งความร้อนและระบบหมุนเวียนอากาศที่คำนวณได้มีขนาดเพียงพอต่อการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรชนิดต่าง ๆ ได้ครอบคลุมมากที่สุด ทั้งนี้การกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ขนาดห้องอบแห้งที่ต้องการ กว้าง 1.5 m ลึก 1.5 m สูง 2.2 m
2. น้ำหนักและความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบที่ต้องการอบแห้งเท่ากับ 50 kg และ 99 %wb
3. ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ต้องการเท่ากับ 5 %wb (มาตรฐาน ต่ำกว่า 12 %wb)
4. อุณหภูมิความร้อนสูงสุดที่ใช้ในการอบแห้ง 80 °C
5. อุณหภูมิความร้อนหลังการอบแห้ง (ค่าจากการประมาณการ) 70 °C
6. ความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้ง 5 m/s
7. อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 25 °C
8. ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม 60 %
9. ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง 12 h
10. ค่าความปลอดภัย (Factor of Safety) 1.2 (20%)

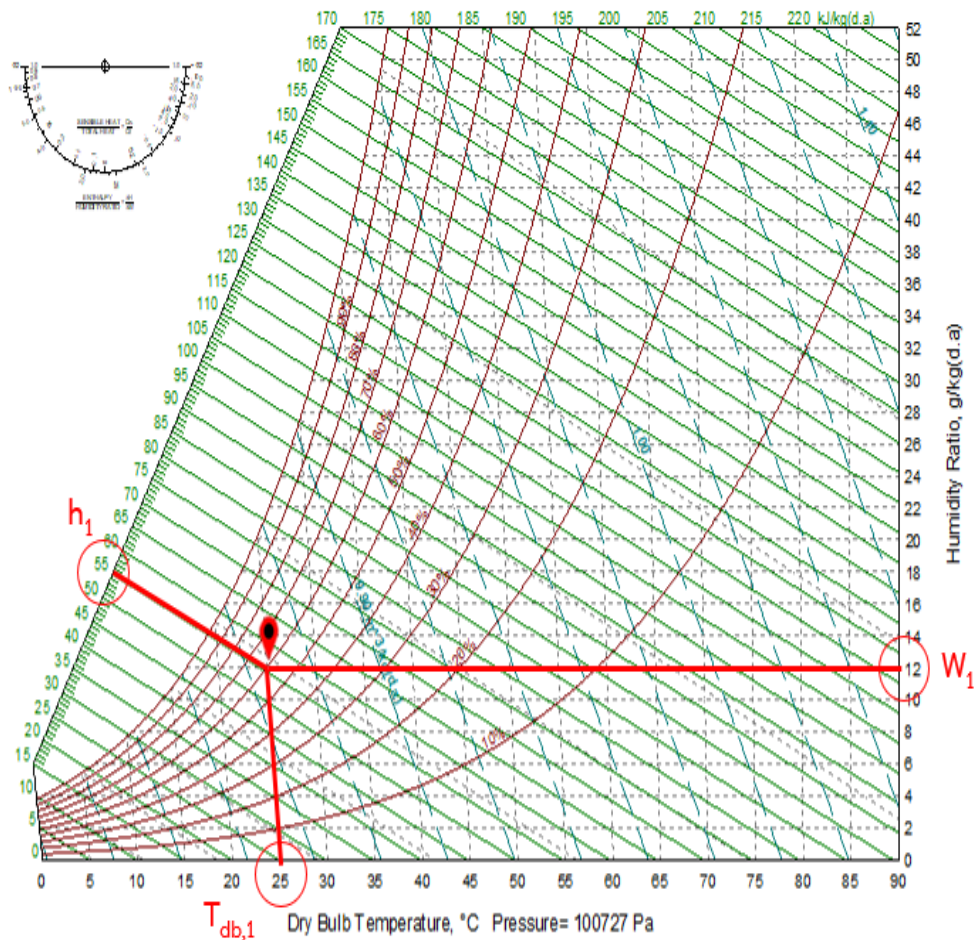
เมื่อทำการกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบเบื้องต้นได้ครอบคลุมความต้องการแล้วผู้ออกแบบจะต้องทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังขั้นตอนต่อไปนี้ (Ian C. Kemp, 2012)

ขั้นตอนที่ 2 รวบรวมข้อมูลสมบัติอากาศ ณ จุดต่าง ๆ ของระบบอบแห้ง ดังภาพที่ 14 ดังนี้



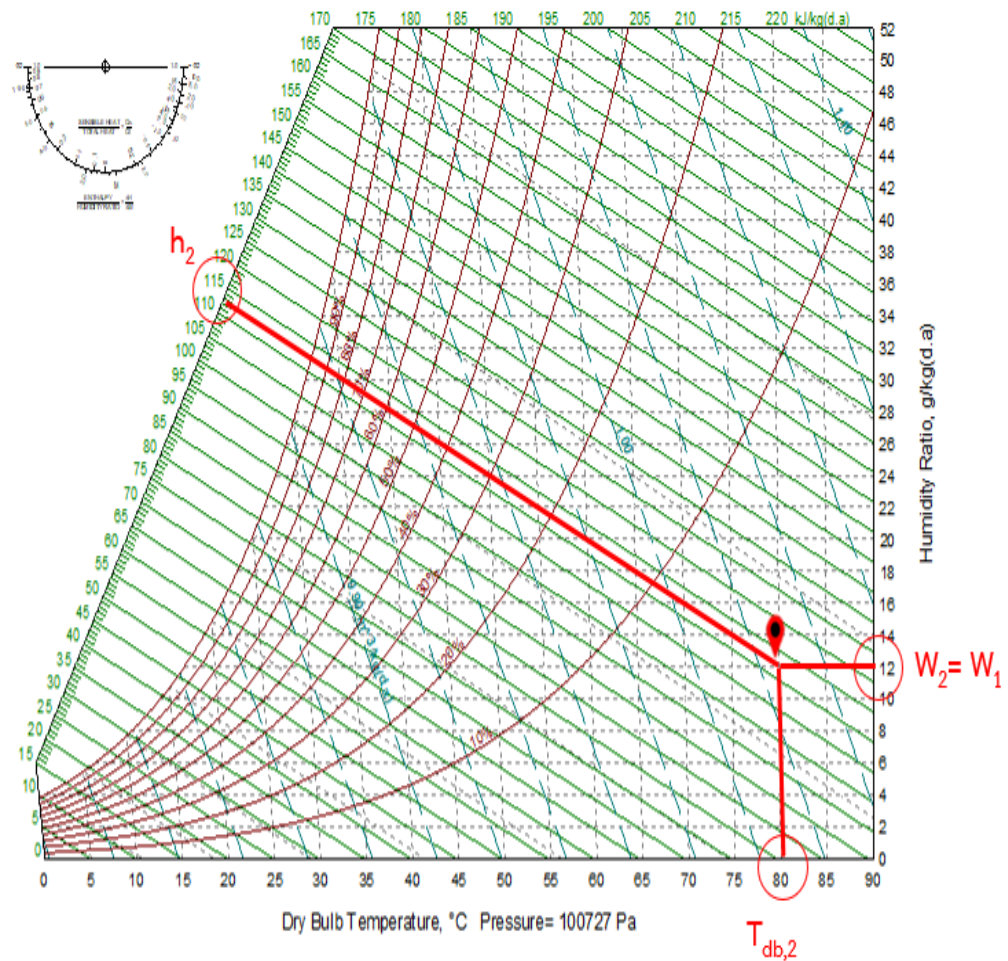
ภาพที่ 14 การพิจารณาสมบัติของอากาศ ณ จุดต่าง ๆ ของระบบอบแห้ง

จุดที่ 1 อากาศแวดล้อมก่อนเข้าระบบอบแห้ง (อากาศก่อนเข้าสู่แหล่งความร้อน) จากเงื่อนไขในการออกแบบที่กำหนดให้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมมีค่าเท่ากับ  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $60\%$  ตามลำดับ เมื่อกำหนดอุณหภูมิกระเปาะแห้งเท่ากับ  $T_{db,1} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์  $RH_1 = 60\%$  ลงบนแผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart) พบว่าที่สภาวะดังกล่าว อากาศอากาศแวดล้อมมีค่าเอนทาลปี  $h_1 = 55.556\text{ kJ/kg}_{dry\ air}$  และค่าอัตราส่วนความชื้น  $w_1 = 0.012\text{ kg}_{water}/\text{kg}_{dry\ air}$  ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 สมบัติของอากาศแวดล้อม

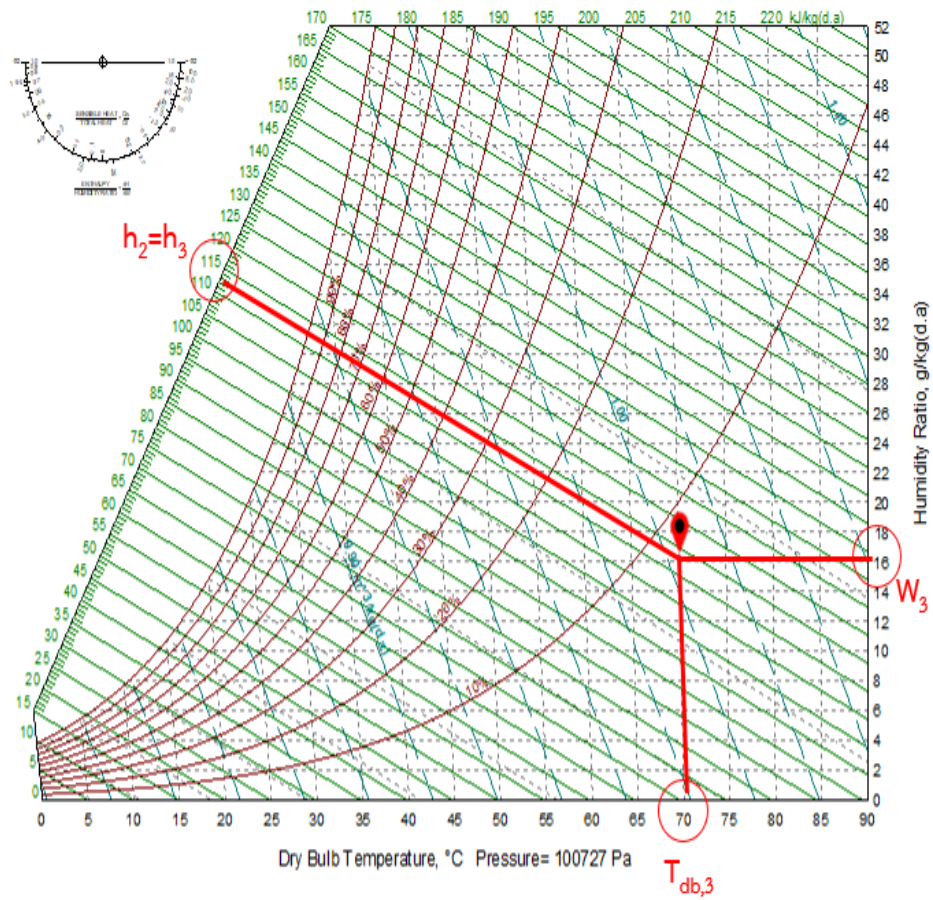
**จุดที่ 2** อากาศร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้ง (อากาศแวดล้อมที่ผ่านแหล่งความร้อน) จากเงื่อนไขในการออกแบบที่กำหนดให้อุณหภูมิร้อนสูงสุดที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าเท่ากับ  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดย ณ จุดนี้ อากาศร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้งจะมีค่าอัตราส่วนความชื้นเท่ากับอากาศแวดล้อม (จุดที่ 1) เมื่อกำหนดอุณหภูมิกระเปาะแห้งเท่ากับ  $T_{db,2} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$  และค่าอัตราส่วนความชื้น  $w_2 = w_1 = 0.012\text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$  ลงบนแผนภูมิอากาศชื้นพบว่าที่สภาวะดังกล่าวอากาศร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้งมีค่าเอนทาลปี  $h_2 = 112.197\text{ kJ}/\text{kg}_{\text{dry air}}$  และอากาศมีค่าปริมาตรจำเพาะ  $v_2 = 1.020\text{ m}^3/\text{kg}_{\text{dry air}}$  ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 สมบัติของอากาศก่อนอบแห้ง

**จุดที่ 3** อากาศชื้นที่ออกจากห้องอบแห้ง จากเงื่อนไขในการออกแบบที่กำหนดให้อุณหภูมิสมร้อนหลังการอบแห้งมีค่าเท่ากับ  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดย ณ จุดนี้อากาศชื้นที่ออกจากห้องอบแห้งจะมีค่าเอนทาลปีเท่ากับอากาศร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้ง (จุดที่ 2) เมื่อกำหนดอุณหภูมิกระเปาะแห้ง  $T_{db,3} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  และค่าเอนทาลปี  $h_3 = h_2 = 112.197\text{ kJ/kg}_{\text{dry air}}$  ลงบนแผนภูมิอากาศชื้นพบว่าที่สภาวะดังกล่าวอากาศชื้นที่ออกจากห้องอบแห้งมีค่าอัตราส่วนความชื้น  $w_3 = 0.016\text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$  ดังภาพที่ 17





ภาพที่ 17 สมบัติของอากาศหลังอบแห้ง

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณน้ำหนักสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้ง

จากเงื่อนไขในการออกแบบที่กำหนดให้น้ำหนักเริ่มต้นของวัตถุดิบ  $W_i = 50$  kg ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ  $M_i = 99$  %wb และความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้ง  $M_f = 5$  %wb ทำการคำนวณน้ำหนักสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้งจากสมการที่ 10 ได้ดังนี้

$$W_f = \frac{W_i(100 - M_i)}{(100 - M_f)} = \frac{50 \text{ kg} (100 - 99)}{(100 - 5)} = 0.526 \text{ kg}$$



#### ขั้นตอนที่ 4 คำนวณปริมาณน้ำที่ต้องระเหยออกจากวัตถุดิบ

ค่าปริมาณน้ำที่ต้องระเหยออกจากวัตถุดิบ ( $m_w$ ) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักเริ่มต้นของวัตถุดิบที่กำหนดไว้ในเงื่อนไขการออกแบบ ( $W_i = 50 \text{ kg}$ ) และค่าน้ำหนักสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้งที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 3 ( $W_f = 0.526 \text{ kg}$ ) ดังสมการที่ 11

$$m_w = 50 \text{ kg} - 0.526 \text{ kg} = 49.474 \text{ kg}_{\text{water}}$$

#### ขั้นตอนที่ 5 คำนวณอัตราการระเหยน้ำระหว่างการอบแห้ง

ค่าอัตราการระเหยน้ำระหว่างการอบแห้ง ( $\dot{m}_w$ ) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำที่ต้องระเหยออกจากวัตถุดิบที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 4 ( $m_w = 49.474 \text{ kg}_{\text{water}}$ ) และระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งซึ่งกำหนดไว้ในเงื่อนไขการออกแบบ ( $t = 12 \text{ h}$ ) ดังสมการที่ 12

$$\dot{m}_w = \frac{49.474 \text{ kg}_{\text{water}}}{12 \text{ h}} = 4.123 \frac{\text{kg}_{\text{water}}}{\text{h}}$$

#### ขั้นตอนที่ 6 คำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ต้องใช้ในการอบแห้ง

ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ต้องใช้ในการอบแห้ง ( $\dot{m}_a$ ) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการระเหยน้ำระหว่างการอบแห้งจากขั้นตอนที่ 5 ( $\dot{m}_w = 4.123 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$ ) และผลต่างของอัตราส่วนความชื้นของอากาศร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้ง (จากขั้นตอนที่ 2;  $w_2 = 0.012 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$ ) และอัตราส่วนความชื้นของอากาศชื้นที่ออกจากห้องอบแห้ง (จากขั้นตอนที่ 2;  $w_3 = 0.016 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$ ) ดังสมการที่ 13

$$\dot{m}_a = \frac{4.123 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}}{(0.016 - 0.012) \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}} = 1,030.75 \frac{\text{kg}_{\text{dry air}}}{\text{h}}$$

### ขั้นตอนที่ 7 คำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ต้องใช้ในการอบแห้ง

ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ต้องใช้ในการอบแห้ง ( $\dot{V}_a$ ) ใช้สำหรับการเลือกขนาดของพัดลมที่จะติดตั้งในระบบอบแห้ง สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 6 ( $\dot{m}_a = 1,030.75 \text{ kg}_{\text{dry air}}/\text{h}$ ) และค่าปริมาตรจำเพาะของอากาศร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้ง (จากขั้นตอนที่ 2;  $v_2 = 1.020 \text{ m}^3/\text{kg}_{\text{dry air}}$ ) ดังสมการที่ 14

$$\dot{V}_a = 1,030.75 \frac{\text{kg}_{\text{dry air}}}{\text{h}} \times 1.020 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{\text{dry air}}} = 1,051.37 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\dot{V}_a = 1,051.37 \text{ m}^3/\text{h} \approx 620 \text{ CFM}$$

ดังนั้นระบบอบแห้งที่ทำการออกแบบจะต้องติดตั้งพัดลมที่มีศักยภาพในการเติมอากาศเข้าสู่ห้องอบแห้งได้ไม่ต่ำกว่า  $1,051.37 \text{ m}^3/\text{h}$  หรือประมาณ 620 CFM

### ขั้นตอนที่ 8 คำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ระบบอบแห้งต้องการ

ค่าพลังงานความร้อนที่ระบบอบแห้งต้องการ ( $Q_{\text{dryer}}$ ) สามารถคำนวณได้จากค่าพลังงานที่ต้องใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศแวดล้อมก่อนเข้าแหล่งความร้อน (จากเงื่อนไขในการออกแบบ  $T_{\text{db},1} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ให้มีค่าอุณหภูมิสูงขึ้นเท่ากับอุณหภูมิลมร้อนสูงสุดที่ใช้ในการอบแห้ง (จากเงื่อนไขในการออกแบบ  $T_{\text{db},2} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ) โดยการคำนวณจะพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ต้องใช้ในการอบแห้งจากขั้นตอนที่ 6 ( $\dot{m}_a = 1,030.75 \frac{\text{kg}_{\text{dry air}}}{\text{h}}$ ) และผลต่างของเอนทาลปีของอากาศแวดล้อม (จากขั้นตอนที่ 2;  $h_1 = 55.556 \text{ kJ}/\text{kg}_{\text{dry air}}$ ) และอากาศร้อนที่ออกจากแหล่งความร้อน (จากขั้นตอนที่ 2;  $h_2 = 112.197 \text{ kJ}/\text{kg}_{\text{dry air}}$ ) ดังสมการที่ 15

$$Q_{\text{dryer}} = 1,030.75 \frac{\text{kg}_{\text{dry air}}}{\text{h}} \times \frac{(112.197 - 55.556) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{dry air}}}}{3,600 \frac{\text{s}}{\text{h}}}$$

$$Q_{\text{dryer}} = 16.22 \text{ kW}$$

### ขั้นตอนที่ 9 การเพื่อความปลอดภัยเชิงวิศวกรรม

จากข้อแนะนำในการเลือกใช้ค่าความปลอดภัย (SF) ในงาน Thermal design ที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายถึงชีวิตจะอยู่ในช่วง 10 % - 50 % (T. Driscoll and B. Johnson, 2009) ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้ค่าความปลอดภัย SF = 1.2 (20%) ในการคำนวณ ทำให้ขนาดของแหล่งความร้อนที่ออกแบบ ( $Q_{\text{design}}$ ) สำหรับระบบอบแห้งนี้สามารถคำนวณได้จากผลคูณของค่าพลังงานงานความร้อนที่ระบบอบแห้งต้องการ ( $Q_{\text{dryer}}$ ) จากการคำนวณในขั้นตอนที่ 8 และความปลอดภัยเชิงวิศวกรรม ดังสมการที่ 16

$$Q_{\text{design}} = Q_{\text{dryer}} \times \text{Safety Factor (SF)}$$

$$Q_{\text{design}} = 16.22 \text{ kW} \times 1.2 = 19.46 \text{ kW} \approx 20 \text{ kW}$$

จากคำนวณเพื่อการออกแบบทั้ง 9 ขั้นตอนข้างต้นสามารถสรุปผลการออกแบบเชิงวิศวกรรม สำหรับการเลือกใช้อุปกรณ์ การกำหนดขนาดแหล่งความร้อน และการสร้างระบบอบแห้งแบบผสมผสานในงานวิจัยนี้สามารถสรุปรายละเอียดในการออกแบบได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดในการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบผสมผสาน

รายละเอียดในการออกแบบ	พิกัดออกแบบ
ขนาดห้องอบที่ทำการออกแบบ	กว้าง 1.5 m ลึก 1.5 m สูง 2.2 m
น้ำหนักเริ่มต้นของวัตถุดิบ (kg)	50
ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (%wb)	99
ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้ง (%wb)	5
อุณหภูมิความร้อนสูงสุดที่ใช้ในการอบแห้ง (°C)	80
ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)	12
อัตราการระเหยน้ำ (kg/h)	4.123
ปริมาณอากาศที่ต้องใช้ในการอบแห้ง (m <sup>3</sup> /h)	1,051.37 (620 CFM)
พลังงานความร้อนที่ต้องการ (kW)	16.22
พิกัดแหล่งความร้อนออกแบบ (SF 20%) (kW)	20

## การเลือกอุปกรณ์และการสร้างเครื่องอบแห้ง

### แหล่งความร้อนของระบบอบแห้งแบบผสมผสาน

จากการคำนวณตามเงื่อนไขการออกแบบข้างต้นพบว่าเครื่องอบแห้งต้องการพลังงานความร้อนรวมเท่ากับ 20 kW โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการบูรณาการเทคโนโลยีปั๊มความร้อน (Heat Pump) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูง พร้อมทั้งเสริมสมรรถนะของปั๊มความร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric Heater) เพื่อช่วยเพิ่มอุณหภูมิให้กับลมร้อนหากมีความจำเป็นต้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอุณหภูมิสูงกว่าข้อจำกัดดังกล่าว และเพิ่มศักยภาพในการผลิตโดยได้บูรณาการเทคโนโลยีการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared) ซึ่งมีอัตราการให้ความร้อนที่รวดเร็ว โดยอุปกรณ์ทั้งสามชนิดดังกล่าวจะทำงานแยกกันหรือทำงานพร้อมกันแบบผสมผสานก็ได้ตามแต่สถานะในการอบแห้งที่ผู้วิจัยกำหนด ทั้งนี้รายละเอียดในการเลือกติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อเป็นแหล่งความร้อนให้กับเครื่องอบแห้งแบบผสมผสานในงานวิจัยนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### ปั๊มความร้อน (Heat Pump)

งานวิจัยนี้เลือกใช้ปั๊มความร้อนที่มีขนาดกำลังไฟฟ้าจ่าย (Power input) ขนาด 5.5 kW<sub>electric</sub> ดังภาพที่ 18 ใช้สารทำความเย็นชนิด R134a ปริมาณ 2 kg เป็นสารทำงาน ระบบปั๊มความร้อนนี้ติดตั้งเครื่องอัดไอ (Compressor) แบบก้นหอย (ภาพที่ 19) หรือ สโครล (Scroll type compressor) ใช้ระบบไฟฟ้าแบบ 3 Phase ความถี่ 50 Hz แรงดันไฟฟ้า 380 V กระแสไฟฟ้า 11 A มีความดันสารทำความเย็นขณะทำงานสูงสุด 3.01 MPa โดยส่วนควบแน่น (Condenser) ซึ่งมีหน้าที่ผลิตลมร้อนและส่วนทำระเหย (Evaporator) ซึ่งมีหน้าที่ลดความชื้นของอากาศป้อนเข้ามีลักษณะเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อและครีป (Finned-tube) สร้างจากท่อทองแดงรูปตัวยู (U) ติดตั้งแผ่นทองเหลืองบางอัดเป็นครีป (Fin) เพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน อุปกรณ์ทั้งสองมีขนาด 0.65 m x 1.25 m ดังภาพที่ 20 และ 21 ตามลำดับ ระบบปั๊มความร้อนนี้มีกำลังการผลิตความร้อน (Heating capacity) และกำลังการผลิตความเย็น (Cooling capacity) เท่ากับ 10.5 kW<sub>thermal</sub> และ 7.80 kW<sub>thermal</sub> ตามลำดับ ระบบนี้สามารถผลิตลมร้อนที่มีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 80 °C ที่อัตราการไหลของอากาศผ่านส่วนควบแน่นสูงสุดเท่ากับ 23,600 m<sup>3</sup>/h และสามารถควบแน่นความชื้น (Dehumidify capacity) ได้สูงสุดเท่ากับ 12 l/h โดยระบบปั๊มความร้อนนี้มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 5.50 kWh/h



ภาพที่ 18 ป้อนความร้อนขนาดกำลังการผลิตความร้อน (Heating capacity) 10.5 kW



ภาพที่ 19 เครื่องอัดไอ (Compressor) แบบก้านหอย





ภาพที่ 20 ส่วนควบแน่น (Condenser)



ภาพที่ 21 ส่วนทำระเหย (Evaporator)



### ฮีตเตอร์ไฟฟ้า

งานวิจัยนี้เลือกใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric Heater) ชนิดท่อและครีป (Finned-tube) สลักจากโลหะสแตนเลสอัดรูปตัวยู (U) จำนวน 4 กลีบ ติดตั้งแผ่นอะลูมิเนียมบางอัดเป็นครีป (Fin) ขนาด  $0.55 \text{ m} \times 0.95 \text{ m}$  เพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน ฮีตเตอร์ไฟฟ้าใช้กำลังไฟฟ้า (Power input) รวม  $18.0 \text{ kW}_{\text{electric}}$  ทำงานด้วยระบบไฟฟ้าแบบ 3 Phase ความถี่ 50 Hz แรงดันไฟฟ้า 380V กระแสไฟฟ้า 11 A สามารถผลิตความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ  $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่อัตราการไหลของอากาศผ่านครีปสูงสุดเท่ากับ  $18,000 \text{ m}^3/\text{hr}$  โดย ทั้งนี้ระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าในงานวิจัยนี้มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ  $15 \text{ kWh/h}$  เมื่อคำนวณจากประสิทธิภาพของฮีตเตอร์ไฟฟ้าประมาณ 80% จะสามารถคิดเป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากฮีตเตอร์ไฟฟ้านี้เท่ากับ  $14.4 \text{ kW}_{\text{thermal}}$  โดยฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาดกำลังไฟฟ้าจ่าย (Power input) รวม 14.5 kW

### หลอดอินฟราเรด (Infrared Heater)

งานวิจัยนี้เลือกใช้หลอดอินฟราเรดแบบใช้ไฟฟ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm ยาว 45 cm ใช้กำลังไฟฟ้าจ่าย (Power input) หลอดละ  $500 \text{ kW}_{\text{electric}}$  จำนวน 10 หลอด ติดตั้งภายในคอมสสะท้อนรังสีซึ่งติดตั้งไว้เหนือถาดอบแห้ง โดยคอมสสะท้อนรังสีนี้ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางของรังสีอินฟราเรดให้พุ่งตรงสู่ผลิตภัณฑ์ การให้ความร้อนด้วยระบบอินฟราเรดในงานวิจัยนี้นั้นสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้า (Power input) ได้ในช่วง  $0 \text{ W} - 500 \text{ W}$  โดยอุณหภูมิสูงสุดที่หลอดอินฟราเรดสามารถทำได้มีค่ามากกว่า  $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีค่าสูงเกินความจำเป็นในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

เพราะจะทำให้เกิดการไหม้ได้ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการเสียหายของผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ถูกรังสีอินฟราเรดกระทบเป็นระยะเวลานาน ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบถาดอบแห้งให้สามารถหมุนได้เพื่อให้ผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ผ่านรังสีอินฟราเรดด้วยระยะเวลาที่กำหนด เมื่อคำนวณจากประสิทธิภาพของหลอดอินฟราเรดประมาณ 80% จะสามารถคิดเป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากหลอดอินฟราเรดชุดนี้เท่ากับ  $4 \text{ kW}_{\text{thermal}}$  โดยการติดตั้งหลอดอินฟราเรดแบบไฟฟ้าพร้อมคอมสสะท้อนรังสีในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 การติดตั้งหลอดอินฟราเรดไฟฟ้าพร้อมคอมสสะท้อนรังสี

#### ระบบหมุนเวียนและกระจายอากาศ

ระบบหมุนเวียนอากาศภายในห้องอบแห้งมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับระบบอบแห้งเนื่องจากอากาศร้อนจะพาความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการอบแห้ง ความชื้นนี้จำเป็นต้องถูกนำออกจากห้องอบแห้งให้มากที่สุดเพื่อกระตุ้นการระเหยของน้ำอิสระที่ผิวของวัสดุอบแห้ง ดังนั้นระบบหมุนเวียนอากาศจำเป็นต้องทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและทนต่อความชื้นของอากาศ อีกทั้งต้องสามารถปรับเปลี่ยนค่าอัตราการไหลหรือความเร็วลมได้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้อย่างหลากหลาย งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบระบบหมุนเวียนอากาศด้วยท่อลมที่สร้างจากวัสดุสแตนเลสเกรด 304 (SUS 304) ถู้ออกแบบให้มีลักษณะสี่เหลี่ยมพื้นผ้าเพื่อง่ายต่อการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าตรวจวัดและควบคุม โดยท่อลมนี้ออกแบบมาด้วยขนาดหน้าตัดเท่ากับ  $65.00 \text{ cm} \times 75.00 \text{ cm}$  ความยาวโดยรวมประมาณ 480 cm ดังภาพที่ 24 ผนังของท่อลมทำการติดตั้งฉนวนกันความร้อนตลอดช่วงความยาวเพื่อลดการสูญเสียพลังงาน ในส่วนของระบบกระจาย

ทิศทางการร่อนนั้นผู้วิจัยได้ออกแบบชุดกระจายลมเพื่อบังคับให้กระแสลมร้อนเคลื่อนที่ในทิศทางที่กำหนดเหนือถาดอบแห้งดังภาพที่ 25 ลมร้อนภายในระบบอบแห้งถูกหมุนเวียนโดยใช้พัดลมชนิดอากาศไหลตามแนวแกน (Axial flow fan) แบบใช้ไฟฟ้าระบบ 3 Phase แรงดันไฟฟ้า 380 V กำลังไฟฟ้าสูงสุด 250 W ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดเท่ากับ 0.3 m จำนวน 3 ตัว โดยพัดลมแต่ละตัวมีสมรรถนะในการหมุนเวียนอากาศได้ในช่วง 1,600 - 2,950 m<sup>3</sup>/h โดยเมื่อทำงานพร้อมกันทั้ง 3 ตัวจะสร้างความเร็วลมเหนือชั้นวัสดุอบแห้งได้สูงสุดประมาณ 3 m/s ทั้งนี้ผู้วิจัยยังได้ติดตั้งอินเวอร์เตอร์ (Inverter) สำหรับปรับค่าความเร็วลมให้ได้ตามต้องการ โดยพัดลมที่ใช้ในการหมุนเวียนอากาศภายในระบบอบแห้งของงานวิจัยนี้แสดงดังภาพที่ 26



ภาพที่ 24 ระบบท่อหมุนเวียนลมร้อน





ภาพที่ 25 ชุดกระจายลมร้อน



ภาพที่ 26 การติดตั้งพัดลมสำหรับหมุนเวียนอากาศภายในระบบบอบแห้ง

### ห้องอบแห้งและถาดอบแห้ง

ห้องอบแห้งถูกออกแบบให้สามารถจัดเรียงวัตถุได้ทั้งแบบแขวนและจัดเรียงภายในถาด ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบห้องอบแห้งให้อากาศร้อนสามารถเคลื่อนที่แบบไหลเวียนผ่านผิว (Concurrent Flow) ซึ่งควบคุมการอัตราการไหลของลมร้อนหรือความเร็วลมให้ไหลขนานกับผิวของผลิตภัณฑ์ได้ตามต้องการในช่วง 0 - 3 m/s ห้องอบแห้งถูกออกแบบให้มีขนาดกว้าง 150 cm ลึก 150 cm และสูง 220 cm ติดตั้งประตูขนาดกว้าง 100 cm สูง 200 cm และหนา 5 cm ชั้นส่วนทั้งหมดสร้างจากวัสดุสแตนเลสเกรด 304 (SUS 304) ทำการติดตั้งฉนวนกันความร้อนทั้งระบบเพื่อลดการสูญเสียพลังงาน ภายในห้องอบแห้งติดตั้งถาดอบแห้งแบบวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 cm จำนวน 10 ถาด โดยถาดอบแห้งจะถูกยึดกับเพลาหมุนขนาด 50 mm ซึ่งถูกขับเคลื่อนด้วยระบบเฟืองทดเพิ่มแรงบิดที่ติดตั้งไว้ที่ส่วนบนของห้องอบแห้ง ระบบเฟืองทดนี้มีหน้าที่หมุนถาดอบแห้งเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุไว้ในถาดดังกล่าวได้รับลมร้อนและรังสีอินฟราเรดอย่างทั่วถึงด้วยความเร็วรอบที่กำหนด โดยการออกแบบห้องอบแห้ง การติดตั้งถาดอบแห้ง และระบบหมุนถาดแสดงดังภาพที่ 27 ถึง 35



ภาพที่ 27 ห้องอบแห้งที่ติดตั้งถาดหมุนจำนวน 10 ถาด



ภาพที่ 28 ถาดอบแห้งแบบวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 cm

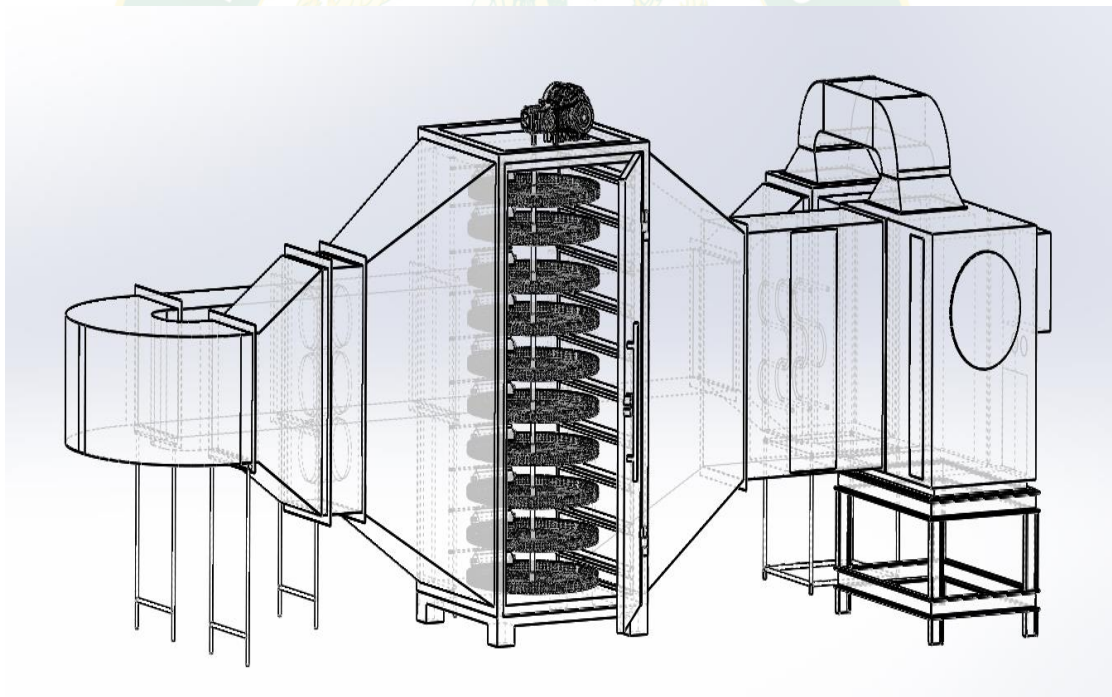


ภาพที่ 29 เพลลาหมุนถาด

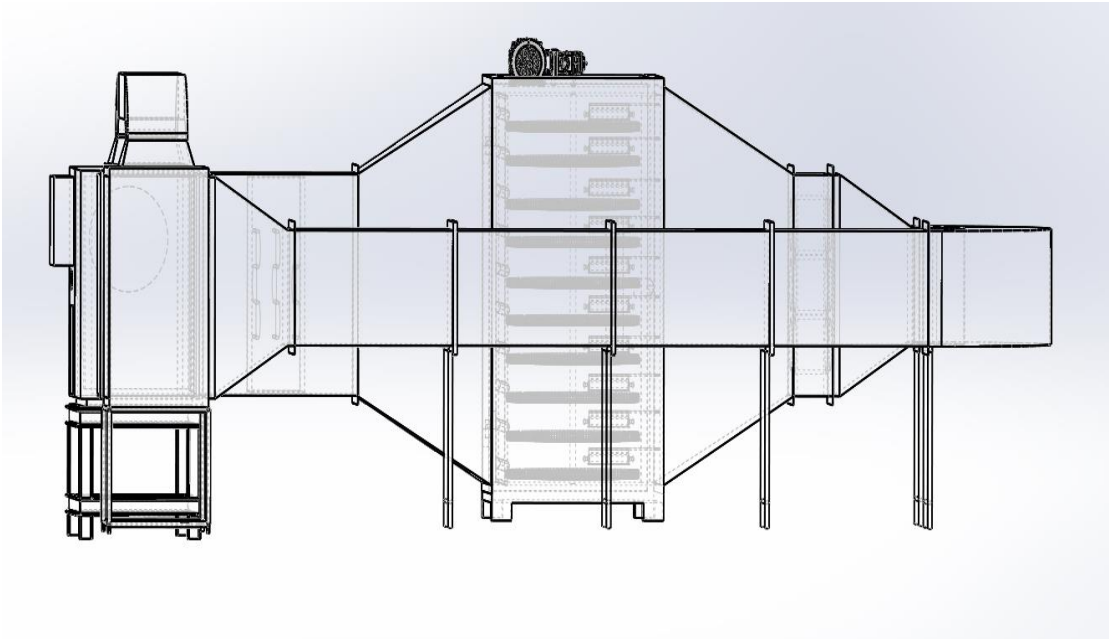




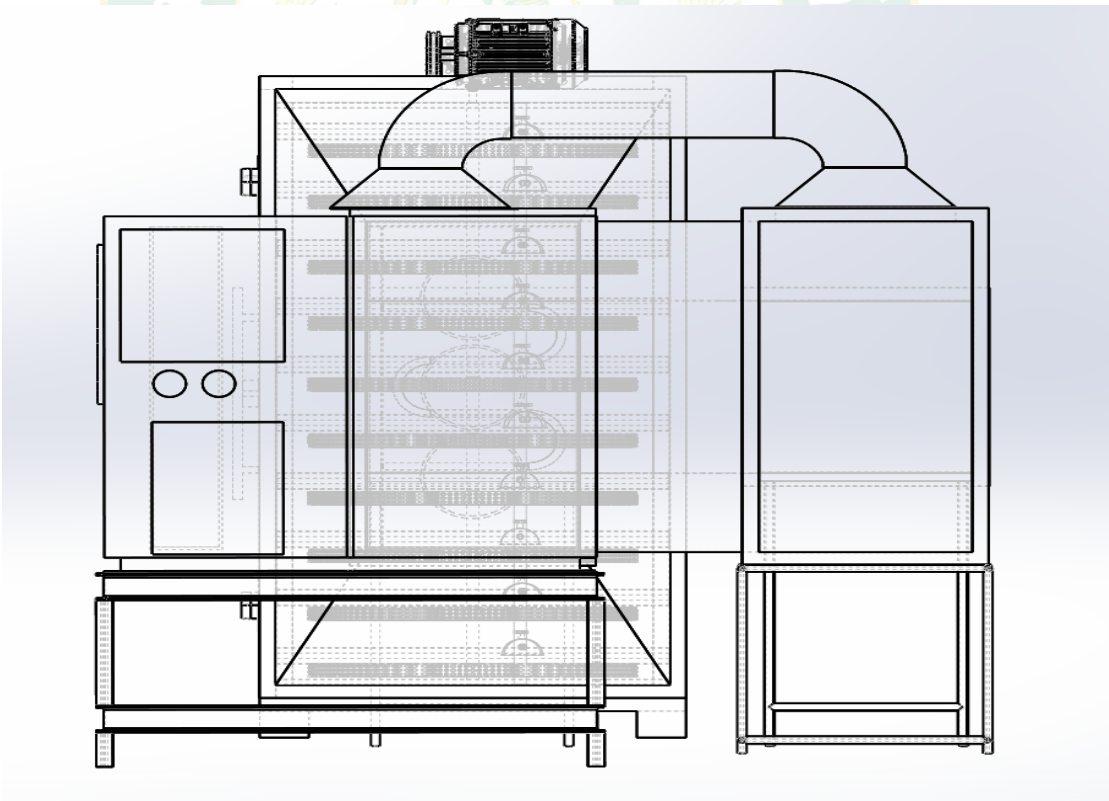
ภาพที่ 30 ระบบเพื่อทดปรับความเร็วรอบของถาดหมุน



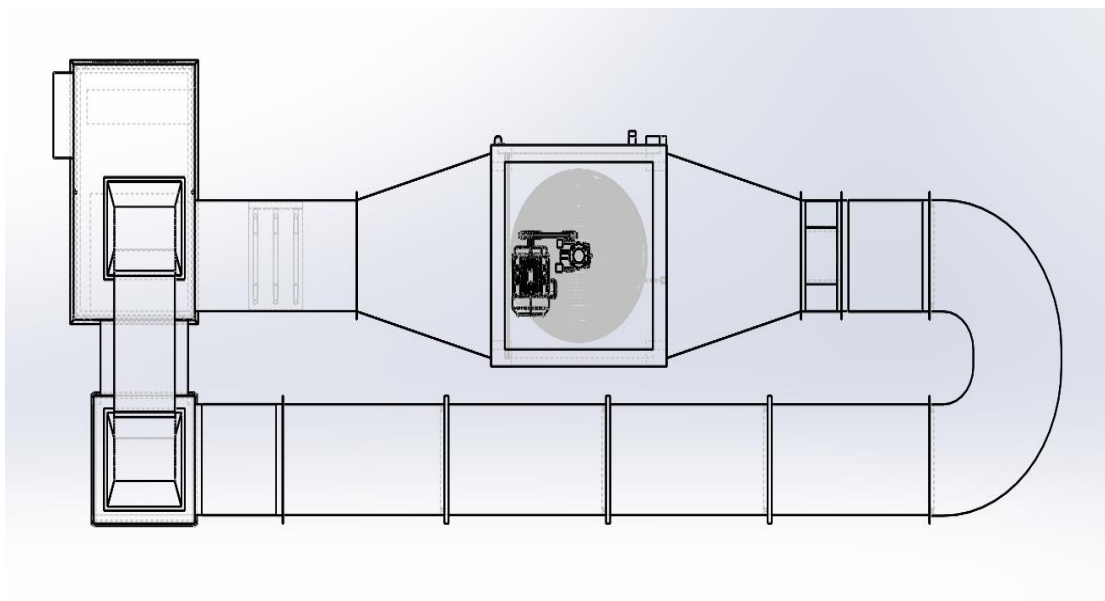
ภาพที่ 31 เครื่องอบแห้งแบบผสมผสานด้านหน้า



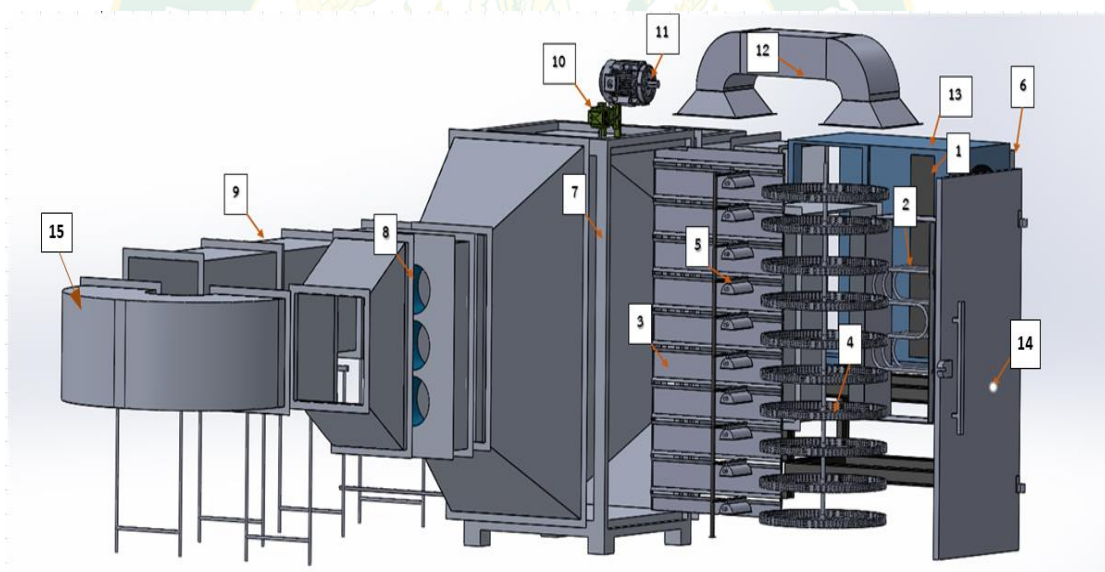
ภาพที่ 32 เครื่องอบแห้งแบบผสมผสานด้านหลัง



ภาพที่ 33 เครื่องอบแห้งแบบผสมผสานด้านข้าง



ภาพที่ 34 เครื่องอบแห้งแบบผสมผสานด้านบน



ภาพที่ 35 ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งแบบผสมผสาน

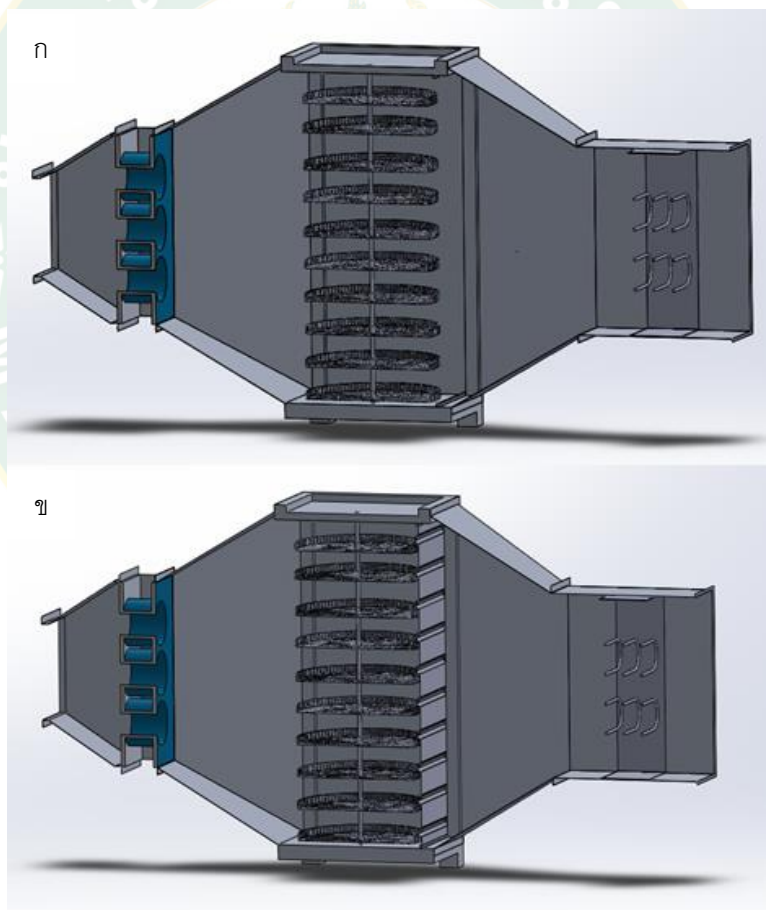
1. ช่องระบายอากาศของปั๊มความร้อน 2. ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric Heater)
3. ช่องกระจายลมร้อน 4. ถาดวางผลิตภัณฑ์แบบหมุน 5. หลอดอินฟราเรด (Infrared Heater),
6. ชุดควบคุม 7. ห้องอบแห้ง 8. พัดลม 9. ท่อหมุนเวียนอากาศ 10. เฟืองทดปรับความเร็วรอบ
11. มอเตอร์หมุนถาดอบแห้ง 12. ช่องระบายอากาศขึ้น 13. ปั๊มความร้อน (Heat Pump)
14. ประตูฉนวนกันความร้อน และ 15. แผ่นคุมปริมาณการระบายอากาศขึ้น

### ขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) การศึกษาแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ 2) การทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง และ 3) การทดลองอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร โดยการทดลองแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### การทดลองส่วนที่ 1 การศึกษาการแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

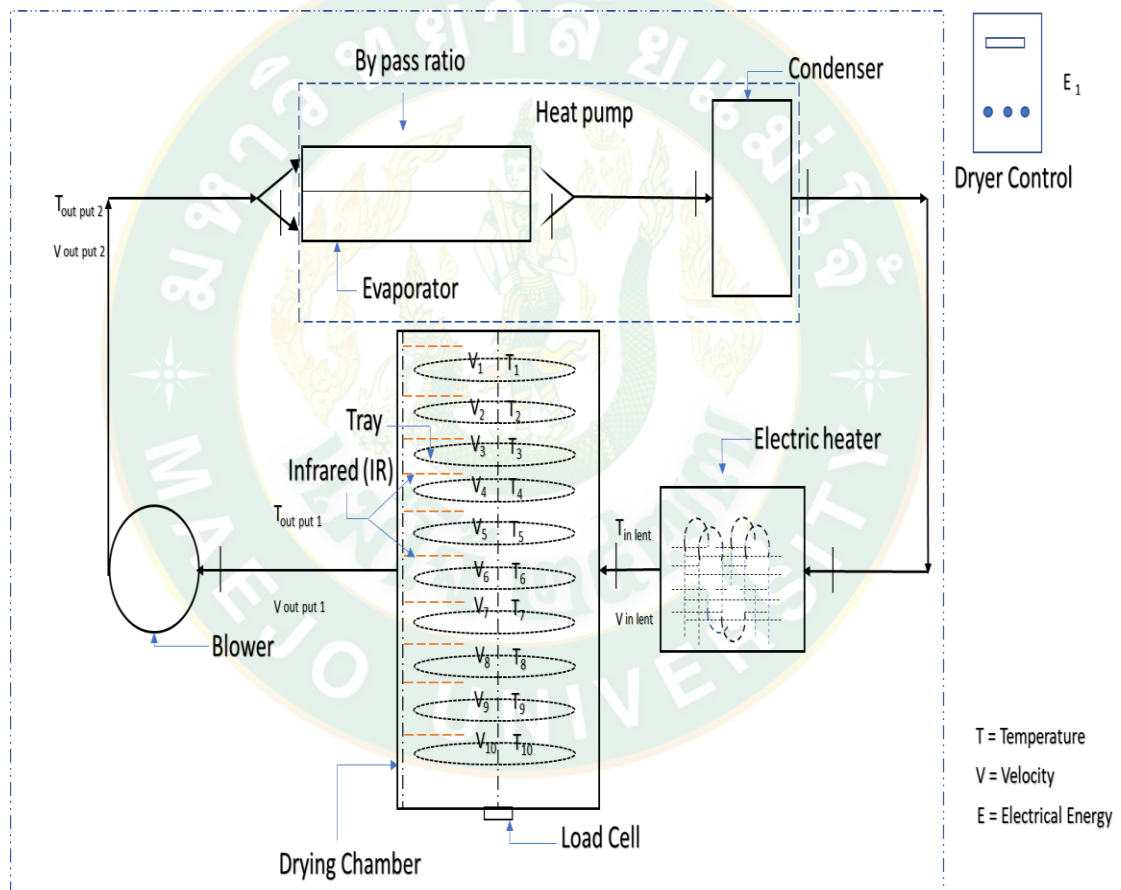
การศึกษาการแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม SolidWorks Flow Simulation เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการเคลื่อนที่ ทิศทางการไหล การกระจายตัว และอุณหภูมิของอากาศภายในห้องอบแห้งที่ไม่ติดตั้งช่องกระจายลมร้อน (ภาพที่ 36 ก) และอบแห้งที่ติดตั้งช่องกระจายลมร้อน (ภาพที่ 36 ข)



ภาพที่ 36 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับ  
โปรแกรม SolidWorks Flow Simulation

## การทดลองส่วนที่ 2 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

การทดลองส่วนนี้จะทำการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งที่สร้างแล้วเสร็จโดยทำการตรวจวัดอุณหภูมิและความเร็วลมบริเวณเหนือถาดอบแห้งแต่ละชั้น และบริเวณท่อทางเดินอากาศจุดต่าง ๆ ดังภาพที่ 37 ทั้งนี้จะทำการตรวจวัดค่าทั้งกรณีห้องอบแห้งที่ไม่ติดตั้งและติดตั้งช่องกระจายลมร้อนโดยทำการติดตั้งประตูกันลมเพื่อจำลองสภาวะการทำงานจริงของเครื่องอบแห้งก่อนการตรวจวัดดังแสดงในภาพที่ 38 อีกทั้งทำการทดสอบสมรรถนะด้านต่าง ๆ ในเชิงวิศวกรรม ได้แก่ อุณหภูมิลมร้อนสูงสุดที่ระบบสามารถผลิตได้ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate) อัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด เป็นต้น



ภาพที่ 37 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและความเร็วลมภายในห้องอบแห้ง





ภาพที่ 38 การติดตั้งประตูกันลมเพื่อจำลองสภาวะการทำงานจริงของเครื่องอบแห้ง และการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

### การทดลองส่วนที่ 3 การทดลองอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรทั้งสิ้น 2 ชนิด ได้แก่ ใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำ ซึ่งกำหนดให้อุณหภูมิความร้อนและความเร็วลมอยู่ในช่วง 50 °C ถึง 70 °C และ 1 m/s ถึง 2 m/s ตามลำดับ โดยใช้แหล่งความร้อน 3 ชนิด ได้แก่ 1) ปั๊มความร้อน (Heat Pump) 2) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric Heater) 3) อินฟราเรด (Infrared) โดยจากขอบเขตการวิจัยที่ได้รับระบุไว้ข้างต้นสามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 7 การทดลองดังต่อไปนี้

**การทดลองที่ 1** ทำการทดลองอบแห้งใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำด้วยลมร้อนที่มีอุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 50 °C, 55 °C, 65 °C และ 70 °C ตามลำดับ ในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบมาตรฐาน ยี่ห้อ Binder รุ่น DIN 12880 ขนาด 1.30 kW เพื่อทราบถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรทั้งสองชนิดดังกล่าวด้วยลมร้อน



**การทดลองที่ 2** ทำการทดลองอบแห้งใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำด้วยอินฟราเรด (Infrared) โดยกำหนดกำลังไฟฟ้าจ่าย (Input Power) 3 ค่า ได้แก่ 300 W, 400 W และ 500 W ตามลำดับ ด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ ในการทดลองจะกำหนดความเร็วรอบพัดลมและความเร็วลมคงที่เท่ากับ 7 RPM และ 1.5 m/s ตามลำดับ เพื่อทราบถึงกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมในการอบแห้งวัสดุทั้งสองชนิดดังกล่าวด้วยอินฟราเรด

**การทดลองที่ 3** ทำการทดลองอบแห้งใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำด้วยระบบอบแห้งแบบผสมผสานที่ออกแบบและสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยกำหนดเงื่อนไขการทดลองดังนี้

- อุณหภูมิลมร้อน           เท่ากับอุณหภูมิลมร้อนที่เหมาะสมกับวัตถุดิบต่าง ๆ จากการทดลองที่ 1
- ความเร็วลม                   คงที่ เท่ากับ 1.5 m/s
- แหล่งความร้อน 1           ปั๊มความร้อน (Heat Pump)
- แหล่งความร้อน 2           ไม่ใช่
- แหล่งความร้อน 3           ไม่ใช่

**การทดลองที่ 4** ทำการทดลองอบแห้งใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำด้วยระบบอบแห้งแบบผสมผสานที่ออกแบบและสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยกำหนดเงื่อนไขการทดลองดังนี้

- อุณหภูมิลมร้อน           เท่ากับอุณหภูมิลมร้อนเหมาะสมจากการทดลองที่ 1
- ความเร็วลม                   คงที่ เท่ากับ 1.5 m/s
- แหล่งความร้อน 1           ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric Heater)
- แหล่งความร้อน 2           ไม่ใช่
- แหล่งความร้อน 3           ไม่ใช่

**การทดลองที่ 5** ทำการทดลองอบแห้งใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำด้วยระบบอบแห้งแบบผสมผสานที่ออกแบบและสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยกำหนดเงื่อนไขการทดลองดังนี้

- อุณหภูมิลมร้อน           เท่ากับอุณหภูมิลมร้อนเหมาะสมจากการทดลองที่ 1
- ความเร็วลม                   คงที่ เท่ากับ 1.5 m/s
- แหล่งความร้อน 1           ปั๊มความร้อน (Heat Pump)
- แหล่งความร้อน 2           ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric Heater)
- แหล่งความร้อน 3           ไม่ใช่

**การทดลองที่ 6** ทำการทดลองอบแห้งใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำด้วยระบบอบแห้งแบบผสมผสานที่ ออกแบบและสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยกำหนดเงื่อนไขการทดลองดังนี้

- อุณหภูมิลมร้อน           เท่ากับอุณหภูมิลมร้อนเหมาะสมจากการทดลองที่ 1
- ความเร็วลม                 คงที่ เท่ากับ 1.5 m/s
- แหล่งความร้อน 1         ปั๊มความร้อน (Heat Pump)
- แหล่งความร้อน 2         อินฟราเรด (Infrared) ใช้กำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2
- แหล่งความร้อน 3         ไม่มี

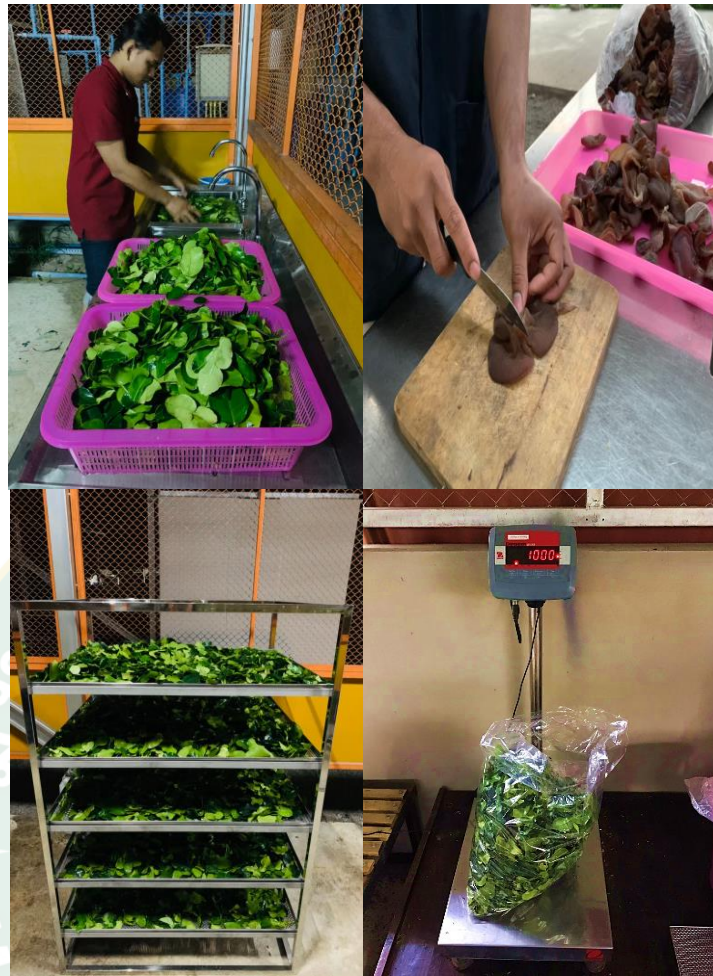
**การทดลองที่ 7** ทำการทดลองอบแห้งใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำด้วยระบบอบแห้งแบบผสมผสานที่ ออกแบบและสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยกำหนดเงื่อนไขการทดลองดังนี้

- อุณหภูมิลมร้อน           เท่ากับอุณหภูมิลมร้อนเหมาะสมจากการทดลองที่ 1
- ความเร็วลม                 คงที่ เท่ากับ 1.5 m/s
- แหล่งความร้อน 1         ปั๊มความร้อน (Heat Pump)
- แหล่งความร้อน 2         ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric Heater)
- แหล่งความร้อน 3         อินฟราเรด (Infrared) ใช้กำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2

#### **การเตรียมผลผลิตทางการเกษตรเพื่อการทดลองอบแห้ง**

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรทั้งสิ้น 2 ชนิด ได้แก่ ใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำซึ่งสามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด ทั้งนี้วัตถุดิบดังกล่าวยังคงมีสิ่งเจือปนจากขั้นตอนการเก็บเกี่ยวจึงจำเป็นต้องทำการเตรียมวัตถุดิบให้พร้อมสำหรับกระบวนการอบแห้ง โดยขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

**ขั้นตอนที่ 1** นำใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำที่เก็บเกี่ยวใหม่มาคัดเลือกคุณภาพที่เหมาะสมต่อการผลิต เป็นผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้ง โดยทำการคัดขนาด ความสมบูรณ์ และสีสันของวัตถุดิบให้มีความใกล้เคียงกัน จากนั้นล้างวัตถุดิบด้วยน้ำสะอาด 2 ครั้ง แล้วนำไปผึ่งให้น้ำบริเวณผิวสัมผัสด้านนอกของวัตถุดิบแห้งแล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อเก็บข้อมูลก่อนทำการอบแห้ง



ภาพที่ 39 การเตรียมวัตถุดิบในการอบแห้ง

ขั้นตอนที่ 2 วิเคราะห์สมบัติทางอาหารของวัตถุดิบ ได้แก่ 1) ค่าความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบโดยใช้เครื่อง Moisture Analyzer และ 2) ค่าสีของของวัตถุดิบโดยใช้เครื่อง Spectrophotometer



ภาพที่ 40 หาความชื้นเริ่มต้นของใบมะกรูดและเห็ดหูหนู



**ขั้นตอนที่ 3** เตรียมความพร้อมของระบบอบแห้งโดยการตั้งอุณหภูมิ และปรับอัตราการไหลของอากาศ และความเร็วยรอบพัดลมให้ได้ตามต้องการ รวมถึงการเตรียมเครื่องบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ให้พร้อมสำหรับการทดลอง



ภาพที่ 41 การเตรียมความพร้อมของเครื่องอบแห้ง

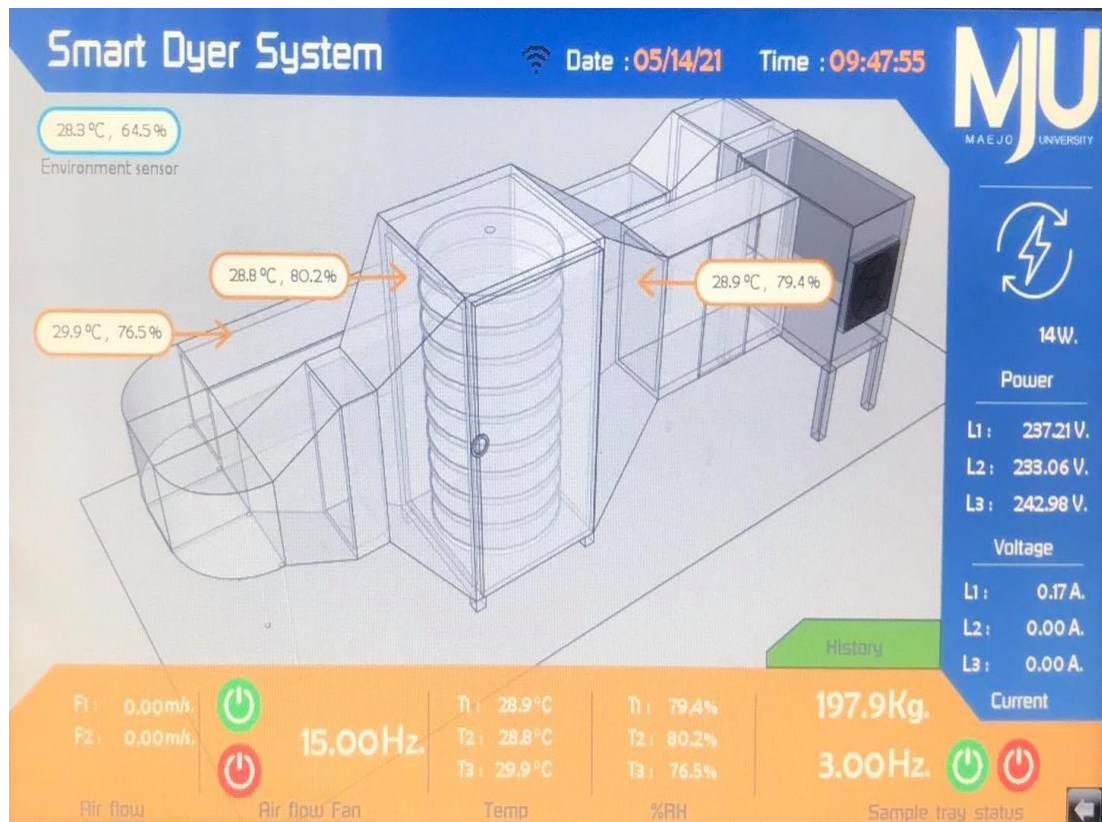
**ขั้นตอนที่ 4** บรรจุและจัดเรียงวัตถุดิบลงในถาดอบแห้งทั้ง 10 ถาด โดยกำหนดให้ถาดอบแห้งแต่ละถาดบรรจุใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำเท่ากับ 1 kg ดังภาพที่ 42



ภาพที่ 42 การจัดวางใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำบนถาดอบแห้ง

**ขั้นตอนที่ 5** ทำการทดลองอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรตามเงื่อนไขที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น และทำการบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วลม ณ จุดต่าง ๆ ของระบบอบแห้งดังภาพที่ 43 ทุก ๆ 10 min โดยอ่านค่าจากหน้าจอแสดงผลและควบคุมแบบ HMI (Human Machine Interface) ดังภาพที่ 44 ทำการเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ออกมาชั่งน้ำหนักและวิเคราะห์ความชื้นทุก ๆ 30 min โดยทำการทดลองต่อเนื่องจนได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ค่าความชื้นต่ำกว่า 10 %wb จากนั้นหยุดการทดลองแล้วบันทึกค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของระบบอบแห้ง





ภาพที่ 44 หน้าจอแสดงผลและควบคุมแบบ HMI (Human Machine Interface)

#### การประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์อบแห้ง

การประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำอบแห้งในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ดังนี้

1) การประเมินทางคุณภาพด้านสีสันของผลิตภัณฑ์อบแห้ง ในงานวิจัยนี้จะประเมินค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวโดยใช้เครื่อง Spectrophotometer ดังแสดงในภาพที่ 45 อุปกรณ์ดังกล่าวใช้หลักการวัดปริมาณของแสงที่ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ดูดกลืนเข้าไป ตัวเครื่องประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง (Light source) เลนส์ (Lens) หรือกระจกรับแสง อุปกรณ์แยกความยาวคลื่น (Monochromator) และอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ แหล่งกำเนิดแสงทำหน้าที่ให้แสงผ่านตัวอย่างเครื่องจะทำการบันทึกค่าความยาวคลื่นร่วมกับค่ามุมของแต่ละความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืน ในการวิเคราะห์สีจะวิเคราะห์ด้วยระบบ CIE ที่จะแสดงผลเทอมของค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ค่าสีแดง สีเขียว ( $a^*$ ) และค่าสีเหลือง สีน้ำเงิน ( $b^*$ ) และค่าความแตกต่างสีโดยรวม (Total Color Difference,  $\Delta E$ )





ภาพที่ 45 การวัดค่าสีของผลิตภัณฑ์อบแห้งด้วยเครื่อง Spectrophotometer

2) การประเมินคุณภาพด้านการคืนตัว (Rehydration) ของผลิตภัณฑ์อบแห้งทำได้โดยชั่งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้จำนวนหนึ่งแล้วไปแช่ในน้ำที่อุณหภูมิประมาณ  $90 \pm 3$  °C เป็นระยะเวลา 15 min จากนั้นทำการซับน้ำออกจนแห้งแล้วนำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งดังภาพที่ 46 โดยค่าการคืนตัวของผลิตภัณฑ์อบแห้งสามารถคำนวณดังสมการที่ 22 (ธนิต สวัสดิ์เสวี และคณะ, 2549)

$$\text{Rehydration} = \frac{W_f \times W_d}{W_d} \times 100$$

สมการที่ 22

เมื่อ	$W_f$	คือ	น้ำหนักวัสดุหลังกระบวนการคืนตัว (g)
	$W_d$	คือ	น้ำหนักวัสดุก่อนกระบวนการคืนตัว (g)



ภาพที่ 46 การทดสอบคุณภาพด้านการคินตัวของผลิตภัณฑ์อบแห้ง

3) การประเมินคุณภาพปริมาณน้ำอิสระ (Water Activity; aw) โดยใช้เครื่องวัด aw ซึ่งค่าที่อ่านได้จะอยู่ในช่วง 0.000 - 1 aw หากค่าที่วัดได้มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึง มีปริมาณน้ำอิสระภายในวัสดุมาก ซึ่งขั้นตอนการวัดค่า aw ทำได้โดยการบดตัวอย่างผลิตภัณฑ์อบแห้งให้ละเอียดแล้วบรรจุลงในถ้วยวัด aw ประมาณ 3/4 ของถ้วย แล้วใส่ถ้วยเข้าสู่เครื่องวัด aw ดังภาพที่ 47



ภาพที่ 47 ค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water Activity; aw)

## อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับงานวิจัย

### 1) เครื่องอบแห้งแบบผสมผสาน



ภาพที่ 48 เครื่องอบแห้งแบบผสมผสานที่ใช้ในการทดสอบ

### 2) มอเตอร์ไฟฟ้า

งานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ายี่ห้อ MITSUBISHI รุ่น M151-0020 แรงดันไฟฟ้า 220 V 1P กำลังมอเตอร์ 750 W ความเร็วรอบ 1,450 RPM ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์สำหรับหมุนชุดถาดอบแห้งแสดงดังภาพที่ 49



ภาพที่ 49 มอเตอร์ไฟฟ้า



3) **เกียร์ทดรอบ** งานวิจัยในใช้เกียร์ทดรอบแบบ PORD ยี่ห้อ CPG เพลลาเข้าด้านข้างเพลลาออกซี่ลง ด้านล่าง สำหรับงานขับแกนหมุนแนวตั้งขับจากด้านบนด้วยอัตราทดรอบ 1:60 เพื่อลดรอบและเพิ่มแรงบิด สำหรับมอเตอร์ 1 HP เพลลาเข้าขนาด 12 mm เพลลาออก 14 mm ใช้สำหรับขับเคลื่อน ถาดหมุนแสดงดังภาพที่ 50



ภาพที่ 50 เกียร์ทดรอบอัตราทด 1:60

4) **ชุดอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์**



ภาพที่ 51 ชุดอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์หมุนถาดอบแห้ง และพัดลมหมุนเวียนอากาศ

5) ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ



ภาพที่ 52 ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ

6) ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดพลังงาน



ภาพที่ 53 อุปกรณ์ตรวจวัดการใช้พลังงาน



### 7) เครื่องวัดและบันทึกค่าพลังงาน

งานวิจัยในใช้เครื่องวัดและบันทึกค่าพลังงานยี่ห้อ Kepler Series current transformer 3 phase รุ่น KCT-60-400/5A สำหรับวัดค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องอบแห้งแสดงดังภาพที่ 54



ภาพที่ 54 Current transformer

### 8) เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม

งานวิจัยในใช้เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity & Temperature Meter) ยี่ห้อ Uni-T รุ่น A12T สำหรับวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายนอกเครื่องอบแห้งแสดงดังภาพที่ 55



ภาพที่ 55 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ยี่ห้อ Uni-T รุ่น A12T

### 9) เครื่องวัดอัตราเร็วลม

งานวิจัยในใช้เครื่องวัดอัตราเร็วลม (Anemometer) ยี่ห้อ Lutron รุ่น AM-4215SD แบบ Hot wire Anemometer ในการวัดความเร็วลม ณ จุดต่าง ๆ ภายในเครื่องอบแห้งแสดงดังภาพที่ 56



ภาพที่ 56 เครื่องวัดอัตราเร็วลม ยี่ห้อ Lutron รุ่น AM-4215SD แบบ Hot wire

### 10) เครื่องบันทึกอุณหภูมิและความชื้น

งานวิจัยในใช้เครื่องตรวจวัดและบันทึกอุณหภูมิแบบ Data logger ยี่ห้อ Huato รุ่น S220-T8 ประกอบกับ Thermocouple ชนิด k ในการวัดค่าและบันทึกอุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ภายในเครื่องอบแห้งแสดงดังภาพที่ 57



ภาพที่ 57 เครื่องตรวจวัดและบันทึกอุณหภูมิแบบ Data logger  
ยี่ห้อ Huato รุ่น S220-T8

### 11) เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

งานวิจัยนี้ใช้สำหรับใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $1,370\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในการวัดค่าและบันทึกอุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ภายในเครื่องอบแห้งแสดงดังภาพที่ 58



ภาพที่ 58 สายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple type k)

### 12) วัสดุดิบในการทดลองอบแห้ง

ผลผลิตทางการเกษตรสำหรับการทดลองอบแห้งในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 72 %wb และ 96 %wb ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 59



ภาพที่ 59 ใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำที่ใช้ในการทดลองอบแห้ง

### 13) ถุงพอยล์ซีปล็อก

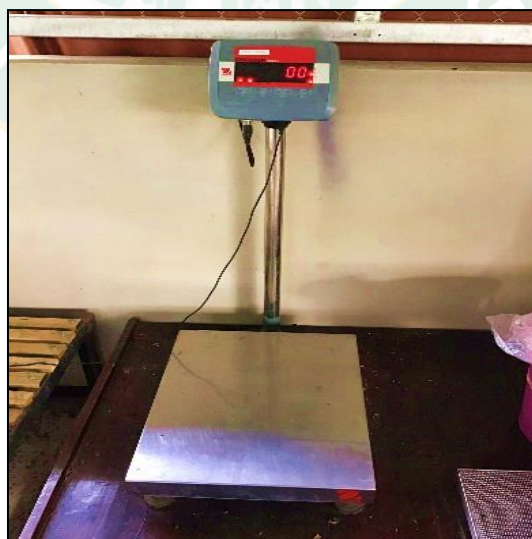
งานวิจัยนี้ถุงพอยล์ซีปล็อกขนาด 14 cm x 20 cm แบบทึบแสง ถุงชนิดนี้สามารถกันความชื้นได้ใช้ในการเก็บตัวอย่างที่ได้จากการทดลองอบแห้งดังแสดงในภาพที่ 60 เพื่อนำไปวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อไป



ภาพที่ 60 ถุงพอยล์ซีปล็อกสำหรับเก็บตัวอย่างที่ได้จากการทดลองอบแห้ง

### 14) เครื่องชั่งดิจิตอล

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องชั่งดิจิตอลยี่ห้อ Ohaus รุ่น Defender 2000 เป็นเครื่องชั่งที่สามารถชั่งน้ำหนักแบบความละเอียดสูง ใช้ในการชั่งน้ำหนักก่อนการอบแห้งและหลังการอบแห้งของใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำดังแสดงในภาพที่ 61



ภาพที่ 61 เครื่องชั่งดิจิตอลยี่ห้อ Ohaus รุ่น Defender 2000



### 15) เครื่องวิเคราะห์ความชื้น

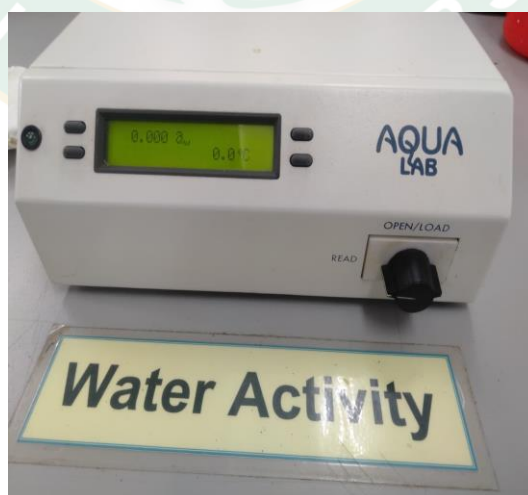
งานวิจัยในใช้เครื่องวิเคราะห์ความชื้นยี่ห้อ Ohaus รุ่น MB25 ในการวิเคราะห์ความชื้นก่อนการอบแห้งและหลังการอบแห้งของใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำดังแสดงในภาพที่ 62



ภาพที่ 62 เครื่องวิเคราะห์ความชื้นยี่ห้อ Ohaus รุ่น MB25

### 16) เครื่องวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำอิสระ (aw)

งานวิจัยในใช้เครื่องวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำอิสระ (aw) ยี่ห้อ AQUA LAB รุ่น AQUA LAB Series 3 TE ในการวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์ใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำอบแห้งแสดงดังภาพที่ 63



ภาพที่ 63 เครื่องวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำอิสระ (aw)

ยี่ห้อ AQUA LAB รุ่น AQUA LAB Series 3 TE



### 17) เครื่องวิเคราะห์ค่าสี

งานวิจัยในใช้เครื่องวิเคราะห์ค่าสียี่ห้อ Hunter lab รุ่น Mini Scan XE Plus ในการวิเคราะห์ค่าสีของวัตถุดิบเริ่มต้นและค่าสีของผลิตภัณฑ์ใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำอบแห้งเสแสดงตั้ง  
ภาพที่ 64



ภาพที่ 64 เครื่องวิเคราะห์ค่าสี ยี่ห้อ Hunter lab รุ่น Mini Scan XE Plus

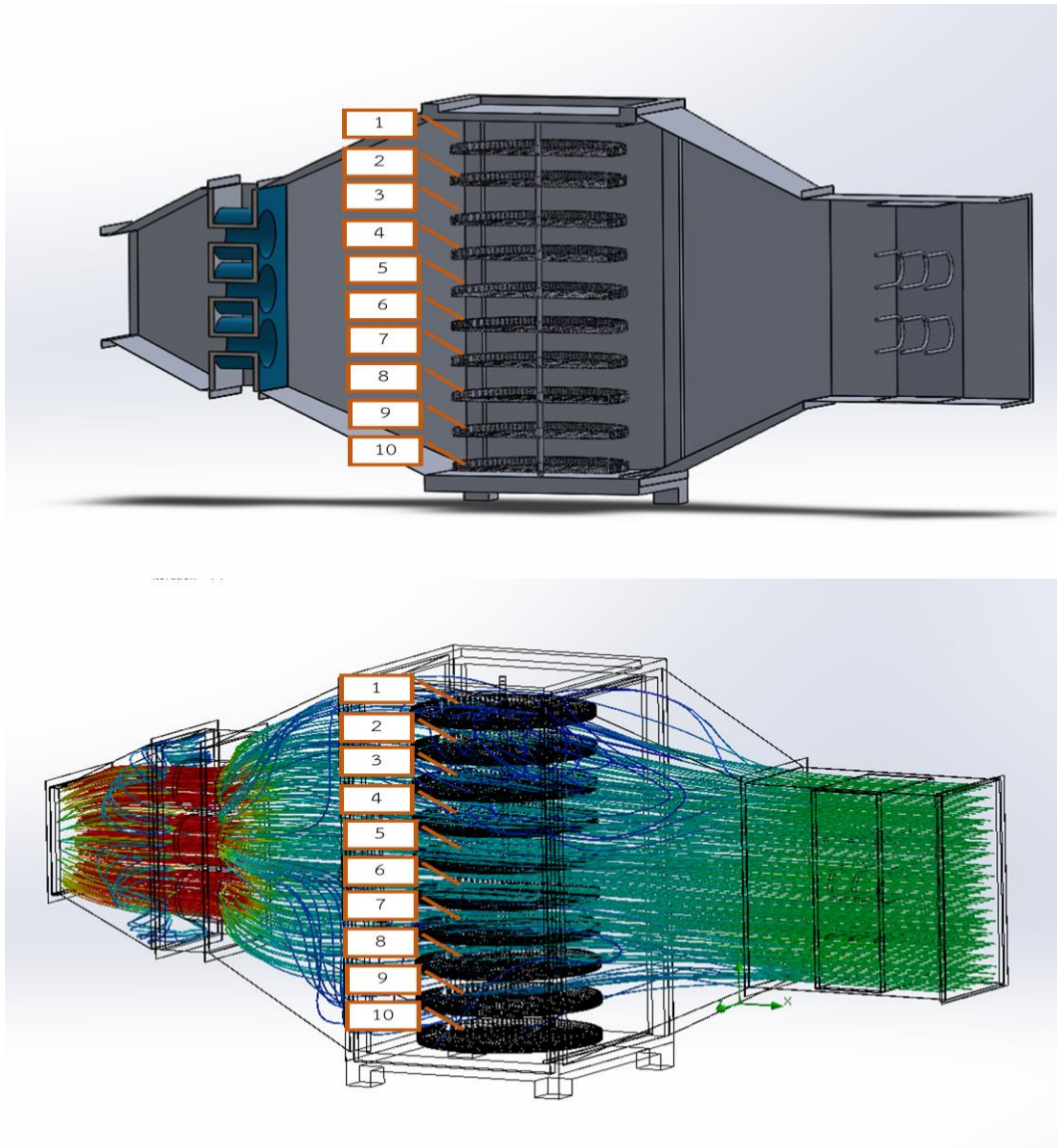
## บทที่ 4

### ผลและอภิปรายผลการทดลอง

การนำเสนอผลและอภิปรายผลการทดลองผู้วิจัยได้ดำเนินการเรียงตามตามวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัยที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ทั้งนี้สามารถแบ่งเป็น 5 ส่วนดังต่อไปนี้

#### ผลการวิจัยส่วนที่ 1 ผลการจำลองการทำงานของระบบอบแห้งแบบผสมผสานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

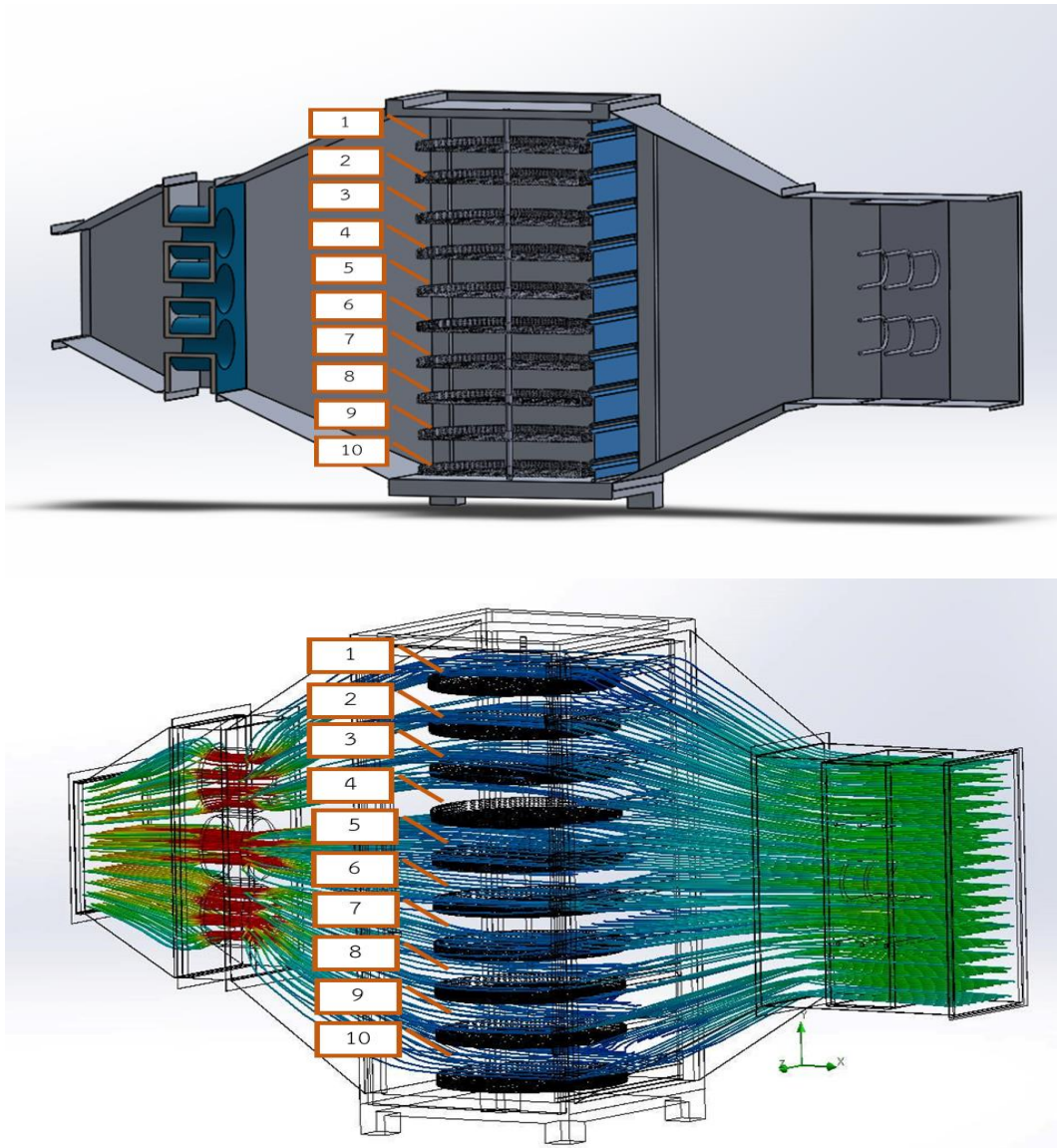
งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการทำงานของระบบอบแห้งแบบผสมผสานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Solid Work Flow Simulation โดยกำหนดความเร็วและอุณหภูมิลมร้อน ณ ทางเข้าห้องอบแห้งคงที่เท่ากับ 2 m/s และ 65 °C ตามลำดับ เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลของความเร็วลมและการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งไม่ติดตั้งและติดตั้งชุดกระจายลมร้อนซึ่งมีหน้าที่ในการบังคับทิศทางการไหลของอากาศภายในห้องอบ จากผลจำลองทางคอมพิวเตอร์กรณีไม่ติดตั้งชุดกระจายลมร้อนพบว่าความเร็วของอากาศเหนือถาดอบแห้งมีค่าในช่วง 0.931 - 1.782 m/s ซึ่งความเร็วลมเหนือถาดอบแห้งสูงสุดจะเกิดขึ้นบริเวณกลางห้องอบแห้งและความเร็วลมเหนือถาดอบแห้งต่ำสุดจะเกิดขึ้นบริเวณด้านบนและล่างของห้องอบแห้ง โดยค่าทั้งสองมีความแตกต่างกันประมาณ 48 % ดังแสดงในตารางที่ 3 และภาพที่ 65 ในทางกลับกันเมื่อทำการติดตั้งชุดกระจายลมร้อนเพื่อบังคับทิศทางการไหลของลมร้อนส่งผลให้ความเร็วของอากาศเหนือถาดอบแห้งมีค่าในช่วง 1.238 - 1.324 m/s โดยความเร็วลมเหนือถาดอบแห้งสูงสุดจะเกิดขึ้นบริเวณกลางห้องอบแห้งและความเร็วลมเหนือถาดอบแห้งต่ำสุดจะเกิดขึ้นบริเวณด้านบนและล่างของห้องอบแห้งเช่นเดียวกับกรณีไม่ติดตั้งชุดกระจายลมร้อน แต่ค่าทั้งสองมีความแตกต่างกันเพียง 6 % ดังแสดงในตารางที่ 4 และภาพที่ 66



ภาพที่ 65 ผลจำลองทางคอมพิวเตอร์ของความเร็วอากาศเหนือฝ้าห้อง  
กรณีไม่ติดตั้งชุดกระจายลมร้อน

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความเร็วลมกรณีไม่ติดตั้งชุดกระจายลมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ตำแหน่ง ของฝ้า ห้อง	Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ความเร็ว ลมร้อน (m/s)	Velocity (m/s)	0.93	1.56	1.63	1.77	1.78	1.78	1.77	1.63	1.56	0.93



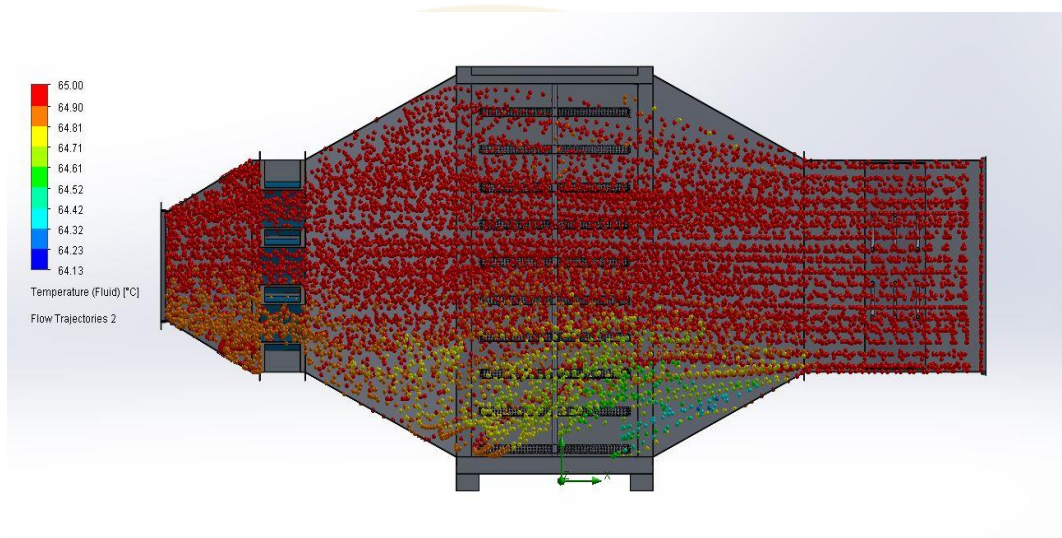
ภาพที่ 66 ผลจำลองทางคอมพิวเตอร์ของความเร็วอากาศเหนือถาดอบแห้ง  
กรณีติดตั้งชุดกระจายลมร้อน

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความเร็วลมกรณีติดตั้งชุดกระจายลมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

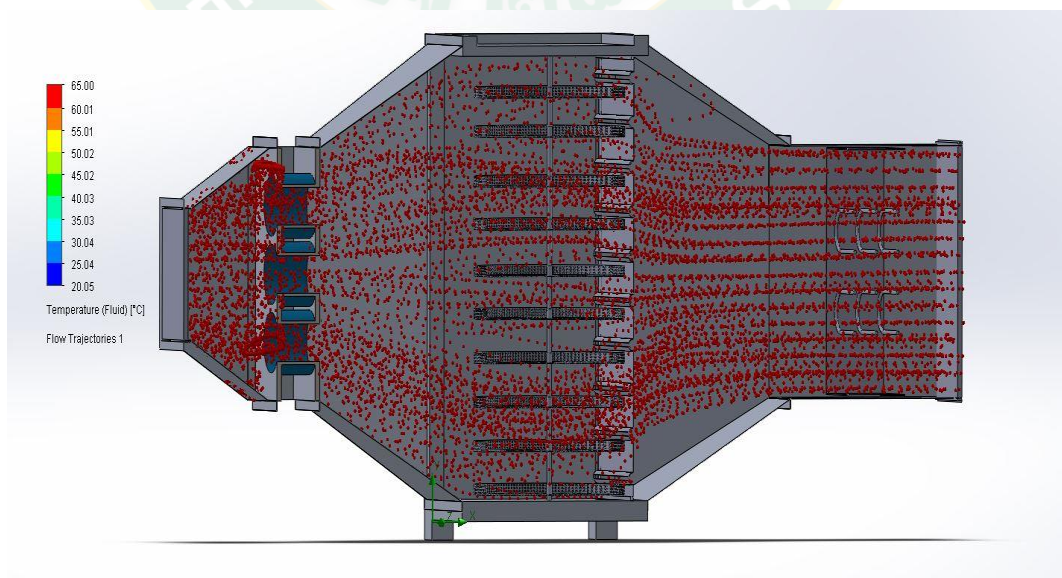
ตำแหน่ง ของถาด อบแห้ง	Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ความเร็ว ลมร้อน (m/s)	Velocity (m/s)	1.23	1.31	1.31	1.32	1.32	1.32	1.32	1.31	1.31	1.23



เมื่อพิจารณาอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ พบว่าผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องพบว่ากรณีไม่ติดตั้งชุดกระจายลมร้อนอุณหภูมิของอากาศบริเวณด้านล่างของห้องอบแห้งมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศบริเวณด้านบนของห้องอบแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากอากาศไม่ถูกบังคับทิศทาง การไหลด้วยช่องกระจายลมทำให้อากาศร้อนที่มีความหนาแน่นต่ำลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนส่งผลให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในห้องอบแห้งสูงสุดและต่ำสุดถึงประมาณ 5 °C หรือประมาณ 8 % ดังภาพที่ 67 ในทางกลับกันการติดตั้งชุดกระจายลมร้อนจะทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งดีขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญดังภาพที่ 68



ภาพที่ 67 ผลจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิกกรณีติดตั้งชุดกระจายลม



ภาพที่ 68 ผลจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิกกรณีไม่ติดตั้งชุดกระจายลม



จากผลการจำลองการทำงานของระบบอบแห้งแบบผสมผสานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Solid Work Flow Simulation พบว่าการติดตั้งชุดกระจายลมร้อนส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องอบได้เป็นอย่างดี และยังรักษาความเร็วลมร้อนเหนือถาดอบแต่ละชั้นให้มีความใกล้เคียงกันซึ่งจะส่งผลต่อการระเหยของน้ำออกจากวัสดุอบได้อย่างทั่วถึงสม่ำเสมอทุกชั้น

## ผลการวิจัยส่วนที่ 2 ผลการทดสอบระบบอบแห้งแบบผสมผสาน

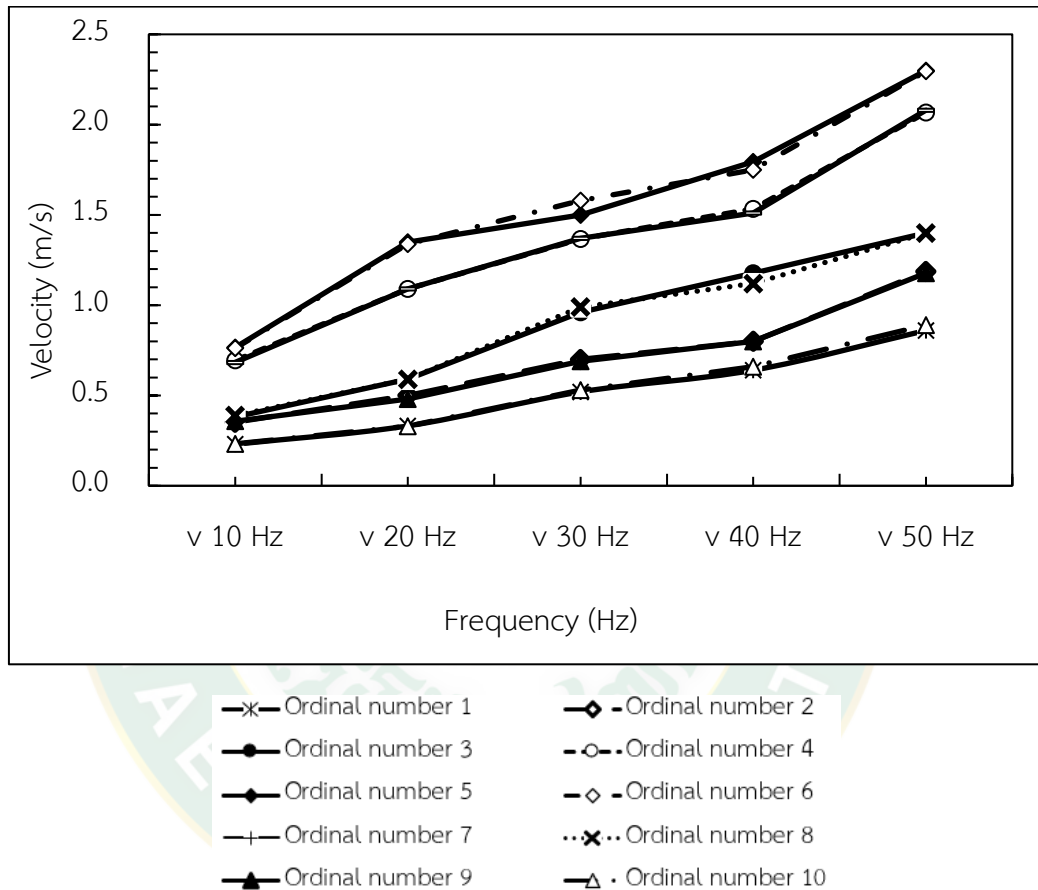
### ผลการวัดค่าความเร็วลมเหนือถาดอบแห้ง

ผลการวิจัยส่วนนี้จะนำเสนอผลการตรวจวัดค่าความเร็วลมเหนือถาดอบแห้งแต่ละชั้นโดยทำการปรับเปลี่ยนความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับพัดลมต่ำสุดเท่ากับ 10 Hz และสูงสุดเท่ากับ 50 Hz แล้วทำการวัดความเร็วลมเหนือถาดอบแห้งแต่ละชั้นพบว่าความเร็วลมสูงสุดจะเกิดขึ้นเหนือถาดอบแห้งที่ติดตั้งไว้บริเวณกลางห้องอบแห้ง (ถาดที่ 5 และ 6 ดังภาพที่ 68) และความเร็วลมต่ำสุดจะเกิดขึ้นเหนือถาดอบแห้งที่ติดตั้งไว้บริเวณบนและล่างของห้องอบแห้ง (ถาดที่ 1 และ 10 ดังภาพที่ 68) ทั้งในกรณีติดตั้งและไม่ติดตั้งช่องกระจายลมร้อน โดยผลการวัดค่าความเร็วลมเหนือถาดอบแห้งชั้นต่าง ๆ (ภาพที่ 69 และ 70) แสดงให้เห็นว่าเมื่อปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับพัดลมในช่วง 10 - 50 Hz การไม่ติดตั้งช่องกระจายลมร้อนจะทำให้ความเร็วลมเหนือถาดอบแห้งมีความแตกต่างของค่าสูงสุดและต่ำสุดเฉลี่ยเท่ากับ 67.91 % แต่เมื่อติดตั้งช่องกระจายลมร้อนจะทำให้ความแตกต่างของความเร็วลมสูงสุดและต่ำสุดเฉลี่ยมีค่าลดลงเหลือ 9.66 % (ดีขึ้นประมาณ 86 %) กล่าวคือการติดตั้งช่องกระจายลมร้อนสามารถช่วยให้การไหลของอากาศเหนือถาดอบแห้งมีความสม่ำเสมอ จึงช่วยให้ประสิทธิภาพในการอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยผลการวัดค่าความเร็วลมเหนือถาดอบแห้งและการเปรียบเทียบผลของทั้งสองกรณีแสดงดังตารางที่ 5

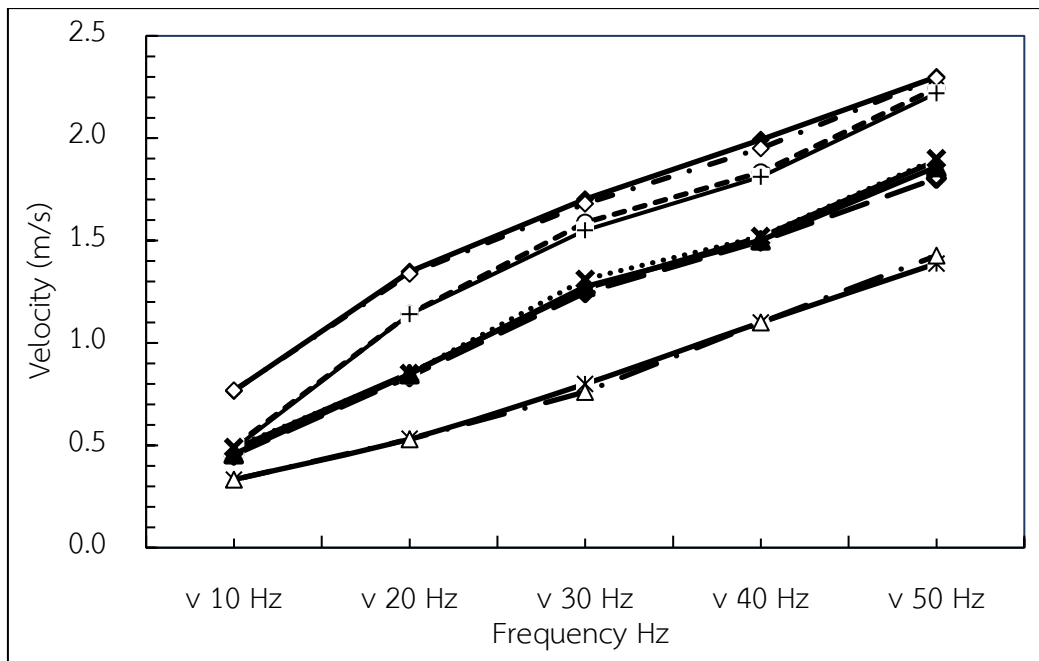
ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบค่าความเร็วลมเหนือถาดอบแห้ง

ความถี่ (Hz)	ไม่ติดตั้งช่องกระจายลมร้อน			ติดตั้งช่องกระจายลมร้อน			ผลการ ปรับปรุง
	ความเร็วลม		แตกต่าง (%)	ความเร็วลม		แตกต่าง (%)	
	ต่ำสุด (m/s)	สูงสุด (m/s)		ต่ำสุด (m/s)	สูงสุด (m/s)		
10	0.23	0.77	69.97%	0.66	0.77	13.84%	80.22%
20	0.33	1.35	75.61%	1.21	1.35	10.30%	86.37%
30	0.52	1.58	67.09%	1.54	1.70	9.52%	85.81%
40	0.64	1.79	64.31%	1.83	1.99	8.18%	87.28%
50	0.86	2.30	62.59%	2.15	2.30	6.48%	89.65%
	เฉลี่ย		67.91%	เฉลี่ย		9.66%	85.77%

จากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าเมื่อต้องการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรด้วยความเร็วลมตั้งแต่ 1.50 m/s เป็นต้นไป ระบบอบแห้งแบบผสมผสานที่ติดตั้งช่องกระจายลมร้อนในงานวิจัยนี้สามารถสร้างความเร็วลมเหนือถาดอบแห้งแต่ละถาดให้มีความแตกต่างกันไม่เกิน 10 % ได้เป็นอย่างดี โดยความเร็วลมสูงสุดและต่ำสุดที่ระบบอบแห้งต้นแบบนี้สามารถทำได้มีค่าเท่ากับ 2.30 m/s และ 0.66 m/s ตามลำดับ



ภาพที่ 69 ความเร็วลมเหนือถาดอบแห้งกรณีไม่ติดตั้งช่องช่องกระจายลมร้อน

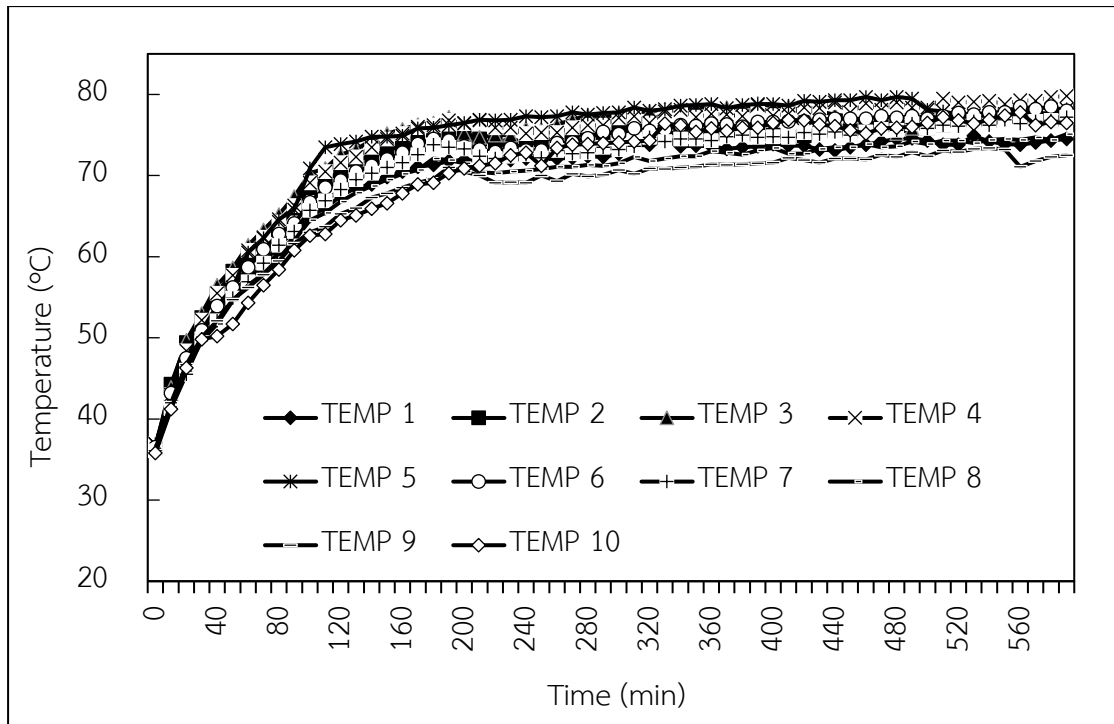


- |                      |                        |
|----------------------|------------------------|
| —x— Ordinal number 1 | —◇— Ordinal number 2   |
| —●— Ordinal number 3 | —○— Ordinal number 4   |
| —◆— Ordinal number 5 | —◇— Ordinal number 6   |
| —+— Ordinal number 7 | ··x·· Ordinal number 8 |
| —▲— Ordinal number 9 | —△· Ordinal number 10  |

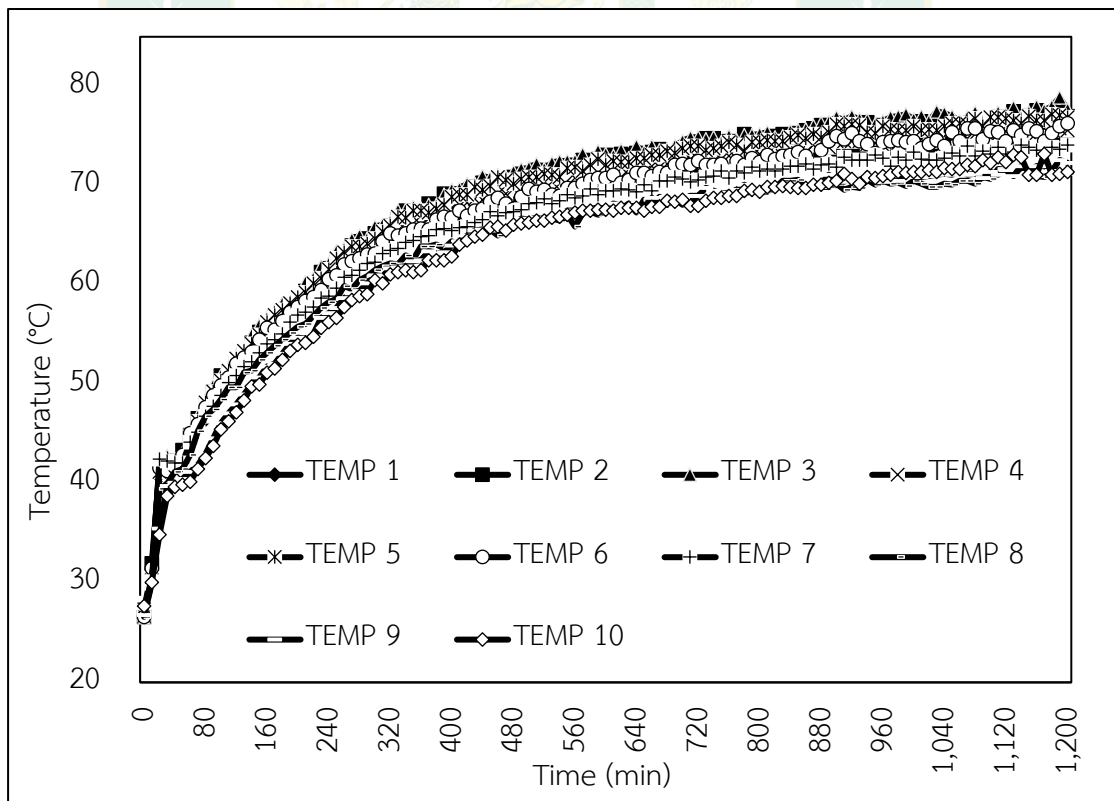
ภาพที่ 70 ความเร็วลมเหนือถาดอบแห้งกรณีไม่ติดตั้งช่องช่องกระจายลมร้อน

### ผลการวัดค่าอุณหภูมิเหนือถาดอบแห้ง

ผลการวิจัยส่วนนี้จะนำเสนอผลการตรวจวัดค่าอุณหภูมิเหนือถาดอบแห้งแต่ละชั้นโดยทำการปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับพัดลมคงที่เท่ากับ 50 Hz แล้วทำการวัดค่าอุณหภูมิพบว่าเมื่อไม่ติดตั้งช่องกระจายลมร้อนจะส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเหนือถาดอบแห้งแต่ละชั้นมีค่าแตกต่างกันมาก โดยผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดมีค่ามากกว่า 5 °C ดังภาพที่ 71 ในทางกลับกันเมื่อติดตั้งช่องกระจายลมร้อนพบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเหนือถาดอบแห้งแต่ละชั้นมีค่าใกล้เคียงกันและมีผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดไม่เกิน 5 °C ดังภาพที่ 72 กล่าวคือการติดตั้งช่องกระจายลมร้อนสามารถช่วยให้อุณหภูมิภายในห้องอบมีความสม่ำเสมอมากขึ้นส่งผลต่อประสิทธิภาพในการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นด้วย



ภาพที่ 71 ผลการตรวจวัดค่าความเร็วลมกรณีไม่ติดตั้งชุดกระจายลมภายในห้องอบแห้ง



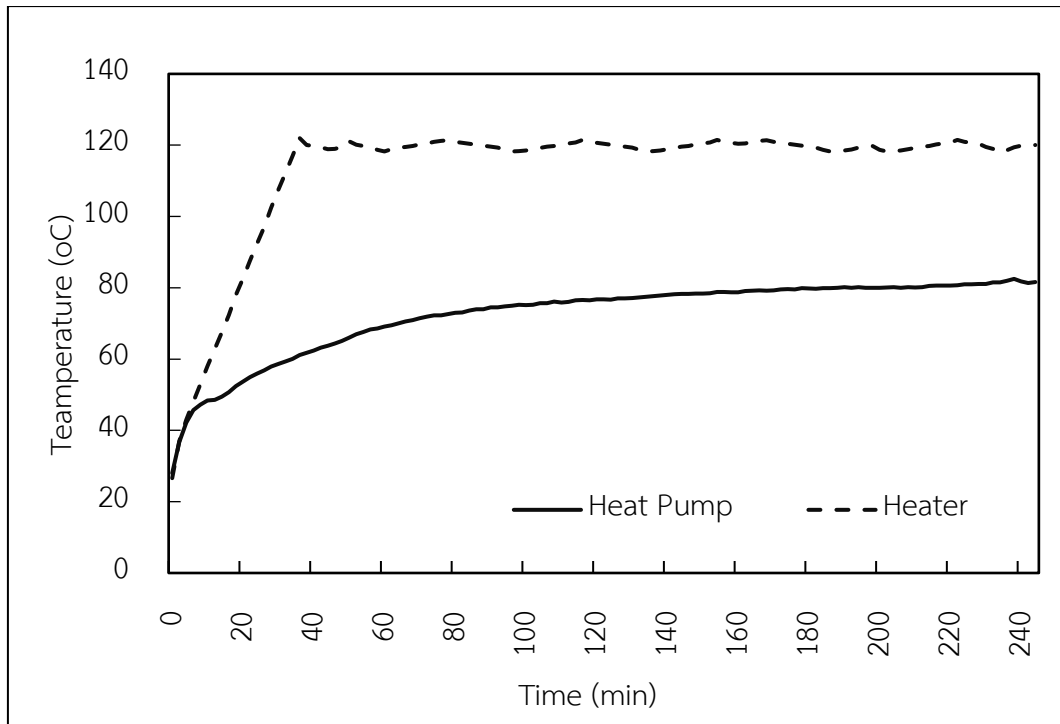
ภาพที่ 72 ผลการตรวจวัดค่าความเร็วลมกรณีติดตั้งชุดกระจายลมภายในห้องอบแห้ง

### ผลการทดสอบสมรรถนะการผลิตลมร้อน

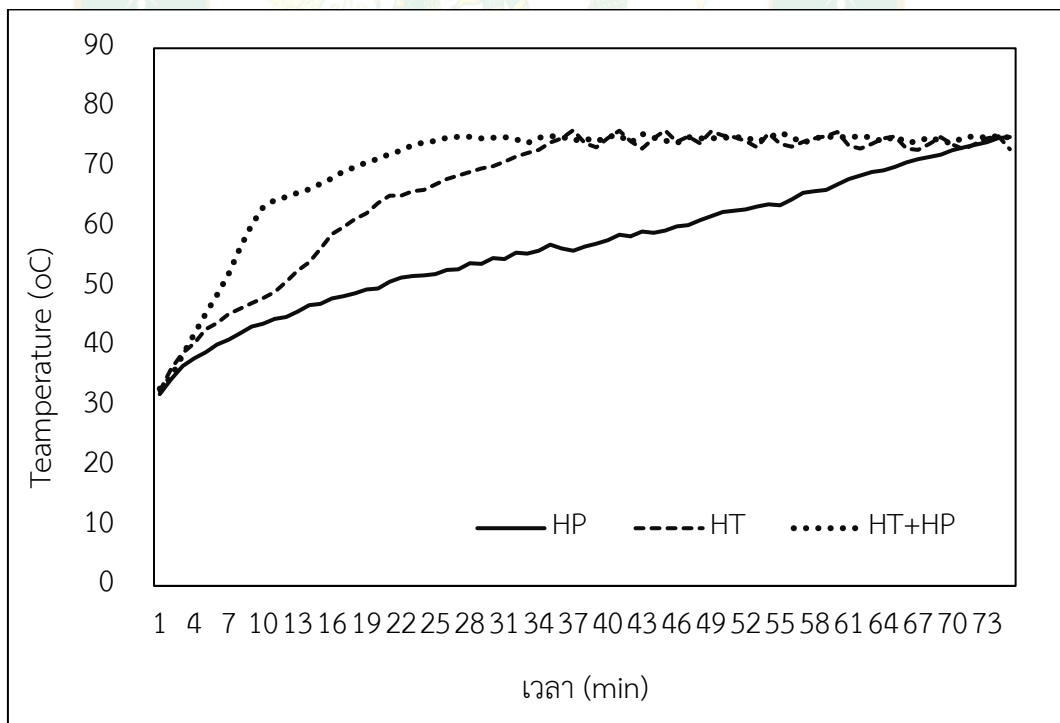
การทดสอบสมรรถนะด้านการสร้างอุณหภูมิลมร้อนโดยทำการเก็บข้อมูลที่อุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 30 °C พบว่าปั๊มความร้อนสามารถสร้างอุณหภูมิภายในลมร้อนได้สูงสุดประมาณ 82 °C ตามพิกัดของปั๊มความร้อน ด้วยระยะเวลาประมาณ 240 min แต่เนื่องจากระบบอัดไอน้ำมีข้อจำกัดด้านความดันของสารทำงาน ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานปั๊มความร้อนเพื่อให้ระบบอัดไอน้ำอายุการใช้งานที่ยาวนานควรมีค่าประมาณ 95 % ของพิกัดสูงสุดหรือมีค่าประมาณ 75 - 77 °C ซึ่งเพียงพอต่อการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรหลากหลายชนิด และเมื่อทดสอบสมรรถนะด้านการสร้างอุณหภูมิลมร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าพบว่าอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถสร้างอุณหภูมิได้สูงกว่าการใช้ปั๊มความร้อน โดยฮีตเตอร์ไฟฟ้าสามารถผลิตลมร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 120 °C แต่คณะผู้วิจัยไม่สามารถทำการทดสอบที่อุณหภูมิสูงกว่าค่าดังกล่าวได้เนื่องจากจะทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ส่วนควบของระบบอบแห้งอันได้แก่ เซ็นเซอร์วัดความเร็วลมและเซ็นเซอร์วัดความชื้นที่ติดตั้งไว้ในห้องอบและท่อหมุนเวียนอากาศ ดังนั้นพิกัดอุณหภูมิลมร้อนสูงสุดของระบบอบแห้งในงานวิจัยนี้จึงถูกกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 120 °C โดยจากผลการทดสอบพบว่าฮีตเตอร์ไฟฟ้าสามารถสร้างอุณหภูมิลมร้อนจาก 30 °C จนถึง 120 °C ได้ในระยะเวลาเพียง 36 min ดังภาพที่ 73

เนื่องด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ข้างต้นผู้วิจัยจึงทำการทดสอบสมรรถนะการสร้างลมร้อน (HA) ของระบบอบแห้งในสภาวะไม่มีภาระทางความร้อน (No - Load) หรือไม่บรรจุวัสดุอบแห้งเข้าสู่ระบบ โดยใช้แหล่งความร้อน 3 แบบ ได้แก่ 1) ปั๊มความร้อน (HP) 2) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (HT) และ 3) ปั๊มความร้อนผสมผสานฮีตเตอร์ไฟฟ้า (HP+HT) โดยกำหนดกำหนดค่าอุณหภูมิลมร้อนสูงสุดเท่ากับพิกัดของปั๊มความร้อนซึ่งมีค่าเท่ากับ 75 °C จากการทดสอบพบว่าการใช้แหล่งความร้อนที่ 3 แบบดังกล่าวข้างต้น ระบบอบแห้งสามารถสร้างอุณหภูมิลมร้อนถึงค่าที่กำหนดโดยใช้เวลาประมาณ 75 min 36 min และ 26 min ตามลำดับ (ดังภาพที่ 74) ซึ่งคิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (Heating Rate) เท่ากับ 0.57 °C/min 1.17 °C/min และ 1.62 °C/min ตามลำดับ





ภาพที่ 73 สมรรถนะสูงสุดในการผลิตความร้อนโดยใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าและปั๊มความร้อน



ภาพที่ 74 สมรรถนะการผลิตความร้อนโดยใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้า ปั๊มความร้อน และแบบผสม

## ผลการทดสอบสมรรถนะการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด

การให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดเป็นการให้ความร้อนโดยตรงสู่ผลิตภัณฑ์อบแห้งโดยไม่ผ่านตัวกลางทำให้มีค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (Heating Rate) ของผลิตภัณฑ์สูงกว่าการให้ความร้อนด้วยลมร้อน โดยอุณหภูมิสูงสุดที่ระบบอินฟราเรดในงานวิจัยนี้สามารถทำได้มีค่าสูงกว่า 200 °C ซึ่งมีค่าเกินความจำเป็นในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเพราะจะทำให้เกิดการสุกหรือไหม้ของผิวผลิตภัณฑ์

## ผลการวัดค่าการใช้พลังงานของระบบอบแห้ง

การใช้พลังงานของระบบอบแห้งเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาเนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนในการผลิตสินค้าอบแห้ง โดยวัตถุประสงค์หนึ่งของระบบอบแห้งแบบผสมผสานอัจฉริยะในงานวิจัยนี้คือการประหยัดพลังงาน ดังนั้นการทดสอบการใช้พลังงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ แยกรายชิ้นจึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาต่อยอดในอนาคต โดยอุปกรณ์หลัก ๆ ของระบบอบแห้งที่ใช้พลังงานไฟฟ้า ได้แก่ 1) พัดลมหมุนเวียนอากาศ 2) ระบบหมุนถาดบรรจุผลิตภัณฑ์อบแห้ง 3) ป้อนความร้อน (HP) 4) ฮีตเตอร์ (HT) และ 5) อินฟราเรด (IR) โดยผลการทดสอบการใช้พลังงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 1) พัดลมหมุนเวียนอากาศ

พัดลมหมุนเวียนอากาศที่ติดตั้งในระบบอบแห้งเป็นแบบอากาศไหลตามแนวแกน (Axial Flow Fan) ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 Phase แรงดันไฟฟ้า 220 V กำลังไฟฟ้าสูงสุด 300 W จำนวน 3 ตัว รวมพิกัดไฟฟ้าติดตั้งสูงสุดเท่ากับ 900 W จากการทดสอบการใช้งานด้วยความเร็วลมที่เหมาะสมกับการอบแห้งในช่วง 0.50 - 2.00 m/s พบว่าอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของพัดลมมีค่าแปรผันตามความเร็วลม ดังภาพที่ 75 ทั้งนี้พัดลมที่ติดตั้งในระบบอบแห้งต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 887 W เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 2.0 m/s

### 2) ระบบหมุนถาดบรรจุผลิตภัณฑ์อบแห้ง

ระบบหมุนถาดบรรจุผลิตภัณฑ์อบแห้งใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 Phase แรงดันไฟฟ้า 220 V กำลังไฟฟ้าสูงสุด 750 W (1 hp) จำนวน 1 ตัว ระบบนี้ถูกออกแบบให้สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วรอบในการหมุนถาดได้ในช่วง 5 - 10 RPM จากการทดสอบการใช้งานระบบดังกล่าวพบว่าอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบมีค่าแปรผันตามความเร็วรอบของถาดหมุน ดังภาพที่ 76 ทั้งนี้ระบบหมุนถาดบรรจุผลิตภัณฑ์อบแห้งต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 121 W เมื่อใช้ความเร็วรอบเท่ากับ 10 RPM

### 3) ปั๊มความร้อน (Heat Pump; HP)

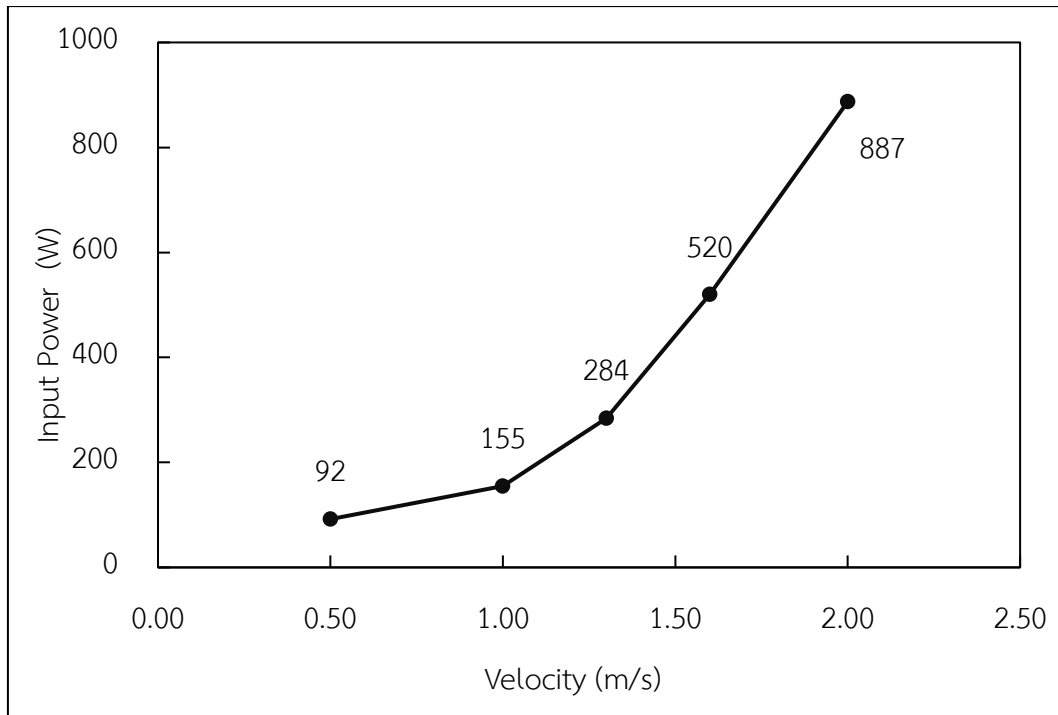
ปั๊มความร้อนที่ติดตั้งในระบบบอบแห้งของงานวิจัยนี้มีขนาดพิกัดทางไฟฟ้า (Input Power) เท่ากับ 5,500 W โดยจากการทดสอบอุปกรณ์ดังกล่าวพบว่าการใช้พลังงานของปั๊มความร้อนจะมีค่าเริ่มจาก 0 W แล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนเข้าสู่สภาวะคงตัวและมีค่าสูงสุดประมาณ 5,400 W ด้วยเวลาประมาณ 15 min ดังแสดงในภาพที่ 77 ซึ่งข้อมูลการทดสอบนี้ทำให้ทราบถึงการทำงานที่สมบูรณ์ของระบบปั๊มความร้อนส่งผลต่อการช่วยประหยัดพลังงานให้กับระบบบอบแห้ง

### 4) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Heater; HT)

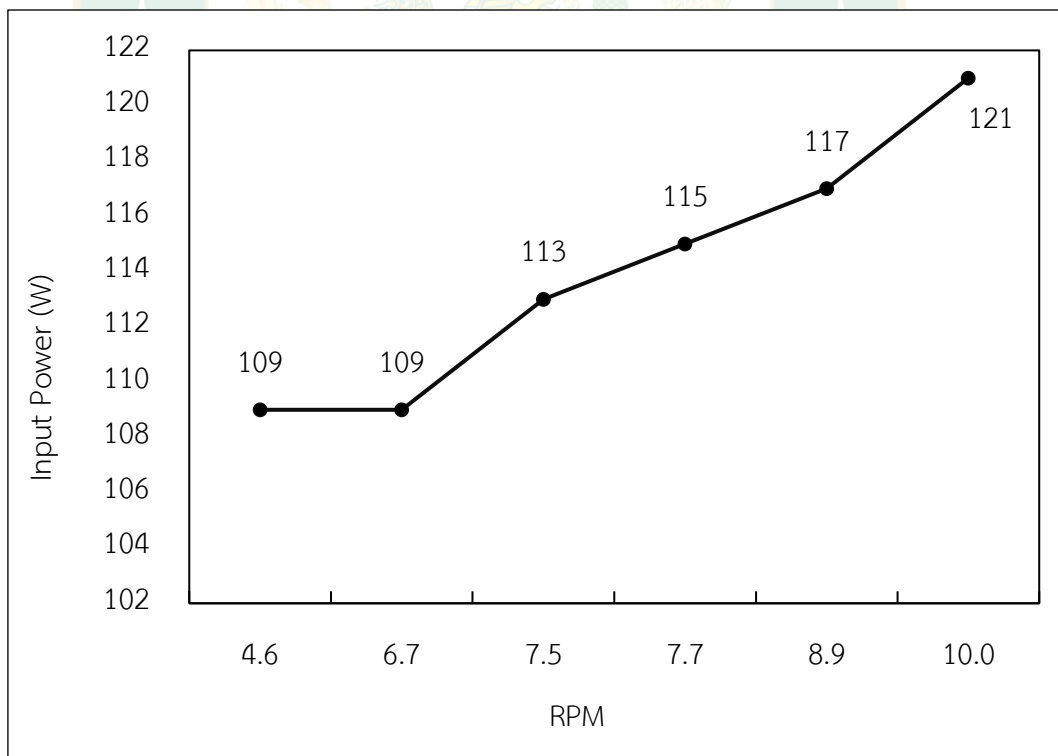
ฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ติดตั้งในระบบบอบแห้งของงานวิจัยนี้ประกอบด้วยขดลวด (Input Power) ขนาด 3,500 W จำนวน 4 ชุด (14,000 W) และขนาด 1,000 W จำนวน 4 ชุด (4,000 W) รวมพิกัดไฟฟ้าติดตั้งสูงสุดเท่ากับ 18,000 W ในการทดสอบเมื่อระบบเริ่มทำงานกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่เป็นตัวต้านทานทางไฟฟ้าแล้วแปรสภาพเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งขณะเริ่มต้นการทำงานค่ากำลังไฟฟ้าที่ขดลวดต้องการจะมีค่าสูงเต็มพิกัดทางไฟฟ้าแล้วจะค่อย ๆ ลดลงเข้าสู่สภาวะการทำงานเต็มประสิทธิภาพ จากการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวพบว่าฮีตเตอร์ไฟฟ้าต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 17,500 W แล้วค่อย ๆ ลดลงจนเข้าสู่สภาวะการทำงานในช่วง 17,100 - 17,200 W เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 min ดังแสดงในภาพที่ 78 โดยข้อมูลการทดสอบส่วนนี้ทำให้ทราบว่าหากต้องการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการผลิตลมร้อนควรใช้งานอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลามากกว่า 10 min เพื่อการทำงานด้วยประสิทธิภาพสูงสุดของอุปกรณ์

### 5) อินฟราเรด (Infrared; IR)

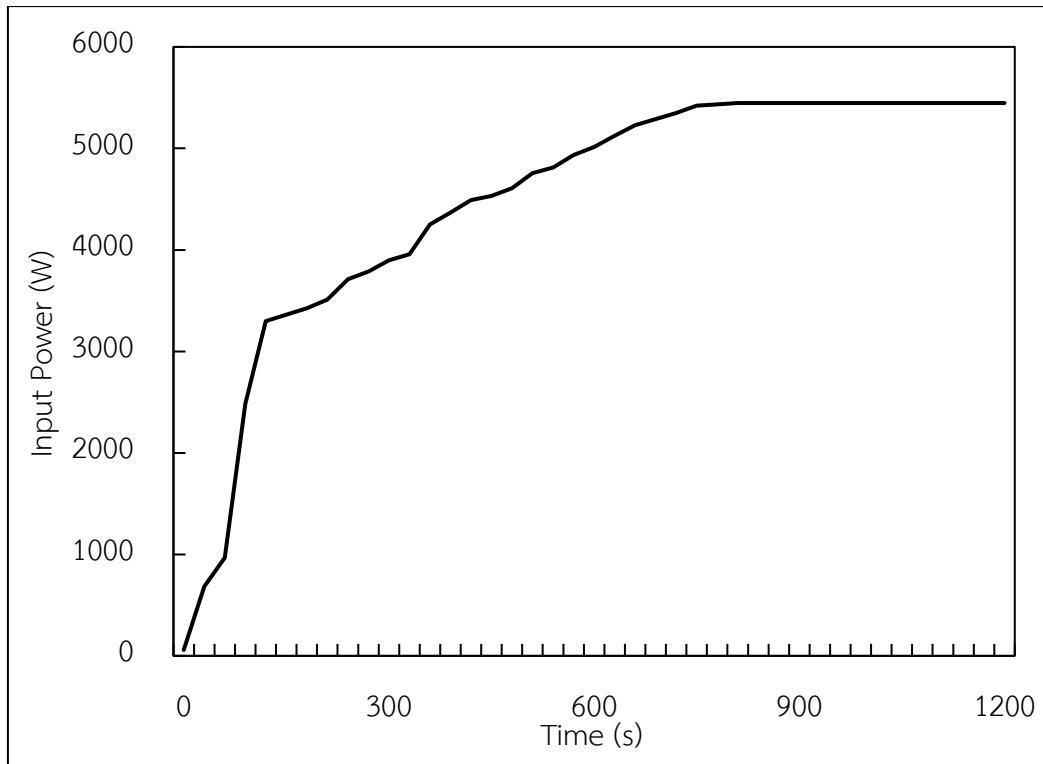
อินฟราเรด (IR) ที่ติดตั้งในระบบบอบแห้งของงานวิจัยนี้ประกอบด้วยหลอดอินฟราเรดขนาด 500 W จำนวน 10 หลอด ทำให้การใช้หลอดอินฟราเรดมีพิกัดรวมทางไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 5,000 W ในการทดสอบเมื่อระบบเริ่มทำงานกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านหลอดที่เป็นตัวต้านทานทางไฟฟ้าจนทำให้หลอดนั้นเปล่งรังสีอินฟราเรด จากการทดสอบการทำงานของหลอดอินฟราเรดโดยปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจ่าย (Input Power) เท่ากับ 300 W 400 W และ 500 W ตามลำดับ พบว่าอุปกรณ์ดังกล่าวต้องการกำลังไฟฟ้าเต็มพิกัดจ่าย ดังภาพที่ 79 กล่าวคือเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์จะทำงานเต็มพิกัดกำลังไฟฟ้า จากข้อมูลการทดสอบส่วนนี้ทำให้ทราบว่าทำให้ความร้อนด้วยอินฟราเรดมีประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าใกล้เคียง 100% ซึ่งจะส่งผลในการเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมให้กับระบบบอบแห้งด้วย



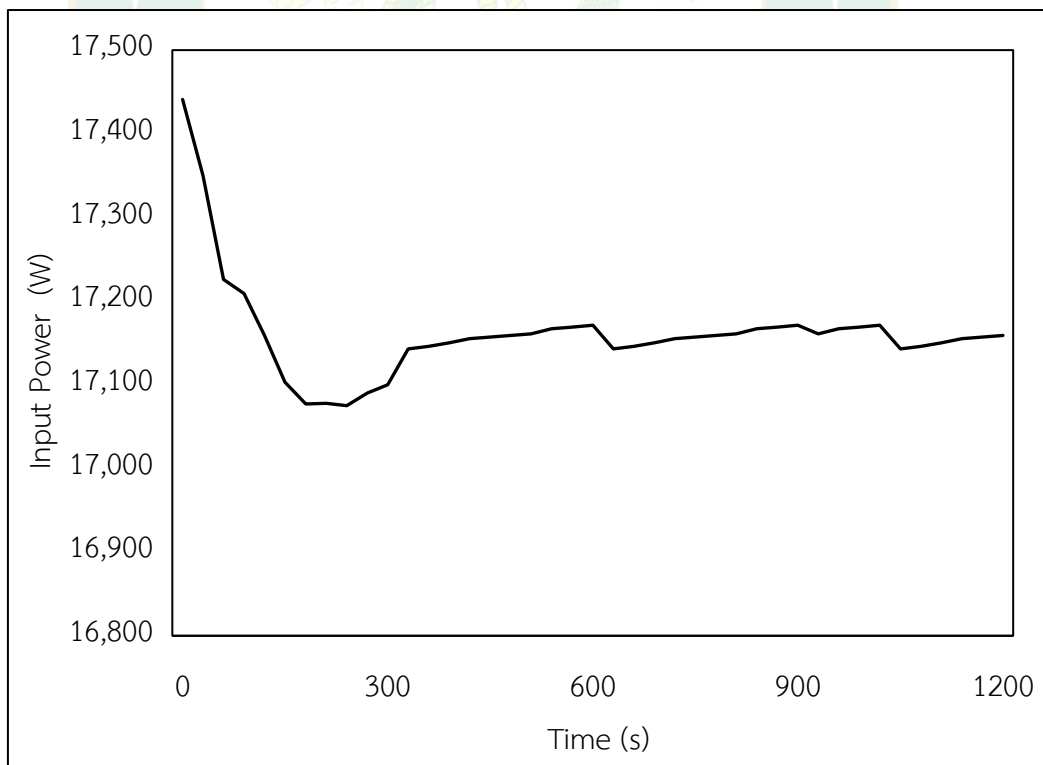
ภาพที่ 75 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของพัดลมหมุนเวียนอากาศ



ภาพที่ 76 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบหมุนถาดบรรจุผลิตภัณฑ์อบแห้ง

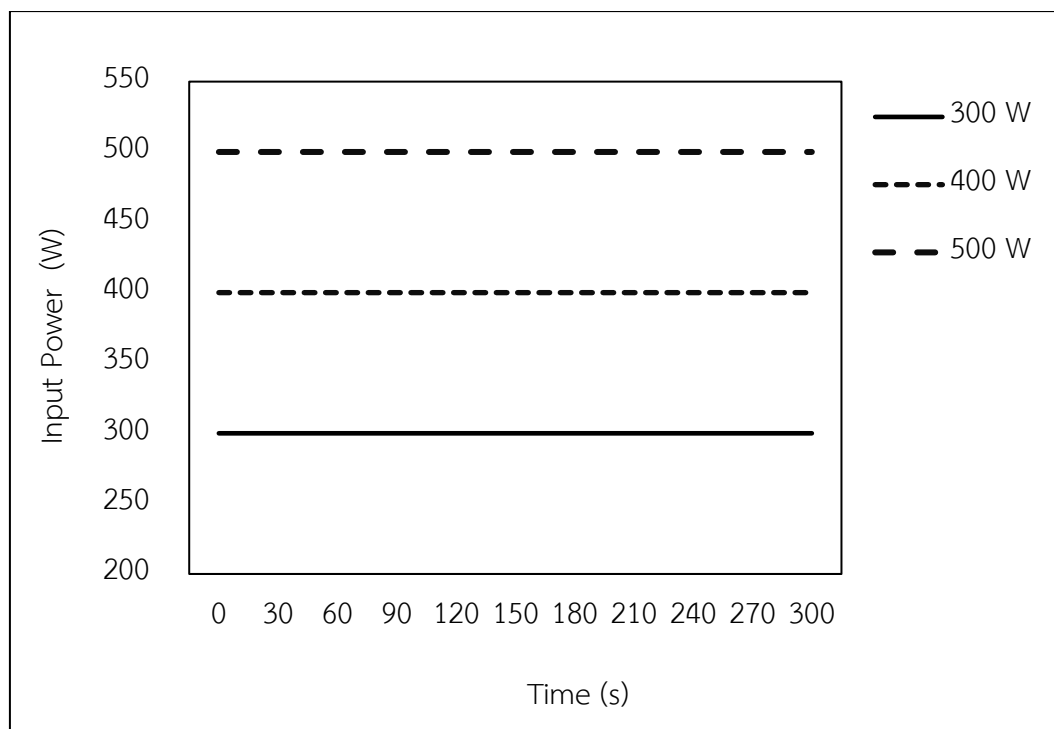


ภาพที่ 77 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของปั๊มความร้อน (Heat Pump; HP)



ภาพที่ 78 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Heater; HT)





ภาพที่ 79 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของอินฟราเรด (Infrared; IR)

การออกแบบระบบอบแห้งในงานวิจัยมีพิกัดไฟฟ้าติดตั้งเท่ากับ 30,250 W แต่จากการตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าพบว่าขณะดำเนินกระบวนการอบแห้งระบบต้องการกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 28,668 W ซึ่งคิดเป็น 94.77 % ของพิกัดติดตั้งซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมของการทำงานของเครื่องจักร (ไม่เกิน 95 %) และเมื่อพิจารณาถึงการใช้พลังงานไฟฟ้าแยกตามส่วนประกอบพบว่าอุปกรณ์มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้แก่ 1) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (HT) 2) ป้อนความร้อน (HP) 3) อินฟราเรด (IR) 4) พัดลมหมุนเวียนอากาศ 5) ระบบหมุนถาดบรรจุผลิตภัณฑ์อบแห้ง และ 6) ระบบเฝ้าตรวจวัดและควบคุม โดยผลการทดสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่าง ๆ มีรายละเอียดดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่าง ๆ

อุปกรณ์	พิกัดไฟฟ้าติดตั้ง (W)	กำลังไฟฟ้า ขณะใช้งาน (W)	สัดส่วนการใช้ พลังงาน ของอุปกรณ์ (%)
พัดลมหมุนเวียนอากาศ	900.00	887.00	3.09
ระบบหมุนถาดบรรจุผลิตภัณฑ์ อบแห้ง	750.00	121.00	0.42
ระบบฝ้าตรวจวัดและควบคุม	100.00	60.00	0.21
ปั๊มความร้อน (Heat Pump; HP)	5,500.00	5,400.00	18.84
ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Heater; HT)	18,000.00	17,200.00	60.00
อินฟราเรด (Infrared; IR)	5,000.00	5,000.00	17.44
รวม	30,250.00	28,668.00	100.00

### ผลการวิจัยทดลองส่วนที่ 3 การทดลองอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร

#### ผลการทดลองอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรทั้งสิ้น 2 ชนิด ได้แก่ ใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำ ซึ่งกำหนดให้อุณหภูมิความร้อนและความเร็วลมอยู่ในช่วง 50 °C ถึง 70 °C และ 1 m/s ถึง 2 m/s ตามลำดับ โดยใช้แหล่งความร้อน 3 ชนิด ได้แก่ 1) ปั๊มความร้อน (Heat Pump) 2) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric Heater) 3) อินฟราเรด (Infrared) ตามวัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัยที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ทั้งนี้การนำเสนอผลสามารถแบ่งออกเป็น 7 การทดลองดังต่อไปนี้

#### ผลการทดลองที่ 1 ผลการทดลองอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรด้วยลมร้อนในห้องปฏิบัติการ

ผลจากการทดลองอบแห้งใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำด้วยลมร้อนที่มีอุณหภูมิ 50 °C, 55 °C, 65 °C และ 70 °C ตามลำดับ ในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบมาตรฐาน ยี่ห้อ Binder รุ่น DIN 12880 ขนาด 1.30 kW พบว่าการอบแห้งผลิตภัณฑ์ใบมะกรูดอบแห้งด้วยลมร้อนในแต่ละอุณหภูมิที่ทำการทดสอบจะส่งผลกระทบต่ออัตราการอบแห้ง (Drying rate) ที่แตกต่างกัน โดยการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูงกว่าจะมีอัตราการอบแห้งที่รวดเร็วกว่าแต่กลับส่งผลกระทบต่อคุณภาพด้านอาหารที่ลดลง ซึ่งคุณภาพด้านอาหารเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดของสินค้าอบแห้งที่จะกำหนดราคาขายให้สูงขึ้นได้ ทั้งนี้เมื่อผู้วิจัยได้ทดลองปรับเปลี่ยนอุณหภูมิความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งใบมะกรูดพบว่าการอบด้วย

อุณหภูมิ 55 °C ให้อัตราการอบแห้งที่รวดเร็วกว่าการอบด้วยอุณหภูมิ 50 °C อย่างมีนัยยะสำคัญ และมีค่าใกล้เคียงกับการอบด้วยอุณหภูมิ 65 °C และ 70 °C อีกทั้งการอบด้วยอุณหภูมิดังกล่าวยังสามารถคงคุณภาพด้านสีส้มของผลิตภัณฑ์ให้ใกล้เคียงกับวัตถุดิบสดได้ดีกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนสูงกว่า ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งใบมะกรูดด้วยลมร้อนสำหรับการทดลองที่ 3 ถึง 7 เท่ากับ 55 °C ในทำนองเดียวกันเมื่อทำการทดลองอบแห้งเห็ดหูหนูดำก็พบว่าค่าอัตราการอบแห้งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการอบแห้งใบมะกรูด กล่าวคือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบให้สูงขึ้นจะทำให้ค่าอัตราการอบแห้งสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้จากการทดลองพบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิอบแห้งไม่ส่งผลต่อคุณภาพด้านสีส้มของผลิตภัณฑ์เห็ดหูหนูดำอบแห้งแต่กลับส่งผลต่อผิวสัมผัสที่แห้งกรอบและแตก่วนเมื่อทำการอบโดยใช้อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 °C ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งเห็ดหูหนูดำด้วยลมร้อนสำหรับการทดลองที่ 3 ถึง 7 เท่ากับ 65 °C เนื่องจากมีอัตราการอบแห้งสูงที่สุดและไม่กระทบต่อคุณภาพด้านอาหารของผลิตภัณฑ์

## ผลการทดลองที่ 2 ผลการทดลองอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรด้วยอินฟราเรด (Infrared)

ผลการทดลองอบแห้งใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำด้วยอินฟราเรดโดยกำหนดกำลังไฟฟ้าจ่าย (Input Power) ทั้งสิ้น 3 ค่า ได้แก่ 300 W, 400 W และ 500 W ตามลำดับ ด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ ในการทดลองจะกำหนดความเร็วพัดลมและความเร็วลมคงที่เท่ากับ 7 RPM และ 1.5 m/s ตามลำดับ เพื่อทราบถึงกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมในการอบแห้งวัสดุทั้งสองชนิดดังกล่าวด้วยอินฟราเรด ผลจากการทดลองอบแห้งวัตถุดิบทั้งสองชนิดด้วยเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้นพบว่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นตามกำลังอินฟราเรดที่สูงขึ้น และในทำนองเดียวกันกับการอบแห้งด้วยลมร้อน กำลังอินฟราเรดที่สูงขึ้นทำให้อุณหภูมิของวัตถุดิบสูงขึ้นด้วยซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพด้านอาหารของผลิตภัณฑ์ กล่าวคือ เมื่ออบแห้งโดยใช้กำลังอินฟราเรดเท่ากับ 400 W และ 500W จะทำให้ใบมะกรูดแห้งอย่างรวดเร็ว และมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการใช้กำลังอินฟราเรดเท่ากับ 300 W แต่กลับทำให้อุณหภูมิใบมะกรูดอบแห้งมีสีคล้ำและมีผิวสัมผัสที่แห้งกรอบ แตกหักง่ายจนไม่สามารถนำไปจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ได้ ในทำนองเดียวกันเมื่อใช้กำลังอินฟราเรดสูงก็ผลดีด้านอัตราการอบแห้งเห็ดหูหนูดำ แต่ก็ส่งผลเสียด้านคุณภาพด้านอาหารของผลิตภัณฑ์เห็ดอบแห้งเช่นกัน จากผลการทดลองดังกล่าว ผู้วิจัยจึงกำหนดกำลังอินฟราเรดที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งใบมะกรูดให้มีค่าเท่ากับ 300 W เนื่องจากคงคุณภาพด้านสีส้มของผลิตภัณฑ์ให้ใกล้เคียงกับวัตถุดิบสดมากที่สุด และไม่ทำให้ผิวสัมผัสของผลิตภัณฑ์ใบมะกรูดอบแห้งกรอบหรือแตกหักง่าย และกำลังอินฟราเรดที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งเห็ดหูหนูดำให้มีค่าเท่ากับ 400 W เนื่องจากมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการใช้กำลังอินฟราเรดเท่ากับ 300 W และไม่กระทบต่อคุณภาพด้านอาหารของผลิตภัณฑ์เห็ดหูหนูดำอบแห้ง

**ผลการทดลองที่ 3 ถึง 7** ผลการทดลองอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรด้วยลมร้อนจากเครื่องอบแห้งที่ได้ทำการออกแบบไว้ในงานวิจัย

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรด้วยลมร้อนโดยใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 และด้วยอินฟราเรดโดยใช้กำลังอินฟราเรดที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 55 °C และ 300 W สำหรับใบมะกรูด และ 65 °C และ 400 W สำหรับเห็ดหูหนูดำ ทั้งนี้ผู้วิจัยได้นำข้อมูลด้านอุณหภูมิลมร้อนและกำลังอินฟราเรดดังกล่าวไปใช้ในการทดลองที่ 3 ถึง 7 โดยทำการทดลองด้วยความเร็วลมคงที่เท่ากับ 1.5 m/s และทำการปรับเปลี่ยนแหล่งความร้อนดังนี้

**การทดลองที่ 3** ป้อนความร้อน

**การทดลองที่ 4** ฮีตเตอร์ไฟฟ้า

**การทดลองที่ 5** ป้อนความร้อน + ฮีตเตอร์ไฟฟ้า

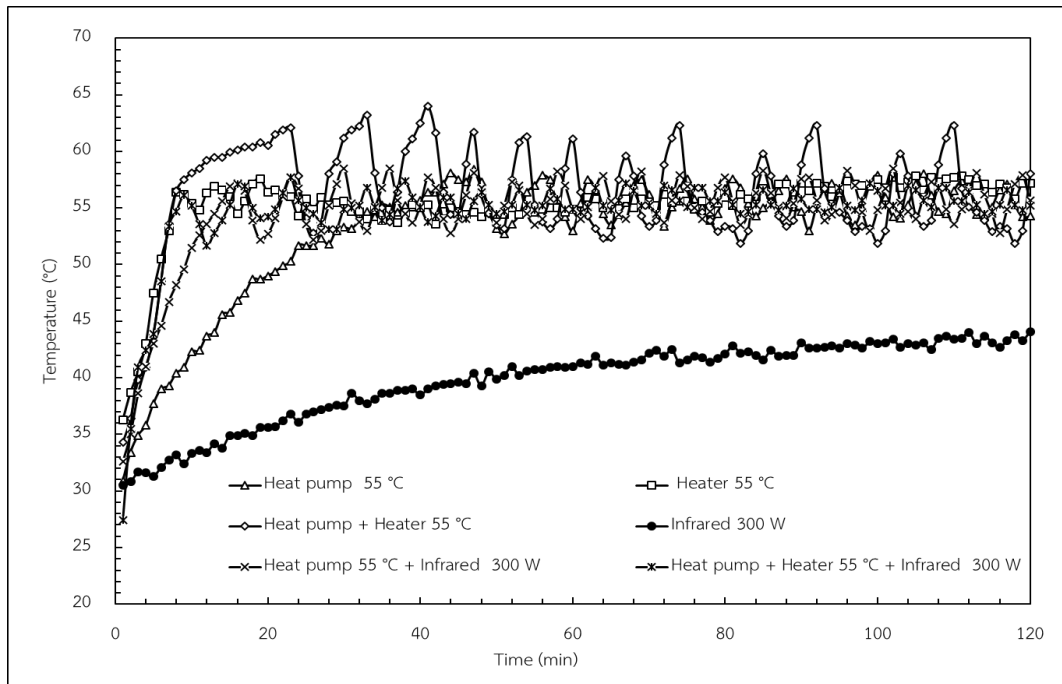
**การทดลองที่ 6** ป้อนความร้อน + อินฟราเรด

**การทดลองที่ 7** ป้อนความร้อน + ฮีตเตอร์ไฟฟ้า + อินฟราเรด

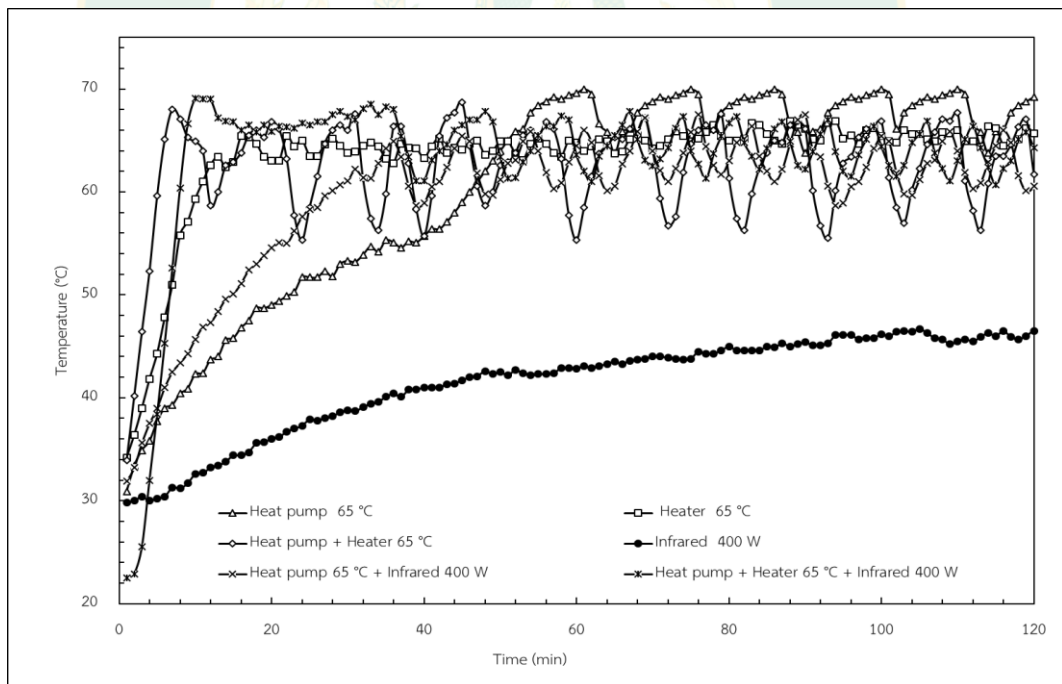
ผลการทดลองอบแห้งใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 74 %wb และ 90 %wb ตามลำดับ ให้ได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 10 %wb ด้วยแหล่งความร้อนชนิดต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### **ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง**

จากผลการทดลองอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรทั้งสองชนิดพบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งสามารถแบ่งออกเป็นสองช่วง กล่าวคือในช่วงต้นของกระบวนการอบแห้ง (0-20 min) อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและค่อย ๆ ลดอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ (Heating rate) ลงแล้วเข้าสู่สภาวะสมดุลทางอุณหภูมิ ณ ค่าที่ตั้งไว้สำหรับการอบแห้งใบมะกรูดเท่ากับ 55 °C และ 65 °C ดังภาพที่ 80 และ 81



ภาพที่ 80 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งกรณีอบแห้งใบมะกรูด



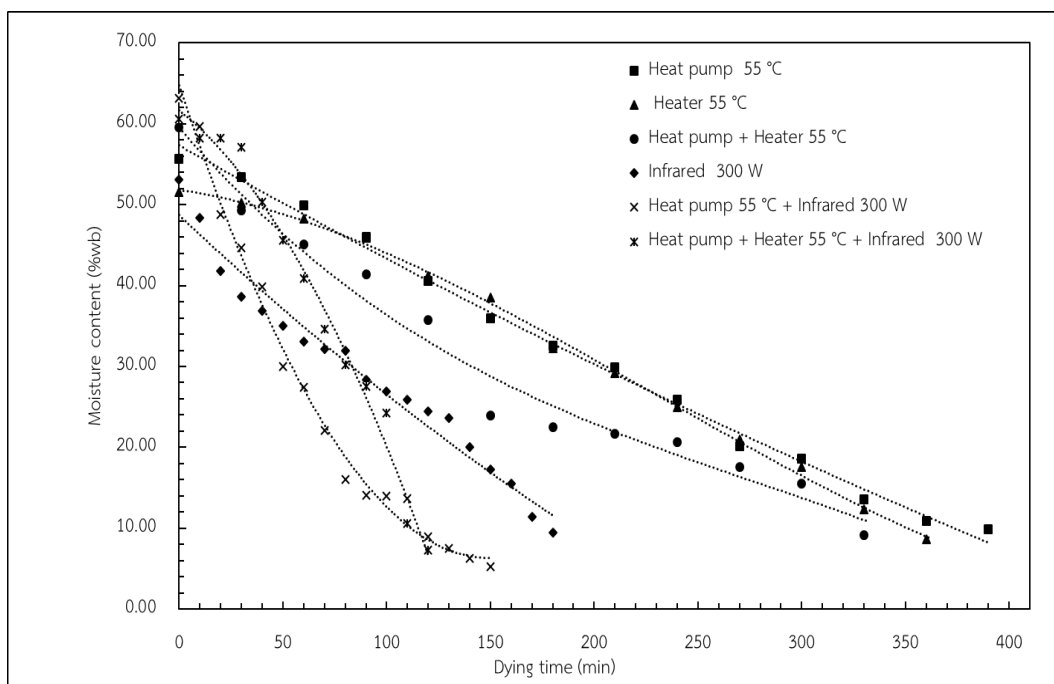
ภาพที่ 81 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งกรณีอบแห้งเห็ดหูหนูดำ



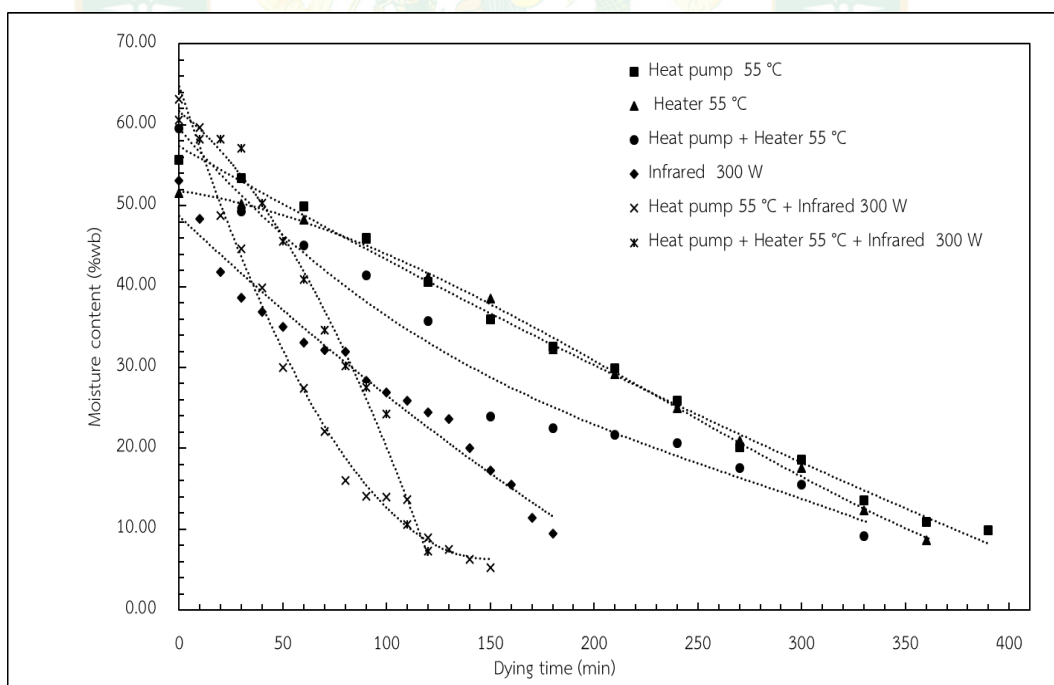
จากภาพที่ 84 และ 85 จะเห็นได้ว่าการใช้ปั๊มความร้อนเป็นแหล่งความร้อนจะมีค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (Heating rate) ภายในห้องอบแห้งต่ำที่สุด กล่าวคือ ปั๊มความร้อนสามารถทำอุณหภูมิร้อนให้ถึงค่าที่กำหนดไว้สำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดได้ช้าที่สุด แต่จะเห็นว่าเมื่อเสริมสมรรถนะการผลิตความร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะทำให้อุณหภูมิร้อนที่ผลิตได้จากระบบอบแห้งแบบผสมผสานเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้นมาก ทั้งนี้เมื่ออุณหภูมิของห้องอบแห้งถึงค่าที่กำหนดระบบจะตัดการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าแล้วปล่อยให้ปั๊มความร้อนทำงานต่อไปจนสิ้นสุดกระบวนการอบแห้งเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานในการผลิตความร้อนเนื่องจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าสูง ในทำนองเดียวกันเมื่อเสริมการให้ความร้อนด้วยอินฟราเรดก็จะยิ่งทำให้ระบบเข้าสู่สมดุลด้านอุณหภูมิเร็วยิ่งขึ้น

### **ผลความสัมพันธ์ของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาในการอบแห้ง**

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาในการอบแห้งจะพบว่าการใช้แหล่งความร้อนชนิดต่าง ๆ ส่งผลต่อความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวที่แตกต่างกัน กล่าวคือ การใช้แหล่งความร้อนที่สามารถเข้าสู่สมดุลด้านอุณหภูมิ หรือ แหล่งความร้อนที่ทำให้ห้องอบแห้งมีอุณหภูมิถึงจุดที่กำหนดเร็วกว่าส่งผลต่ออัตราการลดลงของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ที่มากกว่า ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวพบว่าการใช้ปั๊มความร้อนทำงานร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะสามารถลดความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าการใช้อุปกรณ์ทั้งสองดังกล่าวเพียงชนิดเดียว ในทำนองเดียวกันเมื่อเสริมการให้ความร้อนด้วยอินฟราเรดก็จะยิ่งทำให้ความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ลดลงถึงค่าที่ตั้งไว้ได้รวดเร็วยิ่งขึ้น โดยความสัมพันธ์ของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาในการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรทั้งสองชนิดแสดงดังภาพที่ 82 และ 83



ภาพที่ 82 ความสัมพันธ์ของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาในการอบแห้ง  
กรณีอบแห้งใบมะกรูด



ภาพที่ 83 ความสัมพันธ์ของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาในการอบแห้ง  
กรณีอบแห้งเห็ดหูหนูดำ

จากภาพการทดลองอบแห้งใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำตามเงื่อนไขการทดลองข้างต้นพบว่าการใช้แหล่งความร้อนชนิดต่าง ๆ ส่งผลต่อระยะเวลาในการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ รวมถึงประสิทธิภาพโดยรวมของระบบอบแห้งที่ต่างกัน โดยรายละเอียดของผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 6 และ 7 ตามลำดับ ตารางที่ 7 ผลการทดลองอบแห้งใบมะกรูด

ค่าพารามิเตอร์	แหล่งความร้อน							
	HP	HT	HP+HT	IR	HP+IR	HP+HT+IR	HP+HT+IR	HP+HT+IR
<b>สมรรถนะของเครื่องอบ</b>								
ระยะเวลาในการอบแห้ง (min)	450.00	390.00	330.00	170.00	150.00	120.00	120.00	120.00
อัตราการอบแห้ง ( $kg_{water}/h$ )	0.67	0.77	0.91	1.76	2.00	2.50	2.50	2.50
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh)	5.35	9.21	8.64	6.09	8.32	5.89	5.89	5.89
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kJ)	19,260.00	33,156.00	31,104.00	21,924.00	29,952.00	21,204.00	21,204.00	21,204.00
อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ( $kJ/kg_{water}$ )	3,852.00	6,631.20	6,220.80	4,384.80	5,990.40	4,240.80	4,240.80	4,240.80
อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ ( $kg_{water}/kWh$ )	0.93	0.54	0.58	0.82	0.60	0.85	0.85	0.85
ประสิทธิภาพ (%)	61.52	35.74	38.09	54.05	39.56	55.88	55.88	55.88
<b>คุณสมบัติด้านอาหารของผลิตภัณฑ์</b>								
Color parameters								
L*	37.28±1.0	41.54±0.1	37.52±0.1	38.22±0.3	37.22±0.4	36.09±0.2	36.09±0.2	36.09±0.2
a*	-6.83±0.2	-6.75±0.2	-6.78±0.2	7.05±0.2	-7.15±0.2	-7.29±0.2	-7.29±0.2	-7.29±0.2
b*	24.68±1.4	28.43±0.6	24.85±0.8	24.56±0.1	25.22±0.3	25.01±0.2	25.01±0.2	25.01±0.2
ΔE	9.69±1.3	13.51±0.6	9.89±0.7	9.57±0.1	10.50±0.1	10.54±0.3	10.54±0.3	10.54±0.3
Rehydration (%)	4.25	4.75	4.84	6.33	5.23	5.48	5.48	5.48
Water Activity (aw)	0.42	0.37	0.44	0.45	0.35	0.39	0.39	0.39

ตารางที่ 8 ผลการทดลองอบแห้งเห็ดหูหนูดำ

ค่าพารามิเตอร์	แหล่งความร้อน							
	HP	HT	HP+HT	IR	HP+IR	HP+HT+IR		
<b>สมรรถนะของเครื่องอบ</b>								
ระยะเวลาในการอบแห้ง (min)	240.00	210.00	180.00	260.00	180.00	130.00		
อัตราการอบแห้ง ( $kg_{water}/h$ )	2.25	2.57	3.00	2.08	3.00	4.15		
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh)	8.28	14.21	13.35	10.56	12.80	10.05		
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kJ)	29,808.00	51,148.80	48,060.00	38,016.00	46,080.00	36,172.80		
อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ( $kJ/kg_{water}$ )	3,312.00	5,683.20	5,340.00	4,224.00	5,120.00	4,019.20		
อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ ( $kg_{water}/kWh$ )	1.09	0.63	0.67	0.85	0.70	0.90		
ประสิทธิภาพ (%)	71.55	41.70	44.38	56.10	46.29	58.96		
<b>คุณสมบัติด้านอาหารของผลิตภัณฑ์</b>								
Color parameters	HP	HT	HP+HT	IR	HP+IR	HP+HT+IR		
L*	43.22±0.1	44.25±0.3	45.20±0.1	44.05±0.2	43.12±0.3	42.99±0.4		
a*	5.98±0.3	6.09±0.01	5.38±0.3	5.42±0.2	5.19±0.2	5.12±0.3		
b*	9.50±0.3	10.02±0.2	10.32±0.4	8.25±0.3	9.88±0.1	10.85±0.4		
$\Delta E$	20.25±0.1	23.55±0.3	22.67±0.3	20.98±0.5	21.56±0.3	21.96±0.4		
Rehydration (%)	5.89	7.85	5.40	6.62	6.07	4.22		
Water Activity (aw)	0.35	0.36	0.41	0.48	0.42	0.33		

จากตารางที่ 6 และ 7 จะเห็นได้ว่าแหล่งความร้อนที่มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุดในการอบแห้งใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำ ได้แก่ 1) ป้อนความร้อน 2) ป้อนความร้อน+ฮีตเตอร์ไฟฟ้า+อินฟราเรด 3) อินฟราเรด 4) ป้อนความร้อน+อินฟราเรด 5) ป้อนความร้อน+ฮีตเตอร์ไฟฟ้า และ 6) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาในการอบแห้งจะพบว่าเทคโนโลยีที่ทำให้การอบแห้งวัตถุดิบทั้งสองชนิดใช้เวลาน้อยที่สุด ได้แก่ 1) ป้อนความร้อน+ฮีตเตอร์ไฟฟ้า+อินฟราเรด 2) ป้อนความร้อน+อินฟราเรด 3) อินฟราเรด 4) ป้อนความร้อน+ฮีตเตอร์ไฟฟ้า 5) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า และ 6) ป้อนความร้อน ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ได้ว่าป้อนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุดสำหรับระบบอบแห้งนี้ และอินฟราเรดมีส่วนช่วยในการลดระยะเวลาในการอบแห้งได้อย่างมีนัยยะสำคัญ ส่วนฮีตเตอร์ไฟฟ้านั้นเป็นเพียงอุปกรณ์เสริมสมรรถนะเพื่อทำให้อุณหภูมิความร้อนที่ผลิตได้จากป้อนความร้อนเพิ่มขึ้นถึงระดับที่กำหนดในช่วงต้นของกระบวนการอบแห้งเท่านั้น ทั้งนี้เมื่ออุณหภูมิภายในห้องอบแห้งถึงค่ากำหนดระบบจะตัดการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าแล้วปล่อยให้ป้อนความร้อนทำงานต่อไปจนสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง และจากผลการทดสอบยังพบว่าการเสริมสมรรถนะของการอบแห้งลมร้อน (ป้อนความร้อน+ฮีตเตอร์ไฟฟ้า) ด้วยอินฟราเรดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบอบแห้งได้ประมาณ 18 % ในกรณีอบแห้งใบมะกรูดและ 15 % กรณีอบแห้งเห็ดหูหนูดำ อีกทั้งยังช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งใบมะกรูดจาก 330 min ลงเหลือ 120 min และจาก 180 min ลงเหลือ 130 min ในกรณีอบแห้งเห็ดหูหนูดำ ซึ่งคิดเป็นการลดระยะเวลาในการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรทั้งสองชนิดเท่ากับ 64% และ 28% ตามลำดับ



## ผลการวัดสมบัติด้านอาหารของผลิตภัณฑ์อบแห้ง

### อายุการเก็บรักษา

ตัวแปรที่สำคัญที่สุดซึ่งเป็นตัวกำหนดระยะเวลาในการจัดเก็บผลิตภัณฑ์อบแห้ง ได้แก่ ค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water Activity; aw) จากผลการทดลองพบว่าการใช้แหล่งความร้อนทุกแบบในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรทั้งสองชนิดสามารถผลิตสินค้าอบแห้งที่มีปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.6 ซึ่งผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรมอาหารอบแห้ง จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีอายุการเก็บรักษายาวนานตามมาตรฐาน

### คุณภาพของผลิตภัณฑ์

ค่าสีของผลิตภัณฑ์เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อราคาขายสินค้าอบแห้ง ซึ่งในกรณีผลิตภัณฑ์ใบมะกรูดอบแห้งค่าสีที่ส่งผลต่อราคา คือ ค่าความเป็นสีเขียว ( $-a^*$ ) จากตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่าการอบแห้งแบบผสมผสานอินฟราเรดร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนสามารถคงค่าความเป็นสีเขียวให้กับผลิตภัณฑ์ใบมะกรูดอบแห้งได้ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งแบบผสมผสานแหล่งความร้อนสามารถขายได้ในราคาที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาคุณสมบัติด้านสีของผลิตภัณฑ์เห็ดหูหนูอบแห้งพบว่า การอบแห้งด้วยแหล่งความร้อนแต่ละชนิดไม่ส่งผลต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ ทั้งนี้อินฟราเรดเพียงช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งเห็ดหูหนูเท่านั้น แต่เมื่อพิจารณาด้านอัตราการคืนตัว (Rehydration) ของผลิตภัณฑ์อบแห้งเมื่อนำไปแช่ในน้ำจะพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดและผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนผสมผสานอินฟราเรดจะมีค่าอัตราการคืนตัวสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว

### การวิเคราะห์ผลทางด้านเศรษฐศาสตร์

ต้นทุนการศึกษาวิจัย ออกแบบ และสร้างระบบอบแห้งแบบผสมผสานในงานวิจัยนี้รวมเป็นเงินทั้งสิ้น 1,487,435 Baht โดยระบบอบแห้งต้นแบบนี้สามารถผลิตใบมะกรูดอบแห้งที่มีความชื้นสุดท้ายประมาณ  $8.5 \pm 0.33$  %wb ได้ปริมาณ 15 kg<sub>dry</sub>/day ซึ่งสามารถส่งขายในเชิงพาณิชย์ด้วยราคาตลาดในช่วง 300 - 600 Baht/kg และสามารถผลิตเห็ดหูหนูดำอบแห้งที่มีความชื้นสุดท้ายประมาณ  $9.86 \pm 0.33$  %wb ได้ปริมาณ 3 kg<sub>dry</sub>/day ซึ่งสามารถส่งขายในเชิงพาณิชย์ด้วยราคาตลาดในช่วง 1,000 - 1,200 Baht/kg จากการคำนวณเชิงเศรษฐศาสตร์ในการผลิตสินค้าอบแห้งในเชิงพาณิชย์พบว่างานวิจัยการออกแบบและสร้างระบบอบแห้งแบบผสมผสานมีระยะเวลาในการคืนทุนประมาณ 461 day ในกรณีผลิตใบมะกรูดอบแห้ง และ 727 day ในกรณีผลิตเห็ดหูหนูดำอบแห้ง โดยข้อมูลทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการผลิตสินค้าอบแห้งทั้งสองชนิดแสดงดังตารางที่ 8 และ 9 ตามลำดับ

ตารางที่ 9 ข้อมูลทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการผลิตไบโमेทิลจากแป้งเชิงพาณิชย์

รายจ่าย	จำนวน		ราคา		รวมราคา (Baht/day)
ต้นทุนด้านวัตถุดิบต่อวัน	30	kg/day	40	Baht/kg	1,200.00
ต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้า	213	kWh/day	5	Baht/kWh	1,065.00
ต้นทุนด้านแรงงาน	1	worker	300	Baht/day	300.00
ค่าซ่อมบำรุงร้อยละ 5 ของ ยอดโครงการต่อปี	5	%/year	74,371.75	Baht/year	203.76
รวมรายจ่าย	2,768.76 Baht/day				
รายรับ	จำนวน		ราคา		รวมราคา (Baht/day)
ผลิตภัณฑ์ไบโเมทิลจากแป้ง	15	kg/day	400	Baht/kg	6,000.00
รวมรายรับ	6,000.00 Baht/day				
รายได้สุทธิ	3,231.24 Baht/day				
ระยะเวลาคืนทุนของโครงการ	461	day	1.26	year	

ตารางที่ 10 ข้อมูลทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเม็ดพืชมูลจากแป้งเชิงพาณิชย์

รายจ่าย	จำนวน		ราคา		รวมราคา (Baht/day)
ต้นทุนด้านวัตถุดิบต่อวัน	30	kg/day	35	Baht/kg	1,050.00
ต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้า	213	kWh/day	5	Baht/kWh	1,065.00
ต้นทุนด้านแรงงาน	1	worker	300	Baht/day	300.00
ค่าซ่อมบำรุงร้อยละ 5 ของ ยอดโครงการต่อปี	5	%/year	74,371.75	Baht/year	203.76
รวมรายจ่าย	2,618.76 Baht/day				
รายรับ	จำนวน		ราคา		รวมราคา (Baht/day)
ผลิตภัณฑ์เม็ดพืชมูลจากแป้ง	3	kg/day	1,200	Baht/kg	3,600.00
รวมรายรับ	3,600.00 Baht/day				
รายได้สุทธิ	981.24 Baht/day				
ระยะเวลาคืนทุนของโครงการ	727	day	1.99	year	

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างระบบอบแห้งแบบผสมผสานที่มีขนาดพิกัดทางไฟฟ้ารวม 30.25 kW ประกอบด้วยแหล่งความร้อน 3 ชนิด ได้แก่ 1) ป้อนความร้อน (Heat pump) ขนาด 5.5 kW<sub>electric</sub> 2) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric heater) ขนาด 18 kW<sub>electric</sub> และ 3) อินฟราเรด (Infrared) ขนาด 5 kW<sub>electric</sub> สามารถผลิตความร้อนรวมได้เท่ากับ 28.9 kW<sub>thermal</sub> อุณหภูมิความร้อนที่สามารถผลิตได้ในกรณีใช้ป้อนความร้อนเพียงอย่างเดียวและใช้ป้อนความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีค่าสูงสุดประมาณ 80 °C และ 120 °C ตามลำดับ ที่อัตราการไหลของอากาศสูงสุดไม่เกิน 23,600 m<sup>3</sup>/h เมื่อทำการทดลองอบแห้งใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำพบว่าอุณหภูมิความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิดนี้มีค่าเท่ากับ 55 °C และ 65 °C ตามลำดับ โดยกำลังอินฟราเรดที่ไม่ส่งผลต่อการลดลงของคุณภาพด้านอาหารของผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิดมีค่าเท่ากับ 300 W และ 400 W ตามลำดับ ด้วยสภาวะการอบแห้งดังกล่าวระบบอบแห้งแบบผสมผสานแหล่งความร้อนสามชนิดจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบเก่าที่ใช้แหล่งความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวประมาณ 69 % และ 38 % ตามลำดับ และสามารถลดการใช้พลังงานในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิดได้ประมาณ 36 % และ 29 % ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวจึงคุ้มค่าที่จะดำเนินการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรด้วยระบบอบแห้งแบบผสมผสานแหล่งความร้อนเนื่องจากประหยัดเวลาทำให้สามารถเพิ่มกำลังการผลิตต่อวันได้ และยังลดต้นทุนทางด้านพลังงานอีกด้วย ทั้งนี้เมื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ในการใช้ระบบอบแห้งต้นแบบในงานวิจัยนี้เพื่อผลิตใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำอบแห้งส่งขายในเชิงพาณิชย์พบว่า มีระยะเวลาในการคืนทุนของโครงการประมาณ 461 day ในกรณีผลิตใบมะกรูดอบแห้ง และ 727 day ในกรณีผลิตเห็ดหูหนูดำอบแห้ง ตามลำดับ

### ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากระบบอบแห้งที่ประกอบจากป้อนความร้อนมีต้นทุนในการออกแบบและสร้างค่อนข้างสูงดังนั้นการพิจารณาเลือกวัสดุอุปกรณ์ในการอบแห้งควรคำนึงถึงมูลค่าทางการตลาดของผลิตภัณฑ์อบแห้งนั้น ๆ เพื่อให้สามารถแข่งทางการตลาดได้ในอนาคต

## บรรณานุกรม

- Kudra T. and Mujumdar. A. 2009. **Advanced Drying Technologies, 2<sup>nd</sup> CRC Press, Boca Raton,FL., 327-336.**
- Arora S., Shivhare, U.S., Ahmed, J. and Raghavan G. 2003. Drying Kinetics of *Agaricus bisporus*. **Transactions of the ASAE., 46(-), 721-724.**
- Bala, B.K. . 1997. Drying and storage of cereal grains. Oxford and IBH Publishing Co, **PVT.Ltd, New Belhi 302.**
- Borompichaichartkul C., Chinprahast N., Devahastin S., Wiset L., Poomsa N. and Ratchapo T. 2010. Multistage Heat Pump Drying of Macadamia Nut under Modified Atmosphere. **Proceedings of Drying., 1853–1858.**
- Chua K.J., Mujumdar A.S., Hawlader M.N.A., Chou S.K. and Ho J.C. 2000. Batch drying of banana pieces effect of stepwise change in drying air temperature on drying kinetics and product colour. **Food Research International.,34(8),721-731.**
- Brooker D.B.,. 1992. Drying and storage grains and oilseeds. New York: AVI publishing Company.
- Driscoll T. and Johnson B. 2009. Safety and Safety Factors. The impact on heat tracing system designs. **Conference Record PCIC Europe.**
- Morris J., Chapchaimoh K., Poomsa-ad K. and Wiset L. 2016. Thermal characteristics of heat pump dryer for ginger drying. **Journal of International Review of Mechanical Engineering., 10 (4),226-271.,95(-), 491-498.**
- Mustafa A., Ataollah K., AliAmini B. and Seyfi S. 2017. Performance analysis of heat pump and infraredheat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology. **International Journal of Energy Conversion and Management.132(1), 327–338.**
- Wang Y., Zhang M., Mujumdar A. and Chen H. 2014. Drying and quality characteristics of shredded squid in an infrared-assisted convective dryer. **Drying Technology.,32(1), 1828–1839.**

- การศึกษากระบวนการอบแห้งด้วยระบบลมร้อนแบบไหลเวียน. 2560. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [www.https://ienergyguru.com/2015/09/drying/](http://www.https://ienergyguru.com/2015/09/drying/) (1 มกราคม 2561)
- เกรียงไกร ศิวเดชสกุล, กภาพล บุญธิ และชยานนท์ บุญทริกบุตร. 2554. การพัฒนาตู้อบแห้งหญ้าหวาน โดยใช้แหล่งความร้อนจากก๊าซหุงต้มหรือพลังงานแสงอาทิตย์.  
เชียงใหม่ : วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ.
- ณัฐวุฒิ ดุษฎี. 2559. การอบแห้งผลผลิตเกษตรด้วยพลังงานทดแทน เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ธนิต สวัสดิ์เสวี, พลสันต์ วงษ์ศรี, สมเกียรติ ปรัชญาวารการ และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2549. อิทธิพลของเกลือต่อการอบแห้งเนื้อหมูโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. วารสารราชบัณฑิตยสถาน, 31(2), 493-507.
- นริศ พัวพันวัฒนวรรณ, ภราดร หนูทอง, กอดขวัญ นามสงวน และศิวะ อัจฉริยวิริยะ. 2551. จลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อลำไยด้วยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22 วันที่ 15 – 17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
- ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2550. การอบแห้งไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่องวารสารวิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ ปีที่ 18 ฉบับที่ 1 (2007): January-March.
- เพชรรัตน์ ใจบุญ. 2549. การศึกษาการเปรียบเทียบการอบแห้งลำไยด้วยเทคนิคแบบต่าง ๆ วิทยานิพนธ์ (เทคโนโลยีพลังงาน) กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ภราดร หนูทอง, ชีรพงษ์ วุฒิจาม, นราวัฒน์ ปันพะสงค์, ศิวะ อัจฉริยวิริยะ และอารีย์ อัจฉริยะ. 2551. การพัฒนาเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
- ภราดร หนูทอง, ชีรพงษ์ วุฒิจาม, นราวัฒน์ ปันพะสงค์, อัจฉริยวิริยะ, ศิวะ และอารีย์ อัจฉริยะ. 2551. การพัฒนาเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
- รัฐพร บัวชม. 2547. การอบแห้งเมล็ดกาแฟสดโดยป้อนความร้อนและลมร้อน วิทยานิพนธ์ วศ.ม. เทคโนโลยีการจัดการพลังงาน กรุงเทพฯ : ม.ป.พ.
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท (พิมพ์ครั้งที่7). กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สำนักงานนโยบายและยุทธศาสตร์การค้ากระทรวงพาณิชย์. 2562. การส่งออกสินค้าเกษตรและ



อุตสาหกรรมเกษตรที่สำคัญของประเทศไทย. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา  
[https://www.tpsso.moc.go.th/th/contact\\_office](https://www.tpsso.moc.go.th/th/contact_office) (1.มกราคม 2562).

อนิรุทธิ์ ต่ายขาว และสมบัติ ทีฆทรัพย์. 2556. เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบ  
ธรรมชาติ และชนิดพาความร้อนแบบบังคับ. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย 22-  
31.





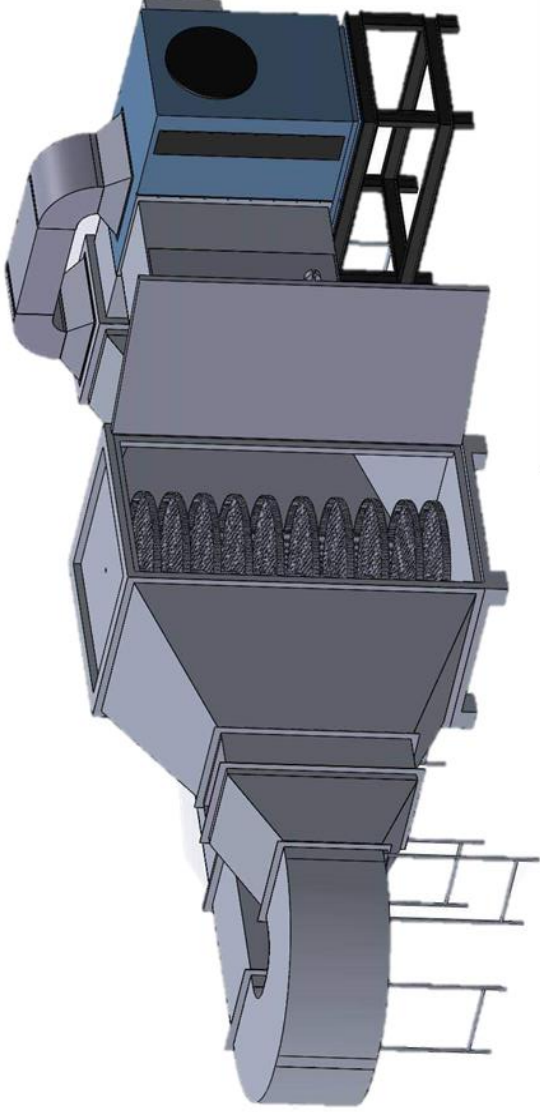
ภาคผนวก



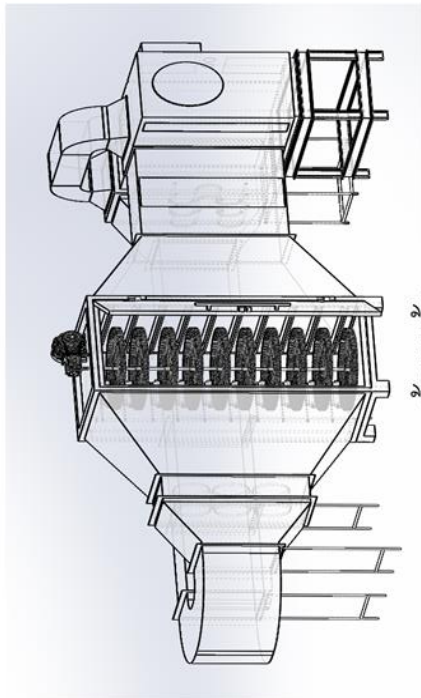
ภาคผนวก ก

แบบเครื่องอบแห้งแบบผสมผสานเพื่อการประหยัดพลังงาน

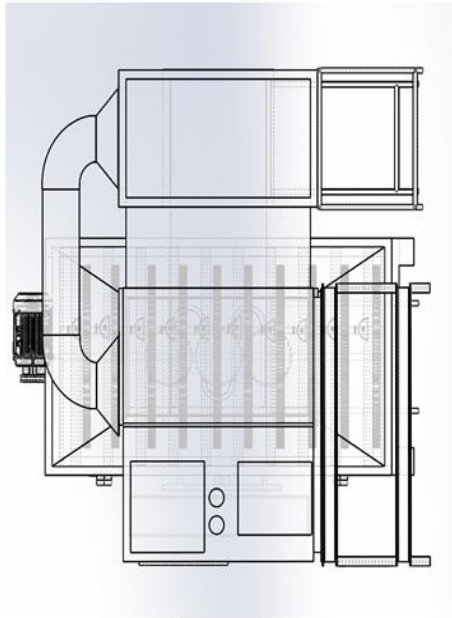
สำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

		วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	
		ผู้ออกแบบ	
ชื่องาน: แบบเครื่องอบแห้ง แบบผสมผสานเพื่อการประหยัดพลังงาน		ผู้เขียนแบบ	
แบบแผ่นที่ 1	แบบแสดง : ภาพ Isometric	ผู้ตรวจ	

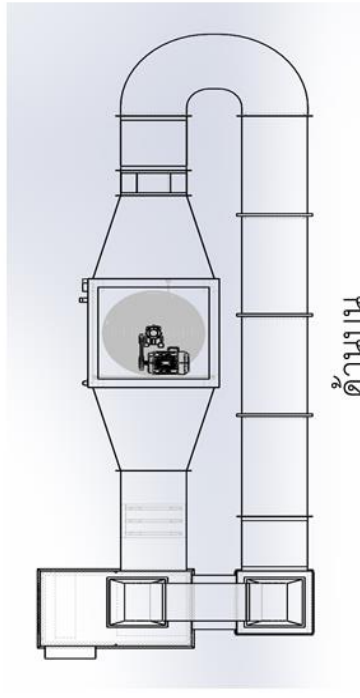
ภาพผนวกที่ 1 แบบแสดงภาพ Isometric



ด้านหน้า



ด้านข้าง

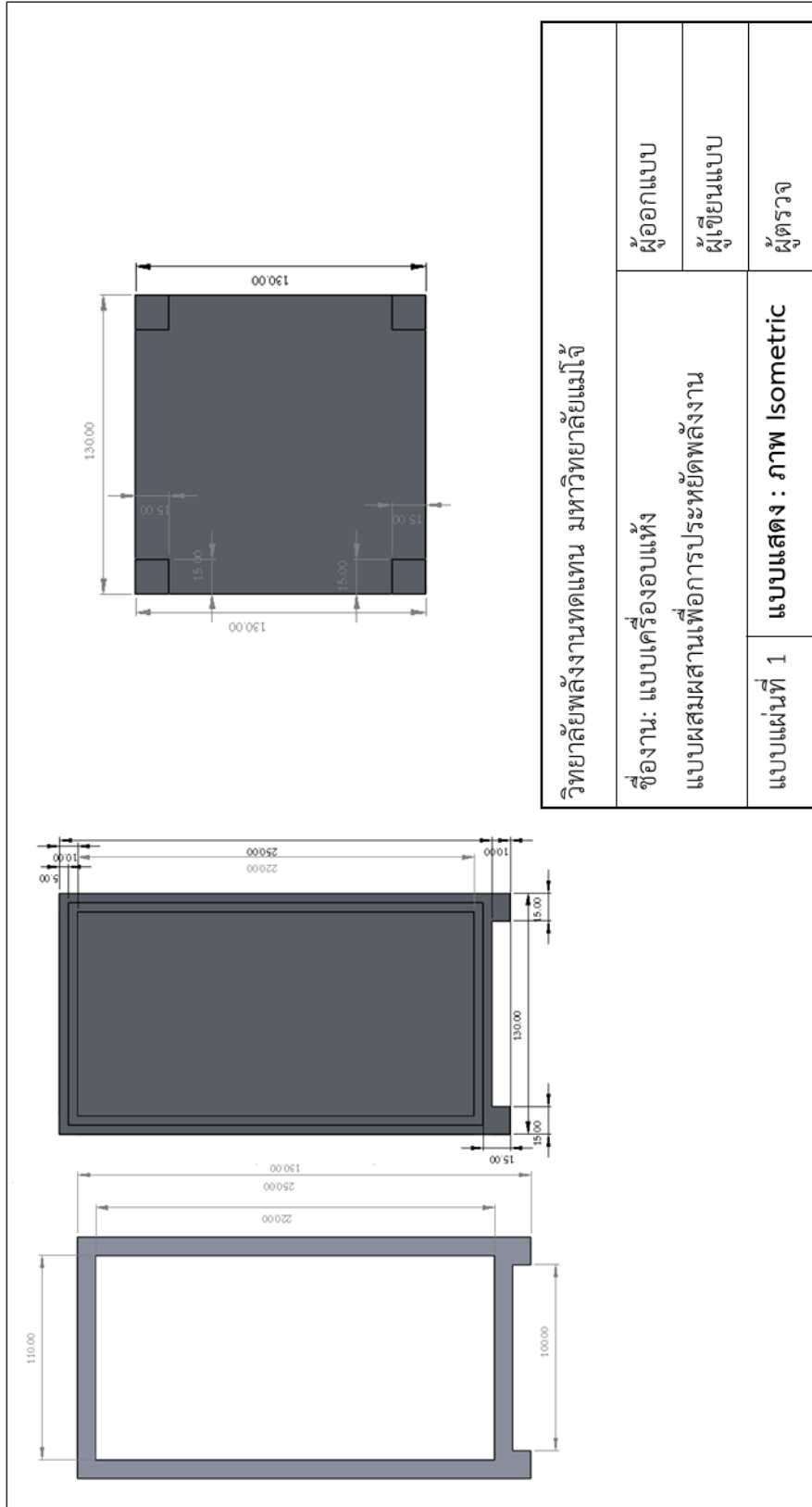


ด้านบน

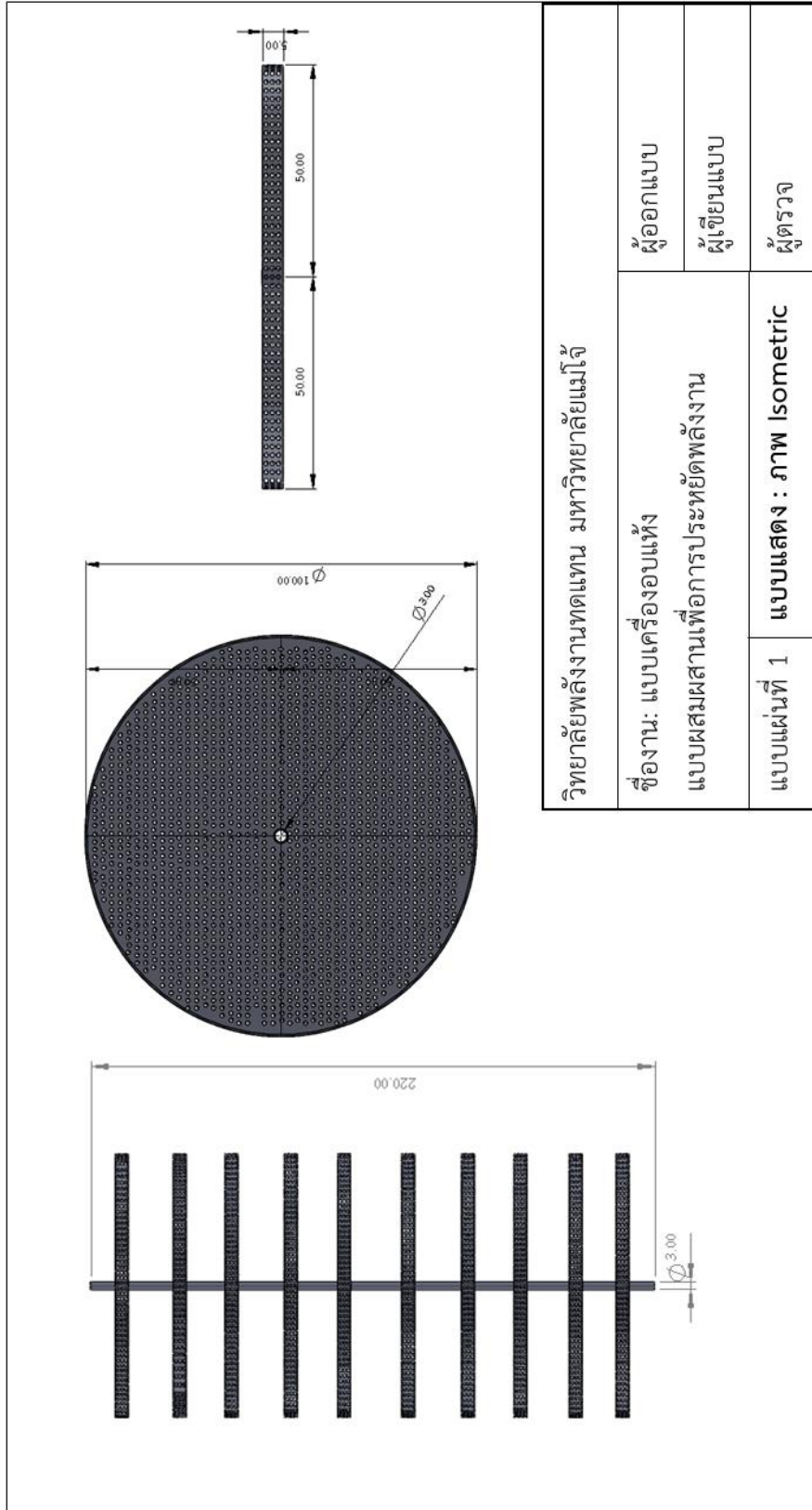
วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้		ผู้ออกแบบ
ชื่องาน: แบบเครื่องอบแห้ง		ผู้เขียนแบบ
แบบผสมผสานเพื่อการประหยัดพลังงาน		
แบบแผ่นที่ 1	แบบแสดง : ภาพแสดงมุมมอง	ผู้ตรวจ

ภาพผนวกที่ 2 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนของเครื่องอบแห้ง



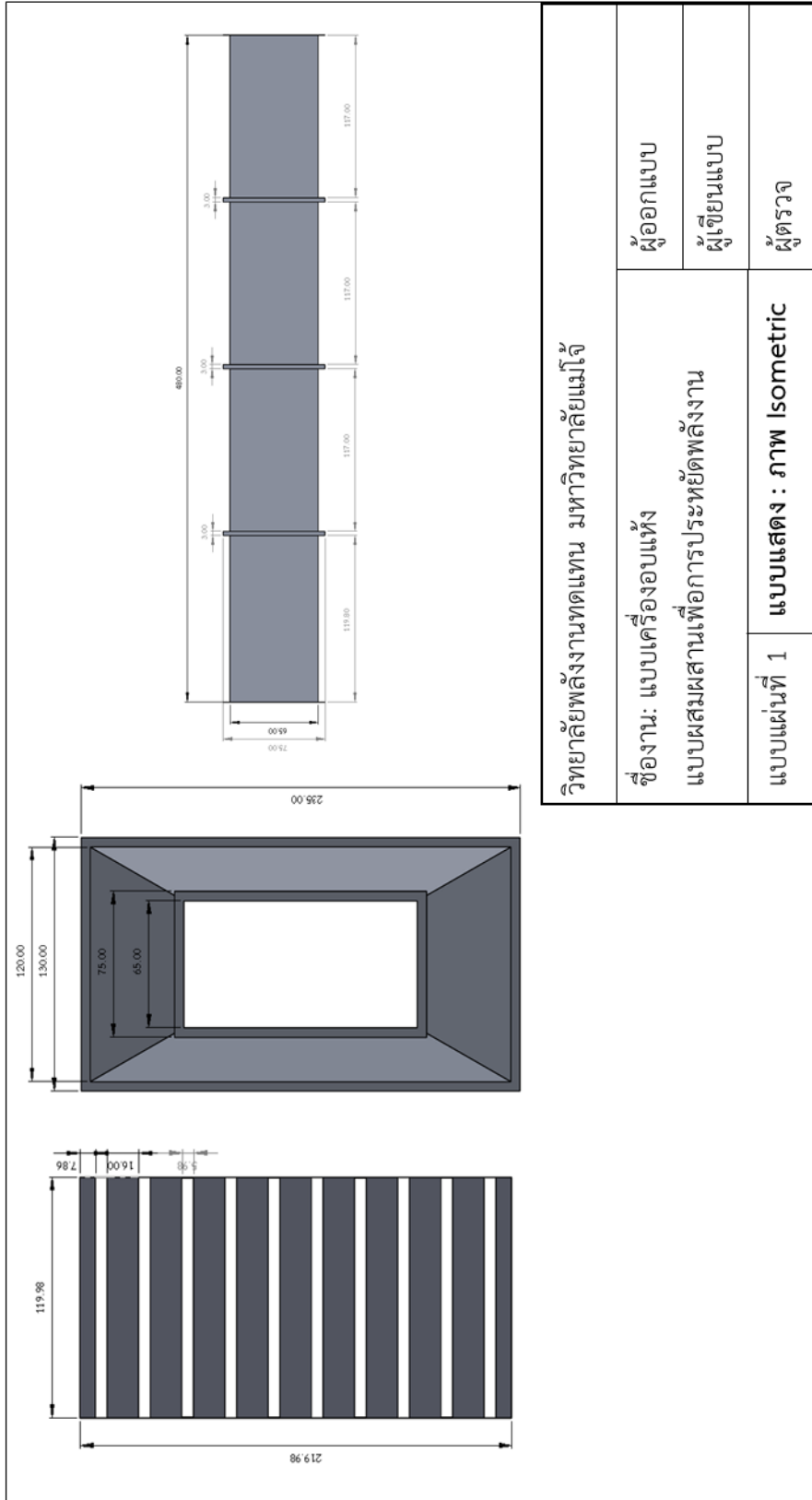


ภาพผนวกที่ 3 แบบแสดงภาพ Isometric ห้อง

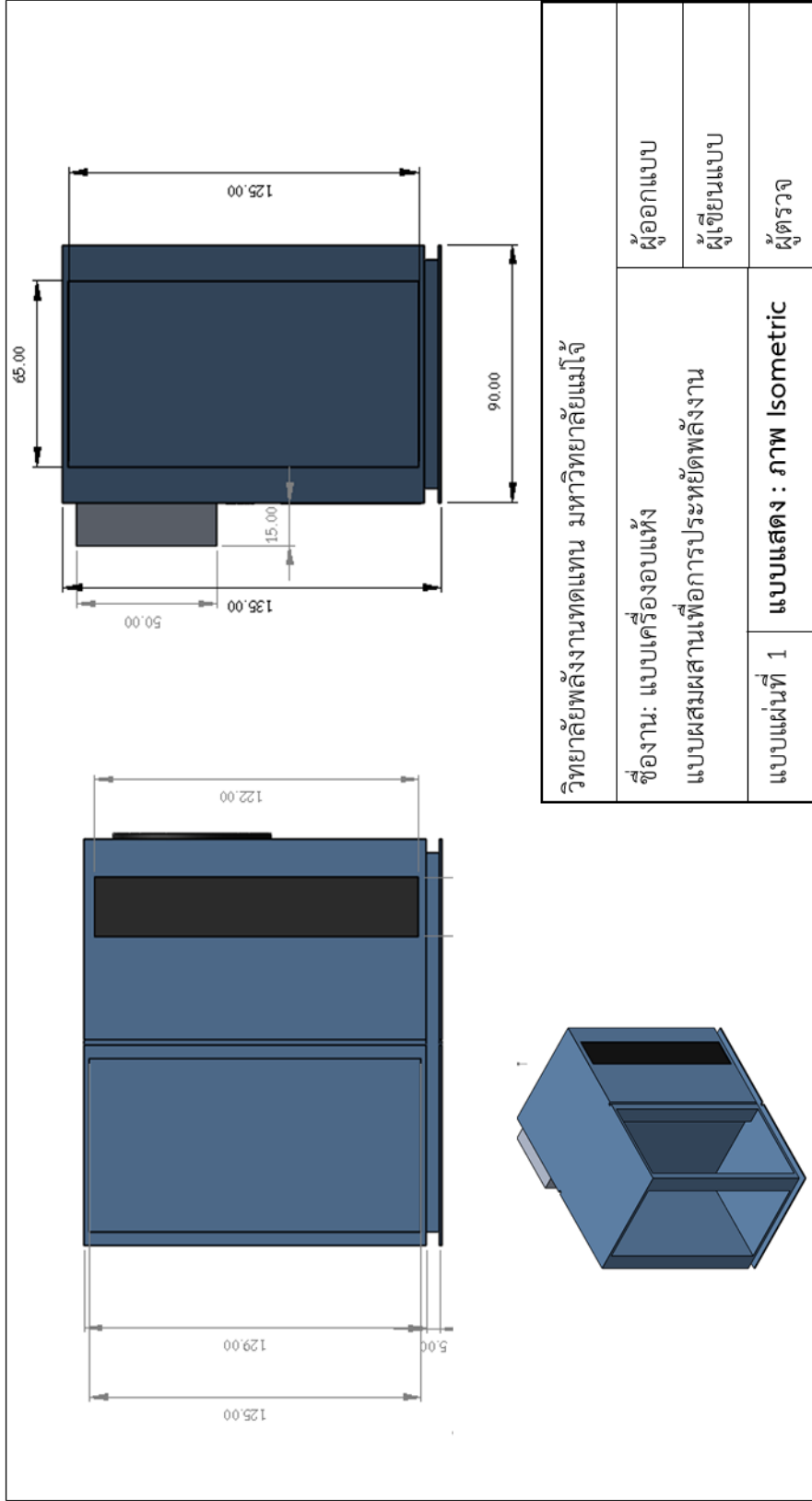


วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้		ผู้ออกแบบ
ชื่องาน: แบบเครื่องอบแห้ง		ผู้เขียนแบบ
แบบผสมผสานเพื่อการประหยัดพลังงาน		
แบบแผ่นที่ 1	แบบแสดง : ภาพ Isometric	ผู้ตรวจ

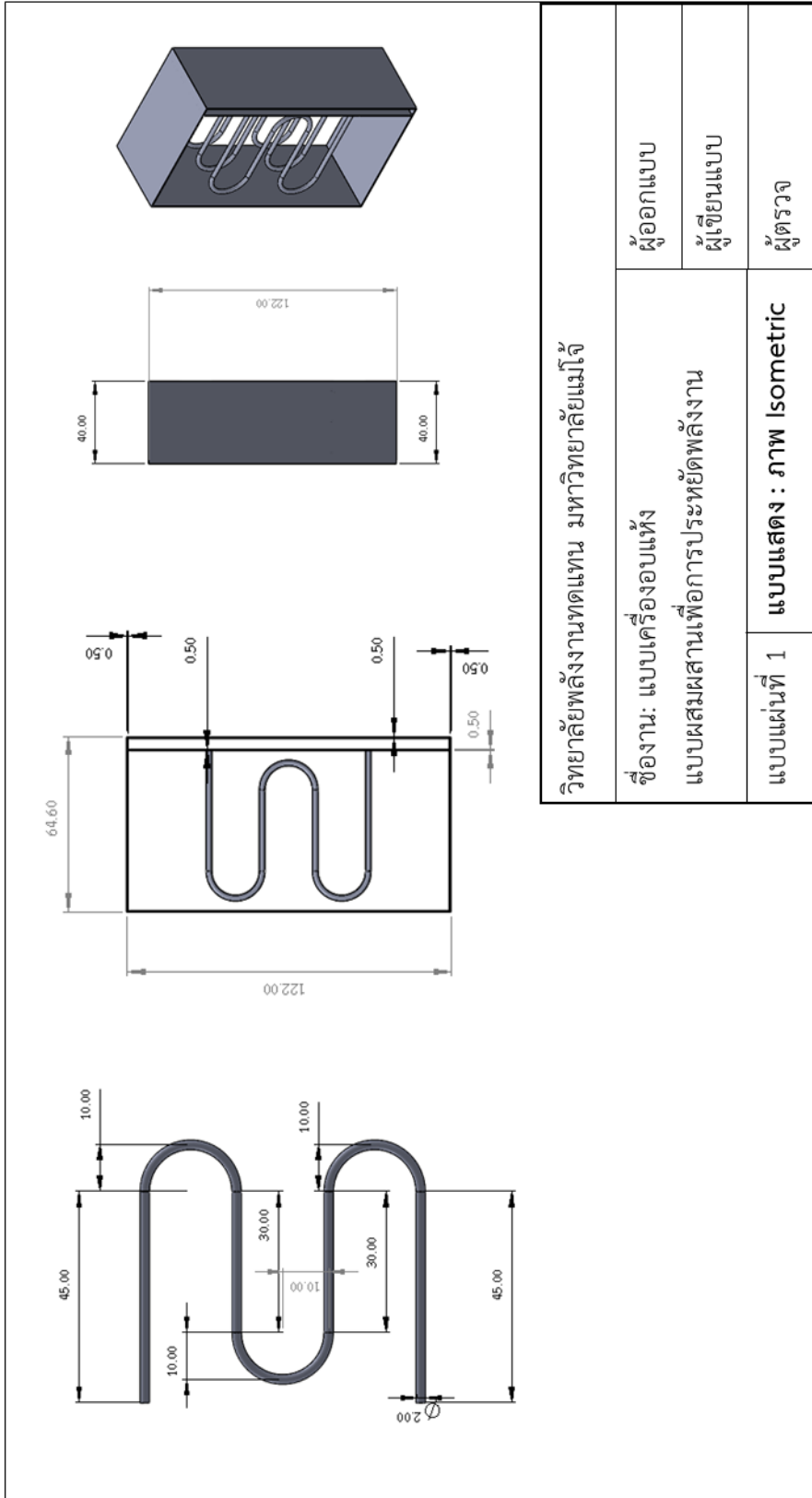
ภาพผนวกที่ 4 แบบแสดงภาพ Isometric ภาตหมุน



ภาพผนวกที่ 5 แบบแสดงภาพชุดกระจายลมร้อน



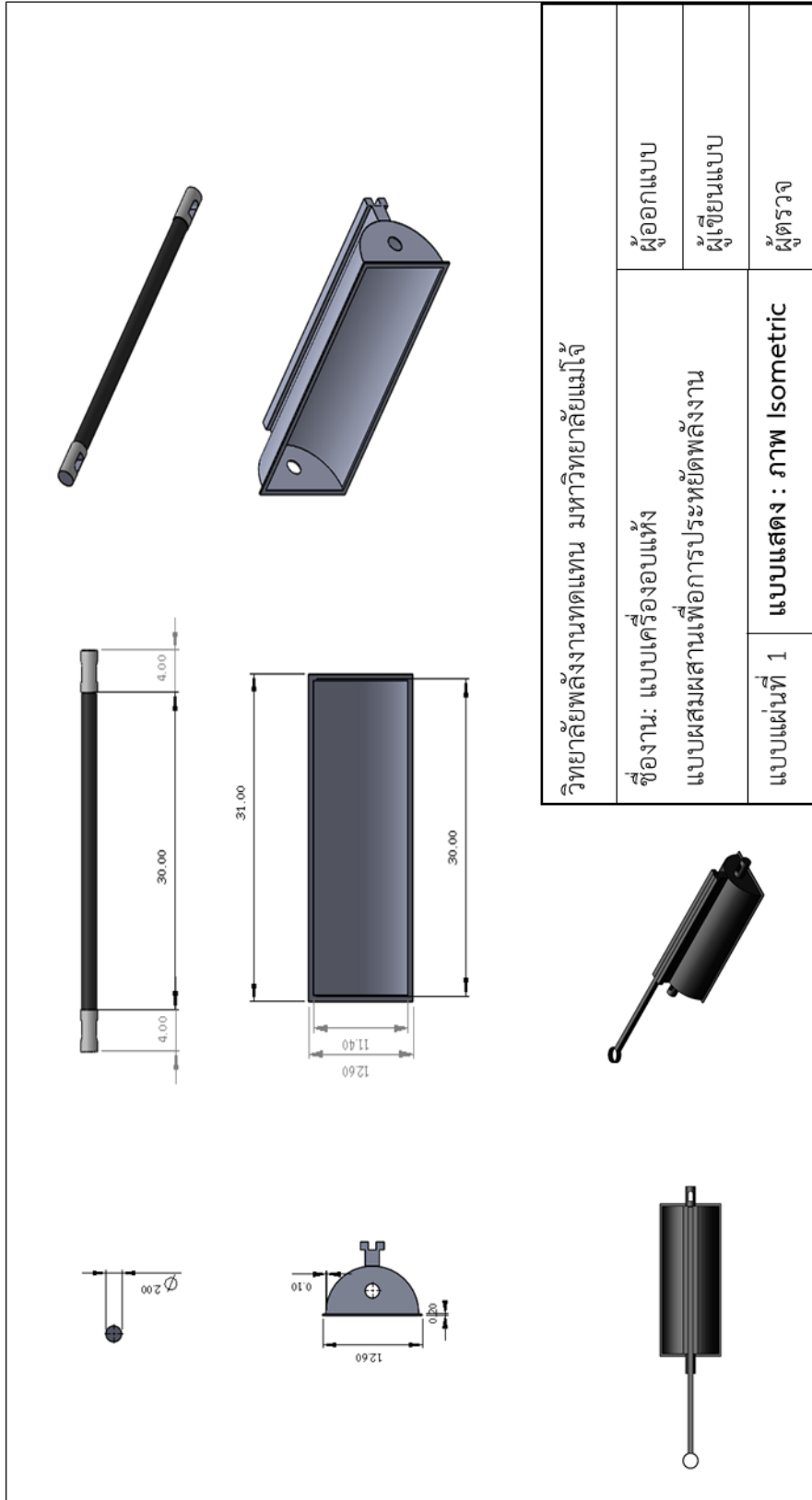
ภาพผนวกที่ 6 แบบแสดงโครงสร้างแหล่งความร้อน อีต๋ป๋ม



วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้		ผู้ออกแบบ
ชื่องาน: แบบเครื่องอบแห้ง		ผู้เขียนแบบ
แบบผสมผสานเพื่อการประหยัดพลังงาน		
แบบแผ่นที่ 1	แบบแสดง : ภาพ Isometric	ผู้ตรวจ

ภาพผนวกที่ 7 แบบแสดงโครงสร้างแหล่งความร้อน ฮีตเตอร์ไฟฟ้า





วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้		ผู้ออกแบบ
ชื่องาน: แบบเครื่องอบแห้ง		ผู้เขียนแบบ
แบบผสมผสานเพื่อการประหยัดพลังงาน		
แบบแผ่นที่ 1	แบบแสดง : ภาพ Isometric	ผู้ตรวจ

ภาพผนวกที่ 8 แบบแสดงโครงสร้างแหล่งความร้อน อินฟราเรด



ภาคผนวก ข

ตัวอย่างข้อมูลจากการทดลองอบแห้งใบมะกรูด

**ตารางภาคผนวกที่ 1** การวิเคราะห์ผลการทดลองการอบแห้งใบมะกรูดโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากบั้งความร้อนที่อุณหภูมิ 55 °C

t (min)	T <sub>amb</sub> (°C)	RH <sub>amb</sub> (%)	T <sub>wb</sub> (°C)	T <sub>db</sub> (°C)	อุณหภูมิบริเวณทางเข้า (°C)			
					T <sub>in1</sub>	T <sub>in2</sub>	T <sub>out1</sub>	T <sub>out2</sub>
0	26.1	52.0	26.2	27.6	27.6	27.6	26.2	26.2
30	25.3	41.0	37.5	50.7	54.7	54.7	54	54.8
60	27.2	43.0	38.2	54.1	56	55	54	54.3
90	29.0	42.0	39.3	56.5	59	59.3	56.2	57.0
120	30.6	39.0	40.3	53.2	55.6	56.5	55.8	55.1
150	31.5	27.0	37	59.9	59.9	59.9	57.2	57.0
180	32.3	36.0	38.5	54.7	57.2	57	57	56.8
เฉลี่ย	33.0	31.9	35.4	51.0	52.9	52.9	51.5	50.7

**ตารางภาคผนวกที่ 2** การวิเคราะห์ผลการทดลองการอบแห้งใบมะกรูดโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 55 °C

t (min)	T <sub>amb</sub> (°C)	RH <sub>amb</sub> (%)	T <sub>wb</sub> (°C)	T <sub>db</sub> (°C)	อุณหภูมิบริเวณทางเข้า (°C)			
					T <sub>in1</sub>	T <sub>in2</sub>	T <sub>out1</sub>	T <sub>out2</sub>
0	26.10	52.0	25.1	33.6	33.2	33.2	31.2	31.2
30	25.30	41.0	26.4	52.9	55.9	55.6	55	55
60	27.20	43.00	28.2	53	56	56	55.2	55.3
90	29.00	42.00	30.1	57.2	57.2	57.6	57.2	56.6
120	30.60	39.00	32	56.9	56.9	56.8	54.8	55.2
150	31.50	27.00	36.6	57.8	58.8	58.6	57.2	58
180	32.30	36.00	38.5	57.8	58.8	58.8	56.8	56.8
เฉลี่ย	33.01	31.90	31.0	52.7	53.8	53.8	52.5	52.6

**ตารางภาคผนวกที่ 3** การวิเคราะห์ผลการทดลองการอบแห้งใบมะกรูดโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากอินฟราเรดที่กำลังวัตต์ไฟฟ้า 300 W

t (min)	T <sub>amb</sub> (°C)	RH <sub>amb</sub> (%)	T <sub>wb</sub> (°C)	T <sub>db</sub> (°C)	อุณหภูมิบริเวณทางเข้า (°C)			
					T <sub>in1</sub>	T <sub>in2</sub>	T <sub>out1</sub>	T <sub>out2</sub>
0	26.10	52.00	25.6	29.1	29.1	29.1	28.1	28.1
10	25.30	41.00	27.7	32.9	33.9	32.9	32	32
20	27.20	43.00	30.3	39.6	39.4	39.6	38	38
30	29.00	42.00	31.3	42.2	43.2	42.2	41.2	41.2
40	30.60	39.00	31.8	44.5	45.2	44.5	44	44
50	31.50	27.00	32.1	44.9	44.3	44.9	44.1	44.1
60	32.30	36.00	32.8	44.9	44.8	45.9	45	45
70	32.90	34.00	32.7	45.3	45.3	45.3	45.3	45.3
80	33.70	31.00	32.1	45.4	45.4	45.4	45.4	45.4
90	34.60	28.00	32.9	46.4	46.4	46.4	4.4	4.4
เฉลี่ย	33.01	31.90	31.04	41.52	41.7	41.62	36.75	36.75

**ตารางภาคผนวกที่ 4** การวิเคราะห์ผลการทดลองการอบแห้งใบมะกรูดโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากปั๊มความร้อน ฮีตเตอร์ไฟฟ้า และอินฟราเรทที่กำลังวัตต์ไฟฟ้า 300 W อุณหภูมิ 55 °C

t (min)	T <sub>amb</sub> (°C)	RH <sub>amb</sub> (%)	T <sub>wb</sub> (°C)	T <sub>db</sub> (°C)	อุณหภูมิบริเวณทางเข้า (°C)			
					T <sub>in1</sub>	T <sub>in2</sub>	T <sub>out1</sub>	T <sub>out2</sub>
0	26.10	52.00	24.3	30.5	31.5	31.5	30.5	30.5
10	25.30	41.00	31	55.3	55.3	56.3	55.3	55.3
20	27.20	43.00	36.4	51.4	52.4	52.4	50.4	50.4
30	29.00	42.00	36.5	52.7	52.7	52.7	50.7	50.4
40	30.60	39.00	37	53.4	51.4	52.4	51.4	50.7
50	31.50	27.00	34.4	54	54.4	54.3	51.8	51.6
60	32.30	36.00	35.1	53.5	54.5	54.5	53.5	53.0
70	32.90	34.00	35.4	54.2	55.2	55.2	54.1	54.2
80	33.70	31.00	34.9	59.4	59.4	59.4	56.4	56.3
90	34.60	28.00	35.4	59.8	59.8	59.8	59.8	59.8
เฉลี่ย	33.01	31.90	34.14	52.42	52.66	52.85	51.39	51.22





ภาคผนวก ค  
ตัวอย่างการคำนวณ

**ตัวอย่าง** การคำนวณกรณีทดลองอบแห้งใบมะกรูดโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบผสมผสานที่อุณหภูมิ 55 °C กำลังอินพุต 300 W

### 1) ตัวอย่างการคำนวณหาอัตราการอบแห้ง (Drying rate)

เมื่อทำการอบแห้งใบมะกรูดที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 10 kg และมีน้ำหนักสุดท้าย 5.00 kg ใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 120 min ดังนั้นอัตราการอบแห้งพิจารณาได้ดังนี้

$$\text{Drying rate} = \frac{m_w}{t}$$

$$\text{Drying rate} = \frac{5.00 \text{ kg}}{(120/60)}$$

$$\text{Drying rate} = 2.50 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$$

ดังนั้น อัตราการอบแห้งมีค่าเท่ากับ 2.50 kg<sub>water</sub>/h

### 2) พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบอบแห้ง (Energy input; Q<sub>input</sub>)

จากข้อมูลการทดลองพบว่าการอบแห้งใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 5.89 kWh ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบอบแห้ง (Energy input; Q<sub>input</sub>) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{kJ} = \text{kWh} \times 3600$$

$$Q_{\text{input}} = 5.89 \times 3600 = 21,204.00 \text{ kJ}$$

### 3) อัตราความพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

อัตราความพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะ (SEC) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{SEC} = \frac{\text{ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง}}{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง}}$$

$$\text{SEC} = \frac{21,204.00 \text{ kJ}}{5.00 \text{ kg}_{\text{water}}}$$

$$\text{SEC} = 4,240.80 \text{ kJ/kg water}$$

#### 4) ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง ( $\eta_{\text{dryer}}$ )

ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์กับพลังงานที่ป้อนให้กับระบบอบแห้ง สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\eta_{\text{dryer}} = \frac{Q_{\text{output}}}{Q_{\text{input}}} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{dryer}} = \frac{M_{\text{water}} \cdot h_{\text{fg}}}{Q_e} \times 100\%$$

พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ (Energy output;  $Q_{\text{output}}$ ) จากการทดลองอบแห้งใบมะกรูดที่มีน้ำหนักเริ่มต้นเท่ากับ 10.00 kg จนเหลือน้ำหนักสุดท้ายเท่ากับ 5.00 kg ด้วยอุณหภูมิ 55 °C พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Q_{\text{output}} = m_{\text{water}} \cdot h_{\text{fg}@ 55 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$Q_{\text{output}} = 5 \text{ kg} \times 2,369.80 \text{ kJ/kg water} = 11,849 \text{ kJ}$$

โดยข้อมูลจากข้างต้น

$$Q_{\text{input}} = 21,204.00 \text{ kJ}$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\eta_{\text{dryer}} = (11,849 \text{ kJ} / 21,204 \text{ kJ}) \times 100 \%$$

$$\eta_{\text{dryer}} = 55.88 \%$$

### 5) การคำนวณค่าสี่ของผลิตภัณฑ์

ตัวอย่างจากการตรวจวัด พบว่าใบมะกรูดอบแห้งแล้ว มีค่า  $L1^* = 46.06$ ,  $a1^* = 5.49$ ,  $b1^* = 9.96$  โดยที่ใบมะกรูดสด มีค่า  $L2^* = 49.36$ ,  $a2^* = 5.53$ ,  $b2^* = 9.39$  สามารถคำนวณหาผลต่างของสีใบมะกรูด ดังนี้

เมื่อ

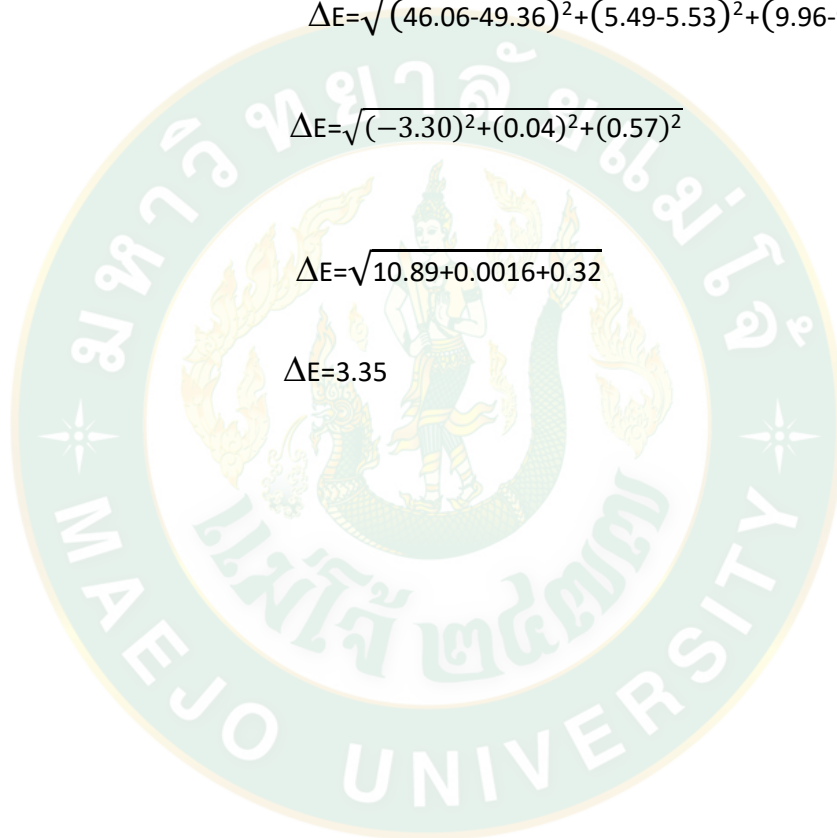
$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2}$$

$$\Delta E = \sqrt{(46.06 - 49.36)^2 + (5.49 - 5.53)^2 + (9.96 - 9.39)^2}$$

$$\Delta E = \sqrt{(-3.30)^2 + (0.04)^2 + (0.57)^2}$$

$$\Delta E = \sqrt{10.89 + 0.0016 + 0.32}$$

$$\Delta E = 3.35$$



## สัญลักษณ์และอักษรย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$m_w$	มวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ	(kg)
$h_{fg}$	ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ	(kJ/kg)
$\dot{m}_a$	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ	(kg/s)
$c_a$	ความร้อนจำเพาะของอากาศ	(kJ/kg°C)
$T_{ai}$	อุณหภูมิอากาศก่อนอบแห้ง	(°C)
$T_{af}$	อุณหภูมิของอากาศหลังอบแห้ง	(°C)
$t$	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง	(s)
$m_i$	น้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุ	(kg)
$M_{di}$	ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุมาตรฐานแห้ง	(%wb)
$M_{df}$	ความชื้นสุดท้ายของวัสดุมาตรฐานแห้ง	(%db)
$M_w$	อัตราส่วนความชื้นมาตรฐานเปียก	(%wb)
$M_d$	อัตราส่วนความชื้นมาตรฐานแห้ง	(%db)
$m_w$	มวลของความชื้น	(kg)
$m_d$	มวลของวัสดุแห้ง	(kg)
$Q_e$	อัตราการทำความเย็นของเครื่องทำละเหย	(kW)
$\dot{m}_{ac}$	อัตราการไหลอากาศผ่านเครื่องทำระเหย	(kg/s)
$T_{ei}$	อุณหภูมิก่อนเข้าเครื่องทำระเหย	(°C)
$T_{eo}$	อุณหภูมิของอากาศออกจากเครื่องทำระเหย	(°C)
$\dot{m}_a$	อัตราการไหลของอากาศผสม	(kg/s)
$\dot{m}_{bp}$	อัตราการไหลของอากาศ bypass	(kg/s)
$T_{ci}$	อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องอบแห้ง	(°C)
$T_f$	อุณหภูมิอากาศหลังการอบแห้ง	(°C)
$Q_{cin}$	อัตราการทำความร้อนของเครื่องควบแน่นตัวใน	(kW)
$T_{co}$	อุณหภูมิของอากาศจากเครื่องควบแน่น	(°C)
$Q_{cex}$	อัตราการทำความร้อนของเครื่องควบแน่นตัวนอก	(kW)
$W_c$	กำลังของเครื่องอัดไอ	(kW)
DR	อัตราการอบแห้ง	( kg <sub>water</sub> /h หรือ %db/h)
$m$	น้ำหนักของวัสดุ	(kg)



อักษรย่อ	ความหมาย	หน่วย
t	ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง	(h)
SMER	อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ	(kg <sub>water</sub> /kWh)
Pe	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้	(kWh)
SEC	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	(MJ/kg <sub>water</sub> )
MER	อัตราควบแน่นน้ำ	(kg/h)
Energy	พลังงานที่เข้าไปในระบบ	(kW)
HHV	ค่าความร้อนสูง	(kJ/kg)
M <sub>LPG</sub>	น้ำหนักของเชื้อเพลิง	(kg)
P	กำลังไฟฟ้า	(W)
E	แรงดัน	(V)
I	กระแส	(A)
SEC	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	(MJ/kg <sub>water</sub> )
T <sub>Energy</sub>	พลังงานที่เข้าไปในระบบ	(kW)
W <sub>loss</sub>	น้ำหนักที่หายไปในระหว่างลดความชื้น	(kg)
η <sub>dryer</sub>	ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง	%

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายพิบูลย์ สีคำ
เกิดเมื่อ	13 กันยายน พ.ศ 2537
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2560 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ พ.ศ. 2555 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนวังทองพิทยาคม พ.ศ. 2552 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนพัฒนราษฎร์ ตั้งตรงจิตร 12
ประวัติการทำงาน	-

