

การพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
เครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2564

การพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
เครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

สำนักบริหารและพัฒนาระบบราชการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
เครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

ยงยุทธ ใต้เงาสน

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญ 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	การพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร
ชื่อผู้เขียน	นายยงยุทธ ใต้เงาสน
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญ คงกระพันธ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรทั้งสิ้น 2 ชนิด ได้แก่ 1) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ และ 2) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดไหลขวาง โดยทำการออกแบบและจำลองการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากการทดสอบพบว่า การติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองแบบช่วยเพิ่มค่า อัตราการระเหยน้ำ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ และอุณหภูมิอากาศขาเข้าเครื่องอบแห้ง อีกทั้งยังช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าและลดอัตราการปล่อยความร้อนทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมได้อีกด้วยส่งผลต่อให้เครื่องอบแห้งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ อุปกรณ์ทั้งสองชนิดสามารถลดการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำได้ประมาณ 5 % ถึง 7 % จากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีสมรรถนะสูงกว่าแบบเปลือกและท่อเล็กน้อยในทุกค่าพารามิเตอร์ โดยการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางสามารถเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้าเครื่องอบแห้งได้สูงสุดประมาณ 35 % ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งเพิ่มขึ้นเท่ากับ 7.54 % ในขณะที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อสามารถเพิ่มอุณหภูมิได้สูงสุดประมาณ 26 % โดยส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งเพิ่มได้เท่ากับ 5.81 % ตามลำดับ

คำสำคัญ : กระบวนการอบแห้ง, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, การเพิ่มประสิทธิภาพ, การประหยัดพลังงาน, การอนุรักษ์พลังงาน

Title	DEVELOPMENT OF SUITABLE HEAT EXCHANGERS FOR EFFICIENCY ENHANCEMENT OF DRYER FOR AGRICULTURAL PRODUCTS
Author	Mr. Yongyoot Taingaoson
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Parin Khongkrapan

ABSTRACT

The purpose of this research is to develop heat exchangers and investigate the factors that influence the efficiency of the agricultural product dryer. This research has developed two types of heat exchangers for semi-industrial dryer, 1) Shell and Tube Heat Exchanger and 2) Cross Flow Heat Exchanger. A computer software was used to develop and simulate heat exchangers. Using both heat exchangers enhanced the dryer's drying rate, specific drying rate, and inlet air temperature, lower energy consumption, and reduced the rate of waste heat release into the environment, according to the test. As a result, the dryer operates at a higher efficiency. Both devices can reduce the energy consumption in the drying process of kaffir lime leaf and wood ear mushroom by approximately 5% to 7%. From the test results, a cross flow heat exchanger has higher performance than the other in all parameters. A cross flow heat exchanger enhances the temperature of the dryer's input air by about 35% and boosts the dryer's efficiency by around 7.54%. A shell and tube raised the temperature by about 26% and improves the efficiency by 5.81% respectively.

Keywords : drying process, heat exchanger, optimization energy saving, energy conservation

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ยาวุฑฒิ ซึ่งได้ให้เกียรติเป็นประธาน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจนให้คำปรึกษาและแนะนำแก้ไขปรับปรุงวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญ คงกระพันธ์ที่ได้รับเป็นประธานที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์และกรุณาให้ความรู้คำแนะนำต่าง ๆ รวมถึงคำปรึกษาตลอดจนให้ความดูแล และเอาใจใส่ จนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ลุล่วงสำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวงและขอขอบพระคุณ ผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.หยาดฝน ทนงการกิจ ซึ่งให้เกียรติเป็นที่ปรึกษาร่วมในการทำวิทยานิพนธ์และให้ คำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์รวมถึงตรวจแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์นี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่ให้ทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ใน "โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงาน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับ บัณฑิตศึกษา" ครั้งนี้

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

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบคุณครอบครัวและพี่ ๆ เพื่อน ๆ ทุกท่าน รวมถึงอาจารย์และบุคลากร วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่คอยให้ความช่วยเหลือสนับสนุนหลาย ๆ ด้าน พร้อมทั้ง คำแนะนำและเป็นกำลังใจจนทำให้สำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

ยงยุทธ ใต้เงาสน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
อักษรย่อและสัญลักษณ์.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์.....	3
ขอบเขตการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
1. การอบแห้ง.....	5
2. เครื่องอบแห้ง.....	9
3. การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ (Waste Heat Recovery)	10
4. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger).....	15
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบอบแห้งและเครื่องอบแห้ง	25
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่.....	26
3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	29

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนที่กลับมาใช้ประโยชน์ในระบบอบแห้ง.....	31
สรุปสาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
บทที่ 3 อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	39
อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการวิจัย.....	39
1. เครื่องวัดค่าพลังงานไฟฟ้า	39
2. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple).....	39
3. เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ	40
4. เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer).....	41
5. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller)	42
6. อินเวอร์เตอร์ (Inverter).....	43
7. เครื่องอบแห้ง (Dryer)	43
8. เครื่องวัดวิเคราะห์ความชื้น (Moisture Analyzer).....	44
9. เครื่องชั่งดิจิตอล.....	45
10. เครื่องวัดความเข้มของแสง (Spectrophotometer).....	46
11. เครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water Activity meter).....	46
12. ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรใช้ในการทดสอบ	47
วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	48
การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	49
การทดสอบระบบอบแห้ง.....	51
การทดลองอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร	53
การเตรียมวัตถุดิบในการทดลองอบแห้ง	54
การทดลองอบแห้งผลิตภัณฑ์.....	55
การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูล	57
ข้อมูลเชิงวิศวกรรมพลังงาน	57

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางอาหารของผลิตภัณฑ์อบแห้ง.....	57
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย.....	60
ผลการวิจัยส่วนที่ 1: ผลการออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	60
ผลการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and Tube Heat Exchanger).....	61
ผลการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดไหลขวาง (Cross Flow Heat Exchanger).....	62
ผลการจำลองการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	63
ผลการวิจัยส่วนที่ 2: ผลการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร.....	66
ผลการทดลองอบแห้งใบมะกรูด.....	66
การใช้พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้งใบมะกรูด.....	68
อัตราการปล่อยความร้อนที่สูญเสียแวดล้อมของการอบแห้งใบมะกรูด.....	69
ค่าสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง.....	70
คุณสมบัติทางอาหารของผลิตภัณฑ์ใบมะกรูดอบแห้ง.....	71
การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งใบมะกรูด.....	73
ผลการทดลองอบแห้งเห็ดหูหนูดำ.....	74
การใช้พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้งเห็ดหูหนูดำ.....	75
อัตราการปล่อยความร้อนที่สูญเสียแวดล้อมของการอบแห้งเห็ดหูหนูดำ.....	76
ค่าสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง.....	77
คุณสมบัติทางอาหารของเห็ดหูหนูดำอบแห้ง.....	78
การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งเห็ดหูหนูดำ.....	80
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	81
สรุปผลการทดลอง.....	81
ข้อเสนอแนะ.....	82

บรรณานุกรม..... 83

ภาคผนวก..... 87

 ภาคผนวก ก แบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 88

 ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ..... 100

ประวัติผู้วิจัย..... 106



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แหล่งความร้อนทิ้ง อุณหภูมิ ข้อดีข้อเสีย และเทคโนโลยีที่นำมาใช้	11
ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของไหลทำงานต่าง ๆ	18
ตารางที่ 3 สมการความสัมพันธ์สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน	22
ตารางที่ 4 สรุปสาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
ตารางที่ 5 ข้อมูลเฉพาะของเทอร์โมคัปเปิลชนิด K	40
ตารางที่ 6 ข้อมูลเฉพาะเครื่องวัดความเร็วลม ใบพัดแยก ยี่ห้อ Richmoto รุ่น WM-04.....	42
ตารางที่ 7 ค่าสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ กรณีอบแห้งใบมะกรูด	71
ตารางที่ 8 คุณสมบัติทางอาหารของใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ	72
ตารางที่ 9 ผลประหยัดและระยะเวลาคืนทุนสำหรับการอบแห้งใบมะกรูด	73
ตารางที่ 10 ค่าสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ กรณีอบแห้งเห็ดหูหนูดำ	78
ตารางที่ 11 คุณสมบัติทางอาหารของเห็ดหูหนูดำที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ ...	79
ตารางที่ 12 ผลประหยัดและระยะเวลาคืนทุนสำหรับการอบแห้งเห็ดหูหนูดำ	80

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ปริมาณการผลิตไฟฟ้าและปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า.....	2
ภาพที่ 2 การใช้พลังงานไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2556-2561	2
ภาพที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของวัสดุฉนวนระหว่างกระบวนการอบแห้ง.....	6
ภาพที่ 4 ลักษณะของอัตราการอบแห้งในช่วงอัตราเร็วลดลง.....	8
ภาพที่ 5 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน	9
ภาพที่ 6 การนำความร้อนเหลือทิ้งไปใช้โดยตรง	13
ภาพที่ 7 การนำความร้อนเหลือทิ้งไปใช้โดยอ้อม	13
ภาพที่ 8 แนวทางการนำความร้อนเหลือทิ้งจากก๊าซไอเสียกลับมาใช้	14
ภาพที่ 9 Thermal resistance network associated with heat transfer	17
ภาพที่ 10 การวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	19
ภาพที่ 11 การพิจารณาค่า ΔT_1 และ ΔT_2 จากทิศทางการไหลของของไหล.....	20
ภาพที่ 12 รูปแบบการจัดวางกลุ่มท่อ.....	21
ภาพที่ 13 แผนภาพของการใช้ก๊าซไอเสีย	27
ภาพที่ 14 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน.....	27
ภาพที่ 15 ลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน (HPHE).....	28
ภาพที่ 16 กราฟแสดงค่าการประหยัดพลังงานสุทธิของเครื่องอบแห้ง 3 แบบ	30
ภาพที่ 17 ลักษณะก่อนและหลังของติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	31
ภาพที่ 18 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบหมุน ในระบบอบแห้ง	32
ภาพที่ 19 เครื่องวัดค่าพลังงานไฟฟ้า ยี่ห้อ Eastron รุ่น SDM630MCT	39
ภาพที่ 20 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K	40
ภาพที่ 21 เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ	41

ภาพที่ 22 เครื่องวัดความเร็วลม ใบพัดแยก.....	41
ภาพที่ 23 PID Temperature Controller.....	42
ภาพที่ 24 อินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น D700.....	43
ภาพที่ 25 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนที่ใช้งานวิจัยนี้.....	44
ภาพที่ 26 รายละเอียดเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน.....	44
ภาพที่ 27 เครื่องวัดวิเคราะห์ความชื้น Ohaus รุ่น MB25.....	45
ภาพที่ 28 เครื่องชั่งดิจิทัลยี่ห้อ Ohaus รุ่น Defender 2000.....	45
ภาพที่ 29 เครื่องวัดความเข้มของแสง (Spectrophotometer).....	46
ภาพที่ 30 เครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ (aw).....	47
ภาพที่ 31 ลักษณะใบมะกรูดสดและเห็ดหูหนูดำสดที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	47
ภาพที่ 32 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	48
ภาพที่ 33 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ.....	49
ภาพที่ 34 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง.....	50
ภาพที่ 35 การกำหนดตำแหน่งของอุปกรณ์และเครื่องมือวัด.....	51
ภาพที่ 36 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	52
ภาพที่ 37 (A) ไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (B) ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	53
ภาพที่ 38 ขั้นตอนการเตรียมใบมะกรูด (A) ใบมะกรูดที่ผ่านการทำความสะอาด.....	54
ภาพที่ 39 ขั้นตอนการเตรียมเห็ดหูหนูดำ (A) เห็ดที่ผ่านการทำความสะอาดและตัดแต่ง (B) การชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการอบแห้ง (C) การบรรจุเห็ดในถาดอบ.....	54
ภาพที่ 40 ตัวอย่างวัตถุในถาดความชื้น.....	55
ภาพที่ 41 การทดลองอบแห้งผลิตภัณฑ์ (A) ใบมะกรูด และ (B) เห็ดหูหนูดำ.....	56
ภาพที่ 42 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์อบแห้ง.....	57
ภาพที่ 43 การเตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์อบแห้งสำหรับการวิเคราะห์ค่าสีและค่า aw.....	58
ภาพที่ 44 (A) การวิเคราะห์ค่าการคืนตัวของผลิตภัณฑ์ (B) การวิเคราะห์ค่าสีของผลิตภัณฑ์.....	59

ภาพที่ 45 ผลการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ	61
ภาพที่ 46 ผลการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดไหลขวาง	62
ภาพที่ 47 ทิศทางการไหลและอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	63
ภาพที่ 48 การจำลองการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางที่มีความสูงกลุ่มท่อ	65
ภาพที่ 49 การจำลองการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ	65
ภาพที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาในการอบแห้งใบมะกรูด	67
ภาพที่ 51 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกระแสน้ำ	68
ภาพที่ 52 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้งใบมะกรูด	69
ภาพที่ 53 อัตราการปล่อยความร้อนทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมของการอบแห้งใบมะกรูด	70
ภาพที่ 54 ใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ	71
ภาพที่ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาในการอบแห้งเห็ดหูหนูดำ	74
ภาพที่ 56 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกระแสน้ำ	75
ภาพที่ 57 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้งเห็ดหูหนูดำ	76
ภาพที่ 58 อัตราการปล่อยความร้อนทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมของการอบแห้งเห็ดหูหนูดำ	77
ภาพที่ 59 เห็ดหูหนูดำที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ	78

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อน	kW
V	ความเร็ว	m/s
A	พื้นที่หน้าตัด	m ²
C _p	ความจุความร้อนจำเพาะ	kJ/kg K
T	อุณหภูมิ	°C
X	ระยะทางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน	m
k	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	W/m °C
h	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน	W/m ² °C
U	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	W/m ² ·K
R	ความต้านทานทางความร้อน	W/m ²
M	ค่าความชื้น	%wd
m	มวล	kg
E	พลังงานไฟฟ้า	kWh
SEC	อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	kJ/kg _{Water}
SMRE	อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ	kJ _{Water} /kWh
S	ระยะตามแนวทิศทางการไหล	
Re	ค่าเรย์โนลด์เบอร์	
F	แฟคเตอร์แก้ไข	
NTU	ความสัมพัทธ์ระหว่าง NTU	
D	เครื่องอบแห้ง	
CEx	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง	
SEx	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ	

ตัวกรีก	ความหมาย	หน่วย
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล	kg/s
λ	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ	kJ/kg
α	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	W/m ² ·K
ϵ	ค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	%
η	ค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	%
h	ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ	kJ/kg
μ	ค่าความหนืดเชิงพลศาสตร์	Pa·s
ρ	ความหนาแน่น	kg/m ³
v	ปริมาตรจำเพาะ	m ³ /kg

ตัวห้อย

ความหมาย

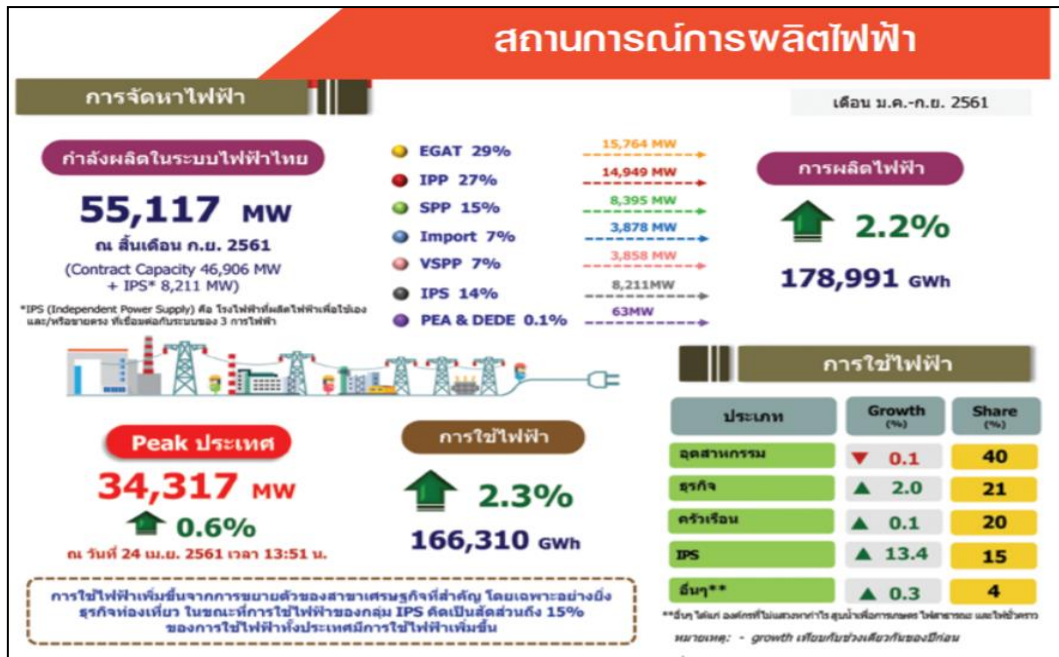
c	Cool
h	Hot
f	Fluid
g	Gas
H	High
L	Low
i	Inlet
o	Outle
fg	fluid gas
Ex	Heat Exchanger
min	minimum
max	maximum
Water	
Air	
total	

บทที่ 1

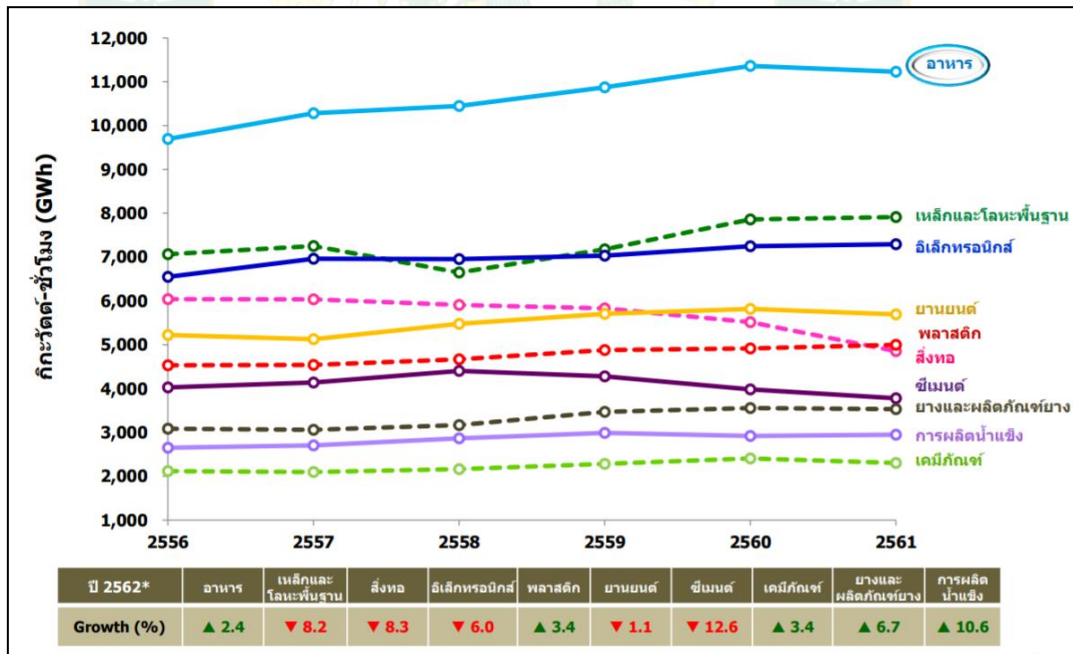
บทนำ

ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

พลังงานมีความสำคัญในการขับเคลื่อนและพัฒนาประเทศ ในปัจจุบันก็มีความต้องการใช้พลังงานปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น โดยพลังงานที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ พลังงานไฟฟ้าซึ่งผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ นั้นมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นตามอัตราการเติบโตทางเศรษฐกิจ จำนวนประชากร (สำนักงานนโยบายและแผนพัฒนาพลังงาน, 2562) ไฟฟ้านั้นมีการใช้มากที่สุดในภาคอุตสาหกรรมเมื่อเทียบกับการใช้พลังงานในภาคอื่น ๆ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมอาหารมีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากเป็นอันดับหนึ่ง (กระทรวงพลังงาน, 2562) ดังภาพที่ 2 แสดงถึงการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมากในขณะที่ปริมาณเชื้อเพลิง หรือพลังงานสำรองนั้นลดลง และยังมีราคาที่จะเพิ่มขึ้นด้วย ปัจจุบันจึงมีการหาวิธีการแก้ปัญหาวิกฤตพลังงานดังกล่าว เช่น การส่งเสริมให้ทุกภาคส่วนสร้างมาตรการประหยัดพลังงาน ตลอดจนการปรับปรุงอุปกรณ์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นซึ่งเป็นการลดใช้พลังงานหรือการใช้พลังงานให้คุ้มค่าที่สุด หนึ่งในวิธีการลดใช้พลังงานที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย คือ การนำความร้อนทิ้งมาใช้ใหม่ (Waste Heat Recovery) หรือการรีไซเคิลพลังงาน (อุทัย, 2556) เป็นการนำพลังงานที่ใช้แล้วซึ่งปกติจะปล่อยทิ้งไปแต่ยังมีศักยภาพอยู่กลับมาใช้ใหม่โดยเปลี่ยนรูปให้เป็นพลังงานความร้อนหรือพลังงานไฟฟ้า เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบต่าง ๆ ในขณะเดียวกันก็สามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานและลดมลภาวะในการปล่อยแก๊สเรือนกระจกไปด้วยในตัวอีกด้วย (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2561)



ภาพที่ 1 ปริมาณการผลิตไฟฟ้าและปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า
ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2561)



ภาพที่ 2 การใช้พลังงานไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2556-2561
ที่มา: กระทรวงพลังงาน (2562)

จากที่กล่าวข้างต้นการเมื่อพิจารณาถึงการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมอาหารก็จะพบว่าการ
อบแห้ง ผลผลิตทางการเกษตรซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการผลิตอาหาร และเป็นกระบวนการที่ใช้
พลังงานปริมาณมาก โดยกระบวนการดังกล่าวนั้นเป็นการไล่ความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ ซึ่งส่วนใหญ่
เป็นการใช้ความร้อนในการระเหยความชื้นแล้วปล่อยทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม (ใจทิพย์, 2550) กล่าวคือ
อากาศร้อนที่ระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์สูงจะถูกปล่อยทิ้งออกจากระบบ
อบแห้ง แล้วทำการเติมอากาศร้อนที่มีความชื้นต่ำจากภายนอกเข้าสู่ระบบเพื่อทำการระเหยน้ำออก
จากผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง (เจนจิรา, 2545) เมื่อทำการสมดุลพลังงานที่ถ่ายเทเข้าและออกจาก
ระบบจะพบว่าอากาศชื้นที่ปล่อยทิ้งออกจากระบบอบแห้งนั้นยังคงมีพลังงานความร้อนหลงเหลืออยู่
เป็นเหตุให้มีแนวคิดที่จะนำความร้อนส่วนดังกล่าวกลับมาใช้ในการอุ่นอากาศที่มีความชื้นต่ำจาก
ภายนอกก่อนที่จะเติมเข้าสู่ระบบอบแห้งโดยผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)
เพื่อเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศร้อนปล่อยทิ้งกับอากาศที่ต้องการเติมเข้า
สู่ระบบดังที่กล่าวข้างต้น โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเครื่องแลกเปลี่ยน
ความร้อนจะส่งผลให้พลังงานที่เคยปล่อยทิ้งไปอย่างเปล่าประโยชน์กลับเข้าสู่ระบบซึ่งส่งผลให้ระบบ
อบแห้งที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใช้พลังงานลดลงและยังช่วยลดอุณหภูมิอากาศร้อนที่ปล่อย
สู่สิ่งแวดล้อมด้วย (Amirhossein A., 2018)

จากเหตุผลข้างต้น งานวิจัยนี้จึงทำการพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่จะติดตั้งกับเครื่อง
อบแห้งระดับกึ่งอุตสาหกรรมเพื่อนำความร้อนทิ้งจากกระบวนการอบแห้งกลับมาใช้ประโยชน์ซึ่งเป็น
การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับอุปกรณ์ การลดใช้พลังงาน และลดการปล่อยความร้อนทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม
ตามนโยบายของภาครัฐ อีกทั้งยังถือเป็นการนำความรู้ทางด้านวิศวกรรมมาประยุกต์ใช้ในการ
แก้ปัญหาสถานการณ์วิกฤตพลังงานที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน

วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องอบแห้ง
ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

2.2 เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการเพิ่มประสิทธิภาพ
เครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

ขอบเขตการศึกษา

3.1 ออกแบบ สร้าง และทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) 2 แบบ ได้แก่ Shell and Tube Heat Exchanger และ Cross Flow Heat Exchanger

3.2 ศึกษาการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ได้แก่ ใบมะกรูด และเห็ดหูหนู

3.3 ศึกษาการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรด้วยลมร้อนที่มีอุณหภูมิในช่วง $50 - 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ และความเร็วลมในช่วง $1.0 - 2.0\text{ m/s}$

3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่

1) ระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่ทำการติดตั้งและไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

2) ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งที่ทำการติดตั้งและไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

3) สมบัติทางอาหารของผลิตภัณฑ์อบแห้ง ได้แก่ ความชื้น สี และคุณค่าทางอาหาร



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนที่กลับมาใช้ประโยชน์ในระบบอบแห้งโดยการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มีดังต่อไปนี้

1. การอบแห้ง

การอบแห้ง (Drying) คือ การเอาน้ำออกจากวัสดุที่ต้องการทำให้ปริมาณน้ำในวัสดุนั้นลดลง (ความชื้นลดลง) (กิตติศักดิ์, 2553) โดยส่วนใหญ่วัสดุอบแห้งจะอยู่ในสถานะของแข็ง น้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอาจไม่จำเป็นต้องระเหยที่จุดเดือดแต่ใช้อากาศพัดผ่านเพื่อดึงน้ำออกจากบริเวณผิวของวัสดุ จะได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีสัดส่วนของของเหลวต่ำลง ซึ่งนอกจากวัตถุดิบที่มีสภาพเป็นของแข็งขึ้นแล้ว ยังมีกรณีอบแห้งวัตถุดิบที่เป็นของเหลวข้น (Slurry) หรือของเหลวใสเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ผงอีกด้วย โดยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ต้องพิจารณาในกระบวนการอบแห้งมีดังต่อไปนี้

1.1 ความชื้นของวัสดุ

ความชื้นของวัสดุ คือ ค่าพารามิเตอร์ที่แสดงถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเทียบกับมวลรวมของวัสดุนั้น แบ่งเป็น 2 ประเภทได้แก่ 1) ความชื้นฐานเปียก หรือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis) เป็นค่าที่แสดงถึงสัดส่วนปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุต่อมวลรวมเปียก และ 2) ความชื้นฐานแห้ง หรือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis) เป็นค่าที่แสดงถึงสัดส่วนปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุต่อมวลรวมแห้ง โดยค่าความชื้นทั้ง 2 ประเภทดังกล่าวสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ความชื้นมาตรฐานเปียก (M_w)

$$M_w = \left(\frac{W_w - W_d}{W_w} \right) \times 100\% \quad \text{สมการที่ 1}$$

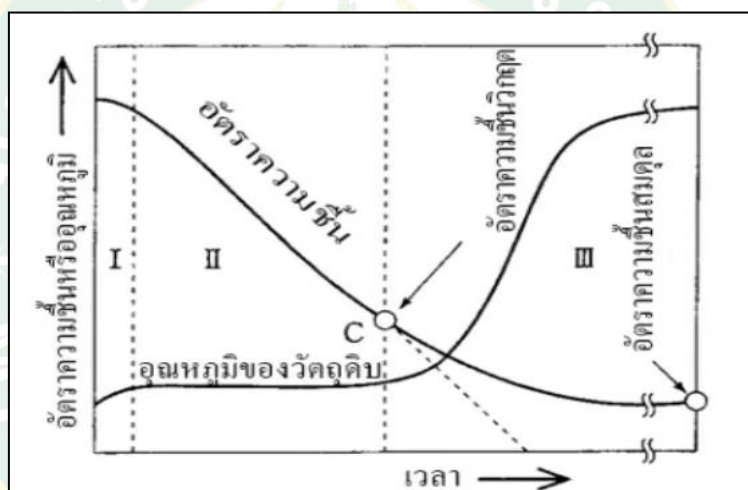
ความชื้นมาตรฐานแห้ง (M_d)

$$M_d = \left(\frac{W_w - W_d}{W_d} \right) \times 100\% \quad \text{สมการที่ 2}$$

เมื่อ	M_w	คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (%wb)
	M_d	คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (%db)
	W_w	คือ มวลรวมของวัสดุเปียก (kg)
	W_d	คือ มวลรวมของวัสดุแห้ง (kg)

1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับอุณหภูมิอบแห้ง

การอบแห้งวัสดุเปียกขึ้นด้วยลมร้อนจะพบว่าความชื้นภายในวัสดุจะมีค่าลดลงในขณะที่อุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นขั้นตอน ซึ่งกลไกการอบแห้งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระยะที่มีลักษณะแตกต่างกัน ได้แก่ (I) ช่วงอุ่นวัสดุ (II) ช่วงอบด้วยอัตราเร็วคงที่ (III) ช่วงอบด้วยอัตราเร็วลดลง (ยรรยง, 2549) แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของวัสดุระหว่างกระบวนการอบแห้ง
ที่มา: ยรรยง (2549)

จากภาพที่ 3 กลไกการอบแห้งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

(I) ช่วงอุ่นวัสดุ เป็นช่วงที่อุณหภูมิของวัสดุจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิตั้งต้น (อุณหภูมิห้อง) จนถึงอุณหภูมิสมดุลที่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการอบ ในกรณีที่วัสดุได้รับความร้อนด้วยการพาความร้อนโดยลมร้อน อุณหภูมิสมดุลนี้จะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะแห้งของลมร้อนนั้น

(II) ช่วงอบแห้งด้วยอัตราคงที่ เป็นช่วงที่วัสดุมีอุณหภูมิคงที่ ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่วัสดุได้รับความร้อนจะนำไปใช้ในการระเหยความชื้นเท่านั้น ขั้นตอนการระเหยจะเกิดที่ผิวหน้าของวัสดุ

โดยอัตราการอบแห้งจะมีค่าคงที่ ซึ่งจะดำเนินไปตราบเท่าที่มีความชื้นอิสระให้ระเหยอยู่ที่ผิวหน้าของวัสดุดิบ โดยอัตราความชื้นของวัสดุดิบจะลดลงด้วยอัตราคงที่

(III) ช่วงอบด้วยอัตราลดลง เมื่อดำเนินกระบวนการอบแห้งอย่างต่อเนื่องทำให้อุณหภูมิแกนกลางของวัสดุดิบจะเริ่มเข้าใกล้อุณหภูมิของลมร้อนทำให้ชั้นของการระเหยเลื่อนลงลึกเข้าสู่เนื้อวัสดุดิบ ในขณะที่เดียวกันความชื้นบริเวณผิวของวัสดุดิบที่มีค่าลดลงจะส่งผลให้ความชื้นอิสระภายในเนื้อวัสดุดิบซึมขึ้นมาทดแทนแต่ก็ไม่ทันกับอัตราการระเหยที่ผิวหน้าทำให้อัตราการอบแห้งค่อย ๆ ลดลงตามเวลาที่ผ่านไป

1.3 อัตราการอบแห้ง (Drying rate)

อัตราการอบแห้ง มี 2 ลักษณะดังนี้

(1) อัตราการอบแห้งคงที่ ในช่วงนี้ปริมาณความร้อนที่วัสดุดิบได้รับทั้งหมดจะถูกใช้ไปในการระเหยความชื้น เกิดเป็นสภาพสมดุลจลน์ขึ้นโดยวัสดุดิบจะมีอุณหภูมิคงที่ (T_m) โดยอัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขภายนอกเป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้คือ อุณหภูมิลมร้อน (T) และความชื้นของลมร้อน (H) โดยอัตราในการอบแห้งคงที่ (R_A) จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

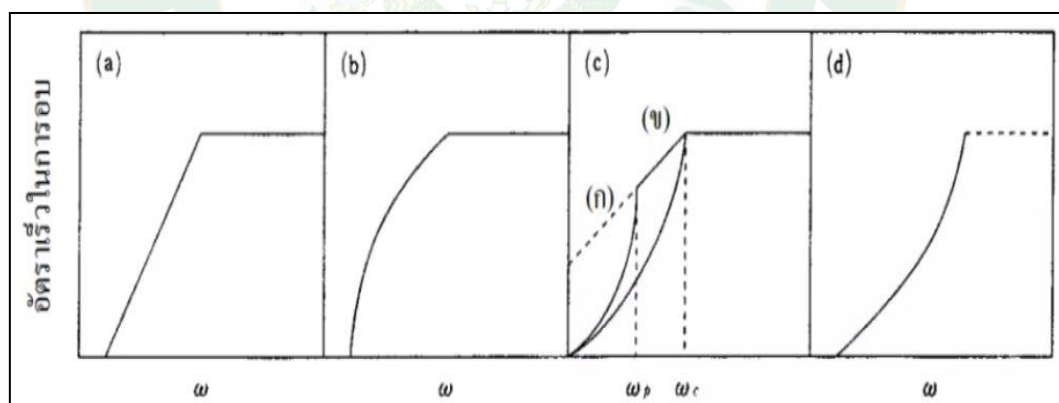
$$R_A = k_H(H_m - H) \cong \frac{\alpha}{\lambda}(T - T_m) \quad \text{สมการที่ 3}$$

กรณีที่ได้รับความร้อนจากลมร้อนเท่านั้นอุณหภูมิคงที่ของวัสดุดิบ (T_m) จะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน (T_w) กรณีนี้อัตราในการอบแห้งคงที่ (R_A) จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$R_A = \frac{\alpha(T - T_w)}{\lambda} \quad \text{สมการที่ 4}$$

เมื่อ	R_A	คือ อัตราการอบแห้ง (kg/s)
	θ	คือ เวลา (s)
	α	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($W/m^2 \cdot K$)
	k_H	คือ mass transfer coefficient ($kg/s \cdot m^2 \cdot kg_{Water}/kg_{Dry\ air}$)
	λ	คือ ความร้อนแฝงของการระเหย (J/kg_{Water})
	T	คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
	T_m	คือ อุณหภูมิคงที่ของวัตถุดิบ ($^{\circ}C$)
	T_w	คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก ($^{\circ}C$)
	H	คือ ความชื้นของลมร้อน (wt%)
	H_m	คือ ความชื้นคงที่ของลมร้อน (wt%)

(2) อัตราการอบแห้งลดลง ในช่วงนี้อัตราการอบแห้งของวัตถุดิบที่เป็นของแข็ง จะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัตถุดิบและเงื่อนไขการอบ ได้แก่ ลักษณะของวัตถุดิบ สมบัติของความชื้นภายในวัตถุที่มีอยู่ซึ่งเป็นเงื่อนไขภายในมากกว่าเงื่อนไขการอบภายนอก เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วของลมร้อน ฯลฯ เมื่อทำการพิจารณาลักษณะของอัตราการอบแห้งในช่วงนี้จะแบ่งได้เป็น 4 ประเภท (การอบแห้ง) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2004) ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ลักษณะของอัตราการอบแห้งในช่วงอัตราเร็วลดลง

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (2004)

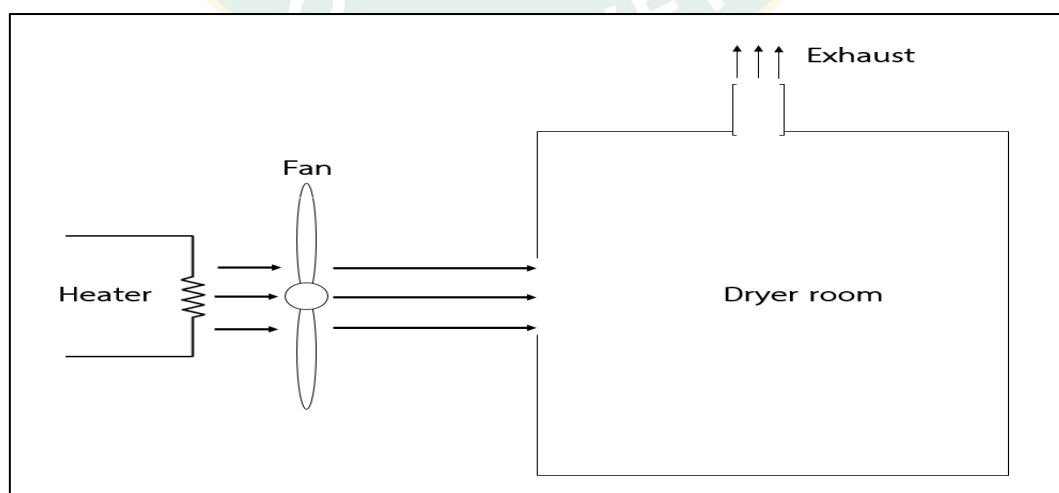
จากภาพที่ 4 กรณี (a) อัตราการอบแห้งลักษณะนี้จะพบได้ในกรณีที่วัตถุดิบมีน้ำในรูปแบบที่ค่อนข้างเป็นอิสระ กล่าวคือ การอบแห้งของเหลว เยื่อบาง อนุภาคขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 5 mm เป็นต้น กรณี (b) พบได้ในอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีสมบัติ Non-hydrophilic หรือวัสดุที่มีลักษณะเป็นเส้นใยสั้น ๆ เป็นต้น ในกรณี (d) ส่วนมากจะพบในการอบสารเนื้อเดียว เช่น สบู่ กาว เจ

ลาติน เป็นต้น ซึ่งวัตถุดิบกลุ่มนี้จะไม่ซับซ้อนด้วยอัตราคงที่ โดยอัตราความชื้นที่ผิวจะลดลงอย่างรวดเร็วจนเท่ากับอัตราความชื้นสมดุลกับลมร้อน หลังจากนั้นการแพร่ของน้ำภายในวัตถุดิบจะมีอิทธิพลเด่นชัดที่สุด ส่วนในกรณี (c) นั้นจะเกิดขึ้นกับการอบวัตถุดิบที่มีสมบัติระหว่าง (a) (b) และ (d) โดยช่วงอัตราการอบแห้งลดลงจะพบได้ 2 ช่วง คือ ช่วงหลังจากเกิดอัตราการอบแห้งลดลงขั้นที่ 1 แล้วจะเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงขั้นที่ 2 โดยกรณี (c) (ก) จะพบในวัสดุที่มี Osmotic water เช่น ดินเหนียว และกรณี (c) (ข) พบได้ในวัสดุหล่อขึ้นรูป หรือ ชั้นตะกอน เป็นต้น ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสำหรับกรณี (a) และ (b) จะแปรผันตามความหนาของวัสดุ ขณะที่กรณี (d) จะแปรผันตามความหนาของวัตถุดิบกำลังสอง ส่วนกรณี (c) จะอยู่ระหว่างทั้งสามกรณีข้างต้น

2. เครื่องอบแห้ง

เครื่องอบแห้ง คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ระเหยน้ำออกจากวัสดุที่ต้องการอบแห้งในปริมาณที่ต้องการ เครื่องอบแห้งที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรส่วนใหญ่จะเป็นเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนซึ่งใช้หลักการพัดผ่านของลมร้อนเพื่อพาความร้อนเข้าสู่ผิวของวัตถุดิบเพื่อระเหยน้ำออกจากวัตถุดิบจนได้เป็นผลิตภัณฑ์อบแห้ง

เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนส่วนใหญ่ใช้ขดลวดความร้อนไฟฟ้า (Electric Heater) เป็นแหล่งความร้อนในการผลิตลมร้อน โดยมีหลักการทำงานคือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดความต้านทานไฟฟ้าสูง พลังงานไฟฟ้าจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน แล้วถ่ายเทพลังงานความร้อนอากาศรอบ ๆ ขดลวดนั้นทำให้อากาศมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จากนั้นอากาศจะถูกหมุนเวียนให้พัดผ่านไปสู่วัตถุดิบเพื่อไล่ความชื้นออกทำให้ผลิตภัณฑ์นั้นแห้ง ส่วนความชื้นที่ระเหยจากผลิตภัณฑ์จะถูกระบายออกทางปล่องระบายอากาศ โดยหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน

3. การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ (Waste Heat Recovery)

ความร้อนทิ้ง (Waste Heat) หมายถึง พลังงานความร้อนที่ไหลไปพร้อมกับกระแสของอากาศ ก๊าซไอเสีย หรือของเหลวที่ไหลออกจากขอบเขตของระบบสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งความร้อนเหล่านั้นในที่สุดไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ (BCS Incorporated., 2008) ตัวอย่างของความร้อนทิ้งดังกล่าวได้แก่

- ลมร้อนที่ปล่อยทิ้งจากกระบวนการอบแห้ง
- ก๊าซไอเสียจากอุปกรณ์ที่มีการเผาไหม้ เช่น หม้อไอน้ำ เครื่องยนต์ เต้าเผา เป็นต้น
- ก๊าซหรือลมร้อนจากกระบวนการผลิต
- น้ำระบายความร้อน
- ความร้อนจากผิวร้อนของเครื่องจักร หรือ ผลิตภัณฑ์

การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้คือ การนำความร้อนส่วนที่ถูกปล่อยออกจากกระบวนการ ซึ่งความร้อนดังกล่าวยังมีศักยภาพที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้กลับมาใช้ใหม่ผ่านอุปกรณ์ชนิดต่าง ๆ อุปกรณ์ดังกล่าวอาจจะเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดใดชนิดหนึ่ง (Wang J., 2018) และหากสามารถนำความร้อนส่วนนี้กลับไปใช้ในกระบวนการได้จะสามารถลดพลังงานป้อนเข้าระบบ (Input energy) ให้น้อยลงได้ ทำให้ระบบนั้นมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลงได้ (BCS Incorporated., 2008) (กลุ่มวิจัยเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 2560)

3.1 ลักษณะและแหล่งความความร้อนทิ้ง

แหล่งความความร้อนทิ้งมี 2 ลักษณะ ได้แก่ ของเหลวร้อน (เช่น น้ำร้อน น้ำมันร้อน) และ ก๊าซร้อน (เช่น อากาศร้อน ก๊าซไอเสียร้อน) การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้จะต้องประเมินค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ค่าอัตราการไหล อุณหภูมิ และองค์ประกอบของความร้อนทิ้ง เพื่อคำนวณปริมาณความร้อนที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนทิ้งอาจแบ่งออกได้เป็น 3 ระดับ ได้แก่ 1) อุณหภูมิสูง หมายถึง อุณหภูมิ $> 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2) อุณหภูมิปานกลาง หมายถึง อุณหภูมิระหว่าง $230\text{-}650\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 3) อุณหภูมิต่ำ หมายถึง อุณหภูมิ $< 230\text{ }^{\circ}\text{C}$ (BCS Incorporated., 2008) ตัวอย่างของแหล่งความร้อนทิ้ง อุณหภูมิ ข้อดีข้อเสีย และเทคโนโลยีที่นำมาใช้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แหล่งความร้อนทั้ง อุณหภูมิ ข้อดีข้อเสีย และเทคโนโลยีที่นำมาใช้

ช่วงอุณหภูมิ	ตัวอย่างแหล่งความร้อนทั้ง	อุณหภูมิ (°C)	ข้อดี / ประโยชน์	ข้อเสีย / อุปสรรค	วิธีการนำความร้อนทั้งกลั้ว/ เทคโนโลยี
ระดับสูง อุณหภูมิ >1,200°F [>650°C]	เตาหลอมบริสุทธิ์นิกเกิล	1,370-1,650	ความร้อนทั้งคุณภาพสูง สามารถนำไปใช้กับแหล่ง รับปลายทางได้ หลากหลายการใช้งานใน หลายช่วงอุณหภูมิ มีการผลิตไฟฟ้าที่มี ประสิทธิภาพสูงได้ มีอัตราการถ่ายเทความร้อน สูงต่อหน่วยพื้นที่	อุณหภูมิสูงทำให้เกิด ความเครียดจากอุณหภูมิ ความร้อน (Thermal Stress) ในวัสดุของ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความ ร้อน	อุณหภูมิสูงใช้ในการเผาไหม้
	เตาหลอมเหล็กแบบเตาอาร์ค ไฟฟ้า	1,370-1,650			
	เตาหลอมแบบเบสไดออกซิเจน	1,200			
	เตา reverberatory อลูมิเนียม	1,100-1,200			
	เตาหลอมบริสุทธิ์ทองแดง	760-820			
	เตาเผาอุณหภูมิความร้อน เหล็กกล้า	930-1,040			
	เตา reverberatory ทองแดง	900-1,090			
	โรงงานไฮโดรเจน	650-980			
	เตาเผาขยะแบบมีควัน	650-1,430			
	เตาหลอมแก้ว	1,300-1,540			
ปานกลาง 450-1200°F [230-650°C]	เตาเผาถ่านโค้ก (Coke Oven)	650-1,000	มีความเข้ากันได้ง่ายกับ วัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อน	เพิ่มการเกิดปฏิกิริยาเคมี ในการเกิดคาร์บอน	อุณหภูมิปานกลาง-ต่ำ
	เตาหลอมเหล็กแบบคิวโพล่า	820-980			
	ก๊าซไอเสียหม้อไอน้ำ	230-480			
ไอเสียจากกังหันก๊าซ	ไอเสียจากเครื่องยนต์ลูกสูบ	370-540			อุณหภูมิปานกลาง-ต่ำ
		320-590			

ที่มา: กลุ่มวิจัยเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี (2560)

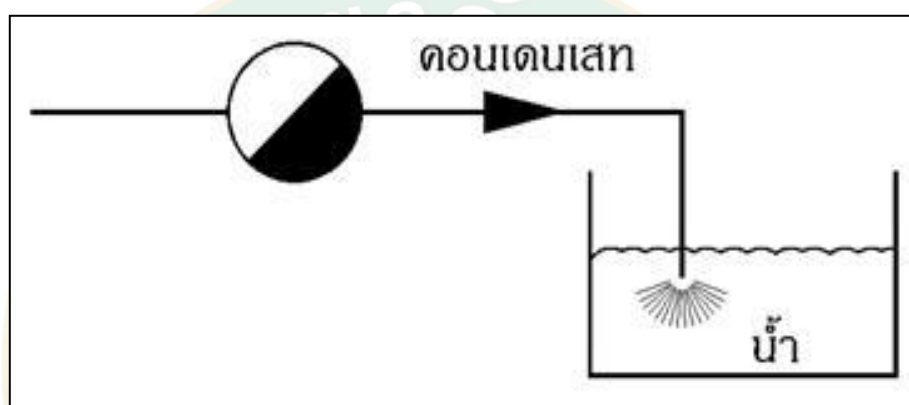
ตารางที่ 1 แหล่งความร้อนทั้ง อุณหภูมิ ข้อดีข้อเสีย และเทคโนโลยีที่นำมาใช้ (ต่อ)

ช่วงอุณหภูมิ	ตัวอย่างแหล่งความร้อนทั้ง	อุณหภูมิ (°C)	ข้อดี / ประโยชน์	ข้อเสีย / อุปสรรค	วิธีการนำความร้อนทั้งกลับ/เทคโนโลยี
ระดับต่ำ อุณหภูมิ <450°F [<230°C]	ไอเสียที่ออกจากระบบนำกลับ ในหม้อไอน้ำแบบเผาไหม้ด้วย ก๊าซของเตาเผาเอทิลีน	70-230	ความร้อนทั้งอุณหภูมิต่ำมี ปริมาณมาก ที่มีใน กระบวนการต่างๆ ที่มีหลากหลาย	มีการใช้งานที่ต้องการความ ร้อนอุณหภูมิต่ำน้อย	การให้ความร้อนแก่พื้นที่ใช้งาน
	คอนเดนเสทของกระบวนการใช้ ไอน้ำ	50-90		ประสิทธิภาพของการผลิต ไฟฟ้าต่ำ	การทำน้ำร้อนใช้ใน กระบวนการ
	น้ำระบายความร้อนจาก Furnace door ประตุเตาเผา Annealing furnace เตอบ เครื่องอัดอากาศ	30-50 70-230 30-50		สำหรับก๊าซไอเสียจากการ เผาไหม้ ความร้อนทั้งที่ นำกลับมีอุณหภูมิต่ำ	การเพิ่มระดับ upgrading ความร้อนทั้ง ด้วยการใช้ฮีตปั๊ม เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้ เหมาะสมกับการใช้งานของแหล่งรับ
	เครื่องย่นดัดเส้นดาปภายใน	70-120		ในทางปฏิบัติเกิดการกลับ ตัวเป็นสภาพกรดที่ทำให้	
	คอนเดนเซอร์ระบบปรับ อากาศและทำความเย็น เตา Drying, baking and curing oven ของแข็ง/ของเหลวจาก กระบวนการผลิต	30-40 90-230 30-230		เกิดการกัดกร่อนอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อน	Organic Rankine Cycle

ที่มา: กลุ่มวิจัยเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี (2560)

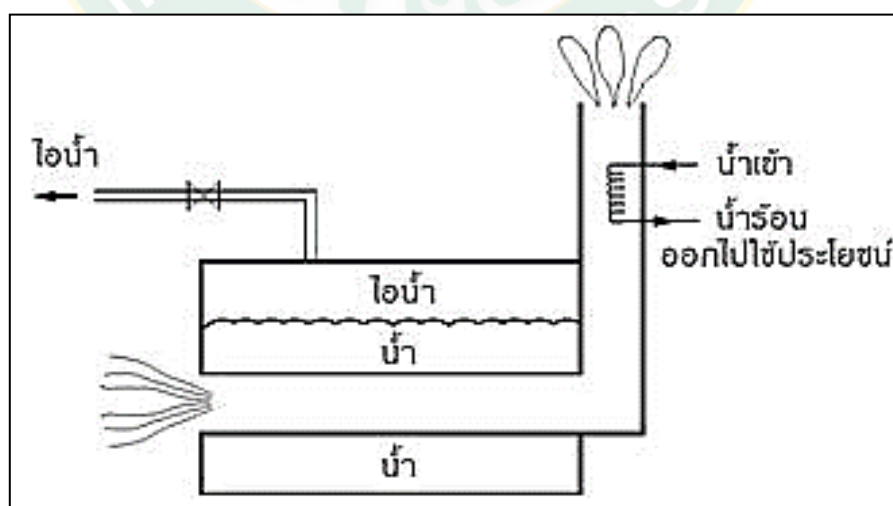
3.2 เทคโนโลยีการนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้

การนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ 1) การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ทางตรง (Direct heating) คือ การนำของเหลวหรือก๊าซร้อนที่จะปล่อยทิ้งไปผสมคลุกเคล้ากับของเหลวหรือก๊าซที่จะนำมาใช้ในกระบวนการโดยตรงดังภาพที่ 6 ดังนั้นการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ในลักษณะนี้จึงต้องคำนึงถึงความสะดวกเป็นหลัก 2) การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ทางตรง (Indirect heating) คือ การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) แสดงดังภาพที่ 7 ดังนั้นปริมาณความร้อนที่นำกลับมาใช้ประโยชน์จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



ภาพที่ 6 การนำความร้อนเหลือทิ้งไปใช้โดยตรง

ที่มา: กลุ่มวิจัยเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี (2560)

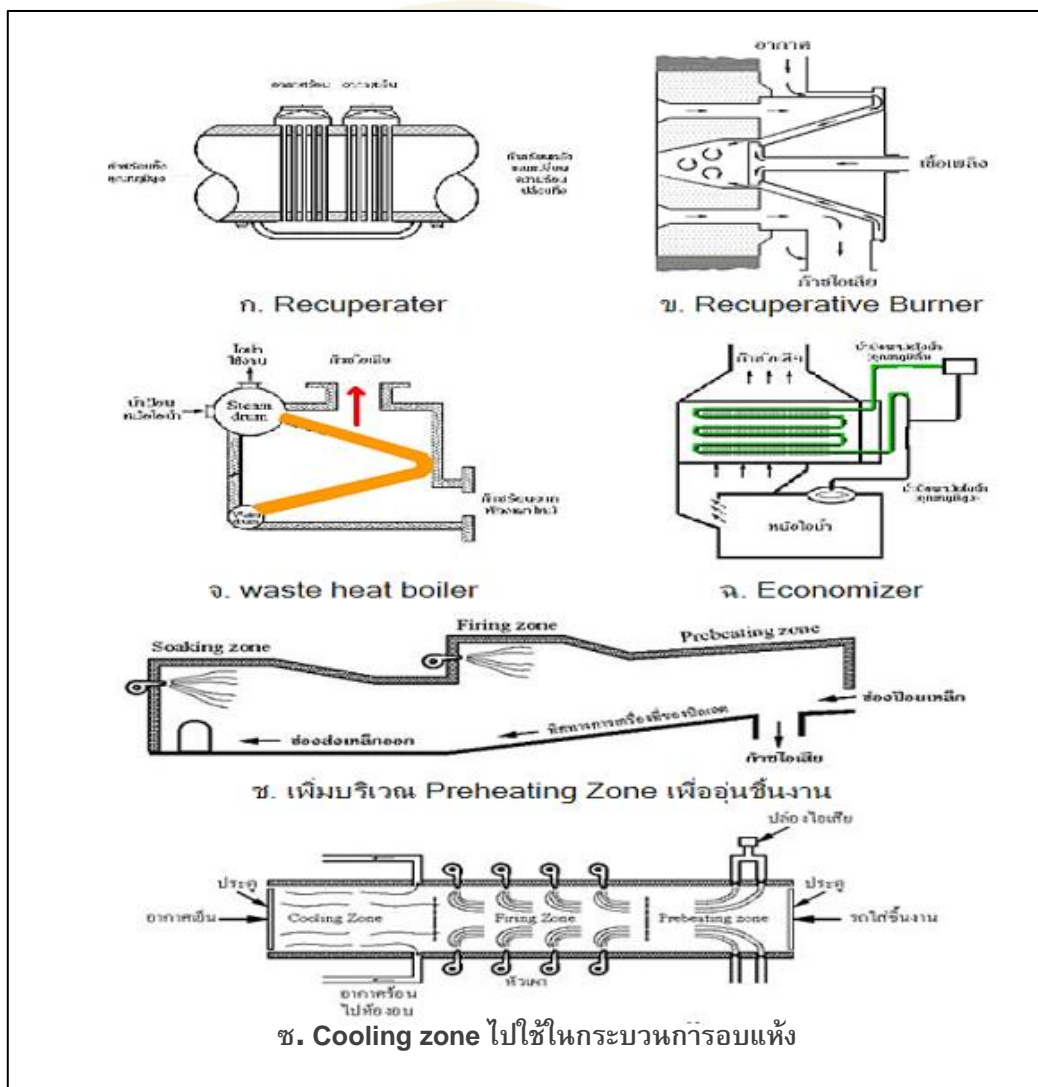


ภาพที่ 7 การนำความร้อนเหลือทิ้งไปใช้โดยอ้อม

ที่มา: กลุ่มวิจัยเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี (2560)

แนวทางการนำความร้อนเหลือทิ้งจากก๊าซไอเสียกลับมาใช้ใหม่ดังต่อไปนี้

- 1) การนำความร้อนเหลือทิ้งจากก๊าซไอเสียในการอุ่นอากาศก่อนเข้าเผาไหม้ (ภาพที่ 8 ก. และ ข.)
- 2) การนำความร้อนเหลือทิ้งจากก๊าซไอเสียในการผลิตไอน้ำ (ภาพที่ 8 จ.)
- 3) การนำความร้อนเหลือทิ้งจากก๊าซไอเสียในการอุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำ (ภาพที่ 8 ฉ.)
- 4) การนำความร้อนเหลือทิ้งจากก๊าซไอเสียในการอุ่นชิ้นงานก่อนเข้าเตาเผา (ภาพที่ 8 ช.)
- 5) การนำอากาศร้อนจากบริเวณ Cooling zone ไปใช้ในกระบวนการอบแห้ง (ภาพที่ 8 ซ.)



ภาพที่ 8 แนวทางการนำความร้อนเหลือทิ้งจากก๊าซไอเสียกลับมาใช้

ที่มา: กลุ่มวิจัยเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี (2560)

ข้อพิจารณาการนำก๊าซไอเสียกลับมาใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่ จะนำมาใช้โดยผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นโลหะที่สามารถทนต่ออุณหภูมิก๊าซไอเสียนั้นได้ ถ้าก๊าซไอเสียมีอุณหภูมิสูงมากอาจใช้เซรามิกส์ (วรวิฑู, 2544) แต่ราคาจะสูงมาก นอกจากนี้การนำความร้อนจากก๊าซไอเสียกลับมาใช้ ควรคำนึงถึงอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew Point) ของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) (Xiaoqu H., 2014) ซึ่งเกิดจากเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของกำมะถัน ส่วนเชื้อเพลิงที่ไม่มีองค์ประกอบของกำมะถันสามารถนำก๊าซไอเสียกลับมาใช้ประโยชน์ได้เต็มที่ ในการคำนวณจะใช้อุณหภูมิต่ำสุดของก๊าซไอเสียหลังจากนำกลับมาใช้ประโยชน์แล้วไม่ต่ำกว่า $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ และประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน 70 % นอกจากนี้ ปริมาณความร้อนที่สามารถนำกลับมาใช้ได้อย่างขึ้นอยู่กับระดับอุณหภูมิของก๊าซไอเสีย และขนาดพิกัดของเตา (Su-Sheng M., 2018)

4. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่งโดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกัน (จตุพร, 2544) การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนควรต้องมีความรู้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน การส่งผ่านของความร้อน และค่าต่าง ๆ ทางกลศาสตร์ของไหล (Lianzheng X., 2019) ในปัจจุบันกระบวนการอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อนส่วนใหญ่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นองค์ประกอบ เช่น การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันดิบสำหรับเปลี่ยนสถานะของไอที่ออกมาจากหอกลั่นให้เป็นของเหลว การลดอุณหภูมิของน้ำมัน หรือก๊าซ ในอุตสาหกรรมน้ำมัน ในทำนองเดียวกันกับในอุตสาหกรรมปุ๋ย อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ และอุตสาหกรรมอื่น ๆ ก็ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิ ลดอุณหภูมิ หรือหมุนเวียนความร้อนจากของไหลกลับมาใช้ใหม่ (วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล, 2550) หน้าที่หลักของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ การนำเอาพลังงานความร้อนมาใช้อย่างถูกหลักการและมีประสิทธิภาพ (Noie-Baghban H. and Majideian R., 2000) (วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี) ดังนั้นวิธีใช้และเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ควรสัมพันธ์กับต้นทุนของกระบวนการ และอาจมีผลต่อราคาของผลิตภัณฑ์ในการเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องทำอย่างระมัดระวัง ในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมที่สำคัญ คือ ควรมีประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงและราคาถูก (อนุสรณ์, 2550)

4.1 การจำแนกชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Types of heat exchangers)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีหลายแบบการจำแนกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอาจทำได้โดยอาศัยทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นหลัก โดยสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่ 1) เครื่อง

แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางกัน (Counter flow) และแบบไหลตามกัน (Parallel flow) 2) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉาก (Cross flow) (Cengel Y. A., 2003)

4.2 การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นเป็นพื้นฐานสำคัญในการออกแบบระบบด้านพลังงาน เนื่องจากระบบด้านความร้อนจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหลายชิ้น ดังนั้นการออกแบบขนาดอุปกรณ์ที่สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้อย่างเหมาะสม จะช่วยให้ระบบด้านความร้อนมีประสิทธิภาพสูงตามไปด้วย ซึ่งออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้องใช้พื้นฐานความรู้ด้านเทอร์โมไดนามิกส์ และการถ่ายเทความร้อน (นิวทพร, 2560) ซึ่งการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละชนิดจะมีลักษณะเริ่มต้นเหมือนกัน โดยค่าต่าง ๆ ที่มีความสำคัญมาในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มีดังนี้

การวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Analysis of heat exchangers)

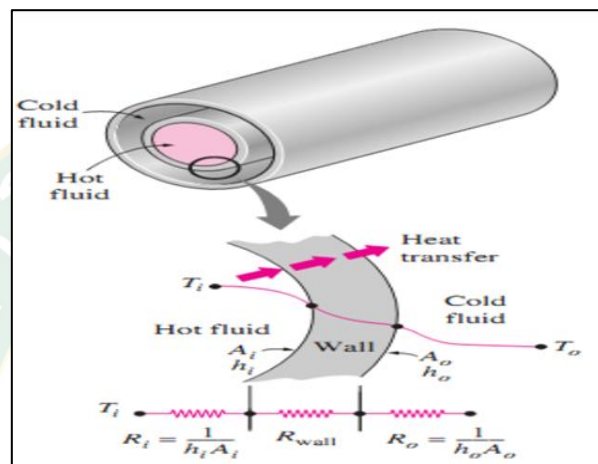
การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นสิ่งที่ควรประเมินในเบื้องต้นคือ อุณหภูมิ ณ ทางออกของของไหลร้อนและเย็นโดยประมาณหรือโดยการคาดคะเน โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) (อนุสรณ์, 2550) กล่าวคือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากของไหลร้อนมีค่าเท่ากับอัตราการถ่ายโอนความร้อนของของไหลเย็น ดังสมการที่ 5

$$Q = \dot{m}_c C_{p_c} (T_{c,o} - T_{c,i}) = \dot{m}_h C_{p_h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad \text{สมการที่ 5}$$

เมื่อ	Q	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (kW)
	\dot{m}_c	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของไหลเย็น (kg/s)
	\dot{m}_h	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของไหลร้อน (kg/s)
	C_{p_c}	คือ ความร้อนจำเพาะของไหลเย็น (kJ/kg.K)
	C_{p_h}	คือ ความร้อนจำเพาะของไหลร้อน (kJ/kg.K)
	$T_{h,i}$	คือ อุณหภูมิของไหลร้อนขาเข้า (K)
	$T_{h,o}$	คือ อุณหภูมิของไหลร้อนขาออก (K)
	$T_{c,i}$	คือ อุณหภูมิของไหลเย็นขาเข้า (K)
	$T_{c,o}$	คือ อุณหภูมิของไหลเย็นขาออก (K)

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient)

การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้องวิเคราะห์อุปกรณ์ในเชิงความร้อน (Whalley R. and Ebrahimi K., 2018) โดยการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างของไหลสองชนิด ได้แก่ ของไหลที่มีอุณหภูมิสูงกว่า (T_h) กับของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า (T_c) ที่กั้นด้วยผนังทึบ (ยงยุทธ, 2551) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 6 และสมการที่ 7



ภาพที่ 9 Thermal resistance network associated with heat transfer in a double-pipe Heat Exchanger

ที่มา: Cengel Y. A. (2003)

$$Q = \frac{\Delta T}{R} = UA\Delta T = U_i A_i \Delta T = U_o A_o \Delta T$$

สมการที่ 6

เมื่อ	Q	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)
	U	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($W/m^2 \cdot K$)
	A	คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)
	ΔT	คือ ผลต่างอุณหภูมิของไหล (K)
	R	คือ ความต้านทานทางความร้อน (K/W)

$$R = R_{total} = R_i + R_{wall} + R_o$$

สมการที่ 7

เมื่อ	R_{total}	คือ ความต้านทานทางความร้อนรวม (K/W)
	R_{wall}	คือ ความต้านทานทางความร้อนผนัง (K/W)
	R_i	คือ ความต้านทานทางความร้อนขาเข้า (K/W)
	R_o	คือ ความต้านทานทางความร้อนขาออก (K/W)

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของไหลทำงานต่าง ๆ

ประเภทของไหลทำงาน	U (W/m ² .K)
Water to water	850-1,700
Water to oil	110-350
Steam condenser (water in tubes)	1,000-6,000
Ammonia condenser (water in tubes)	250-700
Finned-tube heat exchanger (water in tubes, air in cross flow)	25-50
Water to water	850-1,700

ที่มา: ยงยุทธ (2551)

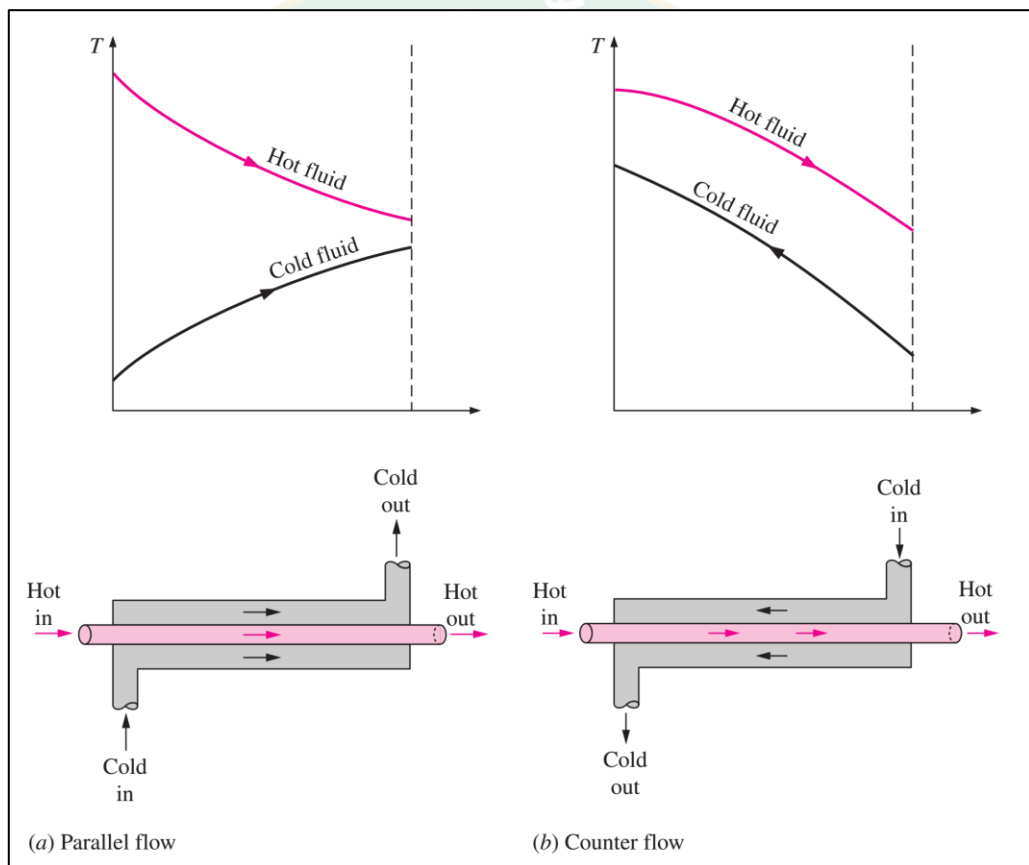
การวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขนาน

อุณหภูมิของของไหลภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นปกติแล้วจะมีค่าไม่คงที่ โดยจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อของไหลไหลจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่ง เกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากของไหลร้อนไปสู่ของไหลที่เย็นกว่า ดังนั้นถึงแม้ว่าความต้านทานความร้อนตลอดระยะที่ของไหลเคลื่อนที่ผ่านจะมีค่าคงที่ก็ตาม อัตราการถ่ายเทความร้อนก็จะแปรผันตลอดเส้นทางการไหลของของไหลภายในในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้น ๆ เนื่องด้วยอัตราการถ่ายเทความร้อนจะแปรผันตามความแตกต่างของอุณหภูมิของไหลร้อนและของไหลเย็นที่แต่ละหน้าตัดทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่าง ๆ นิยมคำนวณจากความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก (Logarithmic Mean Temperature Difference) โดยการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในเชิงความจุความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขนานจะพบว่าอุณหภูมิทั้งของไหลเย็น

และของไหลร้อน มีค่าดังสมการที่ 8 และ 9 และเมื่อพิจารณาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ ดังแสดงในภาพที่ 10 จะพบว่า (a) เป็นการไหลแบบทางเดียวกัน (Parallel Flow) ส่วนรูป (b) เป็นการไหลแบบสวนทางกัน (Counter Flow) (Cengel Y. A, 2003)

$$Q_c = \dot{m}_c c_{p_c} (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad \text{สมการที่ 8}$$

$$Q_h = \dot{m}_h c_{p_h} (T_{h,in} - T_{h,out}) \quad \text{สมการที่ 9}$$



ภาพที่ 10 การวิเคราะห์ห่ออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ที่มา: Cengel Y. A. (2003)

เมื่อความร้อนจำเพาะของของไหลทั้งสองไม่แปรผันตามอุณหภูมิแล้ว จะสามารถใช้สมดุลย์พลังงาน ทำให้สามารถแก้สมการออกมาได้อยู่ในรูปของผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย (Logarithmic Mean Temperature Difference) ตัวย่อว่า LMTD และสัญลักษณ์เป็น ΔT_{lm} ซึ่งจัดอยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ 10, 11 และ 12 ตามลำดับ (Cengel Y. A., 2003)

$$Q = UA_s \Delta T_{lm}$$

สมการที่ 10

- เมื่อ Q คือ อัตราความร้อนที่ถ่ายเทภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (W)
 A_s คือ พื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน (m^2)
 U คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อนเฉลี่ยของระบบ ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
 ΔT_{lm} คือ ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย ($^\circ C$)

โดยค่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อนเฉลี่ยของระบบ (U) และค่าผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย (ΔT_{lm}) สามารถคำนวณได้ตั้งสมการที่ 11 และ 12 ตามลำดับ

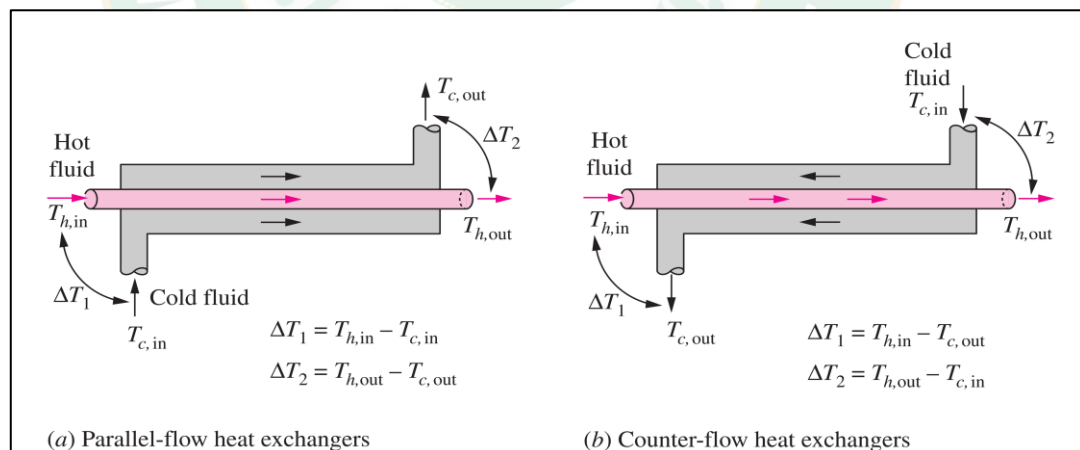
$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_h} + \frac{1}{h_c}$$

สมการที่ 11

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

สมการที่ 12

โดยค่า ΔT_1 และ ΔT_2 พิจารณาจากทิศทางการไหลของของไหลดังแสดงในภาพที่ 11

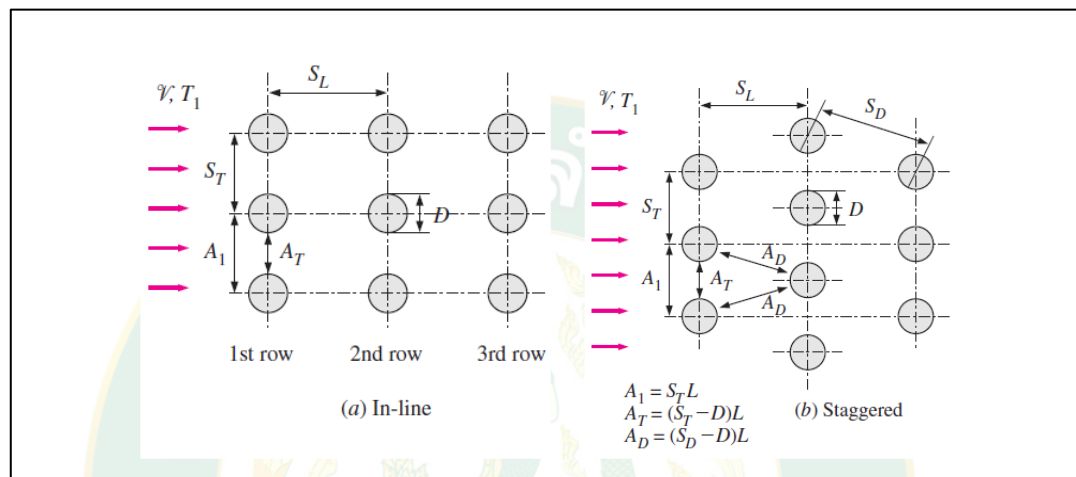


ภาพที่ 11 การพิจารณาค่า ΔT_1 และ ΔT_2 จากทิศทางการไหลของของไหล

ที่มา: Cengel Y. A. (2003)

การวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉาก

การวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉากสามารถพิจารณาจากหลักการของการไหลผ่านกลุ่มท่อ (Tube Banks) โดยกลุ่มท่อจะมีรูปแบบการจัดวาง (Arrangement of the tubes) ที่ต้องพิจารณาอยู่ 2 รูปแบบ แสดงดังภาพที่ 12 คือ การจัดวางตรงแนว (In line) และการจัดเยื้องแนว (Staggered) (Cengel Y. A., 2003)



ภาพที่ 12 รูปแบบการจัดวางกลุ่มท่อ

ที่มา: Cengel Y. A. (2003)

จากภาพที่ 11 ระยะต่าง ๆ จะส่งผลต่อความเร็วสูงสุดในการไหล (V_{max}) ที่จะเกิดขึ้น ซึ่งจะนำมาใช้ในการคำนวณค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์ Re_D จากสมการที่ 13 (Cengel Y. A., 2003)

$$Re_L = \frac{\rho V_{max} D}{\mu}$$

สมการที่ 13

การคำนวณค่าความเร็วสูงสุดในการไหล (V_{max}) ผ่านกลุ่มท่อที่จัดวางแบบแนวตรง (In Line) และแบบเยื้องแนว (Staggered) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 14 และ 15 ตามลำดับ

$$v_{max} = \left(\frac{S_T}{S_T - D} \right) v$$

สมการที่ 14

$$v_{\max} = \left(\frac{S_T}{2(S_D - D)} \right) v$$

สมการที่ 15

- เมื่อ S_L คือ ระยะตามแนวทิศทางการไหล (Longitudinal Pitch)
 S_T คือ ระยะตามแนวทิศทางตั้งฉากการไหล (Transverse Pitch)
 S_D คือ ระยะตามแนวทแยง (Diagonal Pitch)

ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลกรณีติดตั้งท่อด้วยจำนวนแถวไม่เกิน 16 แถวสามารถคำนวณได้จากค่าเลขนิตเซล (Nu) ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมการความสัมพันธ์สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

Arrangement	Range of Re_D	Correlation
In-line	0–100	$Nu_D = 0.9 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	100–1000	$Nu_D = 0.52 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1000– 2×10^5	$Nu_D = 0.27 Re_D^{0.63} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	2×10^5 – 2×10^6	$Nu_D = 0.033 Re_D^{0.8} Pr^{0.4} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
Staggered	0–500	$Nu_D = 1.04 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	500–1000	$Nu_D = 0.71 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1000– 2×10^5	$Nu_D = 0.35 (S_T/S_L)^{0.2} Re_D^{0.6} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	2×10^5 – 2×10^6	$Nu_D = 0.031 (S_T/S_L)^{0.2} Re_D^{0.8} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$

*All properties except Pr_s are to be evaluated at the arithmetic mean of the inlet and outlet temperatures of the fluid (Pr_s is to be evaluated at T_s).

ที่มา: Cengel Y. A. (2003)

ค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Effectiveness of Heat Exchanger)

การวิเคราะห์ค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือ การเปรียบเทียบค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจริงที่เกิดขึ้นภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่เกิดขึ้น (Kwanchai K. and Atipong N., 2005) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 16

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} \times 100\% \quad \text{สมการที่ 16}$$

- เมื่อ ε คือ ค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (%)
 Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจริง (W)
 Q_{max} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด (W)

ทั้งนี้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจริง (Q) อาจคำนวณได้จากทั้งค่าพลังงานที่สูญเสียไปของของไหลร้อนหรือค่าพลังงานที่ของไหลเย็นได้รับ โดยคำนวณจากกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) ส่วนอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด (Q_{max}) นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 17

$$Q_{max} = C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i}) \quad \text{สมการที่ 17}$$

- เมื่อ Q_{max} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด (W)
 C_{min} คือ ความจุความร้อนต่ำสุด (Heat capacity rate) (J/kg·K)
 $T_{h,i}$ คือ อุณหภูมิของไหลร้อนขาเข้า (°C)
 $T_{c,i}$ คือ อุณหภูมิของไหลเย็นขาเข้า (°C)

ค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากสมการที่ 16 สามารถเขียนได้ดังรูปของสมการที่ 18 ดังนี้ (Cengel Y. A., 2003)

$$\varepsilon = \frac{C_c(T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i})} \times 100\% \quad \text{สมการที่ 18}$$

ค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Efficiency of Heat Exchanger)

ค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของพลังงานที่ของไหลเย็นได้รับต่อค่าพลังงานที่สูญเสียไปของของไหลร้อนดังแสดงในสมการที่ 19

$$\text{Efficiency} = \frac{Q_c}{Q_h} = \frac{\dot{m}_c c_{p_c}(T_{c,out} - T_{c,in})}{\dot{m}_h c_{p_h}(T_{h,in} - T_{h,out})} \times 100\% \quad \text{สมการที่ 19}$$

คุณสมบัติในการออกแบบและเลือกใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบและเลือกใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นมีหลายปัจจัยที่ต้องนำมาประกอบการพิจารณา ดังนี้

1. ความดันสูญเสีย (Pressure drop) ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากทั้งผลของความหนืดของของไหล และแรงเสียดทานที่ผิว นอกจากนี้ยังต้องคิดผลของตะกั่วที่เกิดขึ้นตามอายุการใช้งาน
2. ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat transfer coefficient) เป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดที่ต้องนำมาใช้ในการออกแบบให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. อุณหภูมิใช้งาน (Design temperature) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละชนิดจะมีข้อจำกัดในความสามารถที่แลกเปลี่ยนอุณหภูมิได้
4. ขนาดและน้ำหนัก (Size and Weight) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต้องมีขนาดและน้ำหนักที่เหมาะสมกับการติดตั้งเพื่อใช้งาน
5. วัสดุ (Material) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องทำมาจากวัสดุที่มีความคงทนแข็งแรง นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมอาหารจำเป็นต้องคำนึงถึงความสะอาดประกอบด้วย
6. การบำรุงรักษา (Maintenance) เมื่อใช้งานไปนาน จะต้องมีการบำรุงรักษาและทำความสะอาดชิ้นส่วนภายใน
7. ราคา (Economic) มีผลต่อการพิจารณาเพื่อการลงทุน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ในระบบอบแห้งโดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบอบแห้งและเครื่องอบแห้ง

ใจทิพย์ วานิชชัง และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มศักยภาพการทำงานของเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบไหลผสม และออกแบบเครื่องอบแห้งขนาด 3 Ton โดยปัญหาการใช้งานของเครื่องอบแห้งประเภทนี้ มีการใช้พลังงานที่สูง และคุณภาพข้าวก็ต่ำด้วย ปัจจัยที่เกี่ยวข้องมีอยู่ 2 ปัจจัย คือ ลักษณะโครงสร้างของเครื่องอบแห้ง และวิธีการอบแห้ง ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิข้าวเปลือกไม่ควรสูงเกิน $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ และมีเวลาในการพัก 2 - 24 h ก่อนจะนำมาอบแห้งต่อไป ควรให้อัตราการลดความชื้นข้าวเปลือกอยู่ที่ประมาณ 0.5 - 10 % จึงจะทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานดี เครื่องอบแห้งมีประสิทธิภาพสูง และคุณภาพสีข้าวดี ได้ต้นข้าวเพิ่มขึ้น 5 - 6 % และลดการใช้พลังงานได้ 50 %

กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์ และคณะ (2553) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งสมุนไพรด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดไกล โดยเครื่องอบแห้งประกอบด้วย มอเตอร์ขับพัดลมขนาด 0.25 HP อุปกรณ์ให้ความร้อนและแท่งอินฟราเรดมีขนาด 1 kW ใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ $45 - 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ และมีความเร็วลมร้อน 1.7 m/s จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิลมร้อนและอุณหภูมิอินฟราเรด มีค่าสูงขึ้นสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ และการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดใช้เวลาน้อยกว่าการอบด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว

ผดุงศักดิ์ วานิชชัง และคณะ (2551) ได้ทำการศึกษาการวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชสำหรับเกษตรกร โดยออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งเมล็ดพืช ที่สามารถอบแห้งข้าวเปลือกได้ครั้งละ 2.5 - 3.0 Ton ซึ่งเป็นเครื่องอบแห้งแบบไหลต่อเนื่อง และใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง จากผลการศึกษาพบว่า มีอัตราการลดความชื้น 1.3 - 1.6 %/Ton และประสิทธิภาพการใช้พลังงานมีค่าสูงประมาณ $2.3\text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ สามารถอบแห้งได้วันละ 10 Ton โดยเสียค่าใช้จ่ายประมาณ 75 - 135 Baht/Ton

บัณฑิต กฤตาคม (2556) ได้ศึกษาแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อน เพื่อหาแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อนภายใต้อุณหภูมิอบแห้ง $50 - 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ ความเร็วลม $1.0 - 2.0\text{ m/s}$ แบบจำลองทำการทดสอบโดยเปรียบเทียบผลการทำนายอัตราส่วน ความชื้นจากแบบจำลองกับอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการ

ทดลองจากนั้นเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมโดยใช้ค่า R^2 และ RMSE เป็นดัชนีชี้วัดผลจากการศึกษาพบว่า แบบจำลองเอมพีริคัลสามารถทำนายอัตราส่วนความชื้น การอบแห้งได้ดีโดยที่แบบจำลองของ Page มีความเหมาะสมที่สุดกับผลการทดลองโดยมีค่า R^2 มากที่สุด เท่ากับ 0.98634 และ RMSE น้อยที่สุดเท่ากับ 0.03463

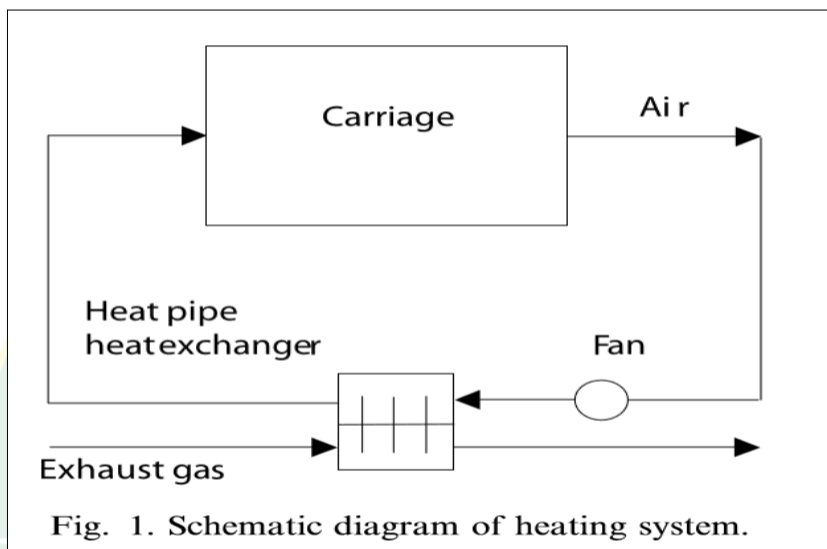
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่

Hanning L. et al. (2015) ได้ศึกษากรณีตัวอย่างการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ โดยมีความร้อนทิ้งจากอุณหภูมิ 250 - 450 °C โดยมีอัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิง พบว่า ปริมาตรอัตราการไหลของก๊าซไอเสียสูงสุดที่ต้องการคือ $2.3 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ ซึ่งเพียงพอที่จะทำให้มวลชีวภาพ 1 Ton แห่ง ส่วนอุณหภูมิก๊าซไอเสียที่แตกต่างกันนั้นส่งผลให้อัตราการไหลนั้นเปลี่ยนไปด้วย เมื่อมีอุณหภูมิยิ่งเพิ่มสูงขึ้น ความต้องการอัตราการไหลก็จะลดลง ในการทดลองครั้งนี้ทำการเทียบความชื้นที่สุกท้ายของชีวมวล 3 ค่า คือ 10 wt% 20 wt% และ 30 wt% โดยมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ 60 wt%

วรวิฒิ มั่นสกุล (2544) ได้ศึกษาการออกแบบอุปกรณ์อุ่นอากาศ (Recuperator) สำหรับเตาเผาสปริงแผ่น (Leaf Spring) เพื่อนำก๊าซไอเสียที่บริเวณปล่องไอเสียของเตาเผามาอุ่นอากาศก่อนเข้าเตาเผา โดยออกแบบและสร้างติดตั้งใช้งานจริงที่ในการออกแบบ Recuperator นั้นได้ใช้วิธี Effectiveness - NTU Method โดยศึกษาแบบ Cross - flow two - pass Heat exchanger โดยกำหนดความยาวของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่เท่ากับ 1.2 m ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0318 m ความหนาของผนังท่อ 2 mm จำนวน 78 tube ลักษณะการจัดเรียงท่อแบบแนวเอียงกัน (Staggered) ซึ่งผลการทดลองหลังติดตั้งกับปล่องไอเสียของเตาเผาแล้ว พบว่า สามารถอุ่นอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้จากเฉลี่ย 48 °C เป็น 200 °C สามารถประหยัดน้ำมันเตาได้เฉลี่ยประมาณ 9 % (คิดเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายประมาณ 416,000 baht/y) มีประสิทธิภาพ 26 % และเมื่อติดตั้งกับเตาเผาแล้วสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาจาก 21 % เป็น 26 % โดยเกิดความดันสูญเสียประมาณ 0.343 kPa ระยะเวลาการคืนทุนประมาณ 8 months และอัตราผลตอบแทนการลงทุนประมาณ 1.51 %

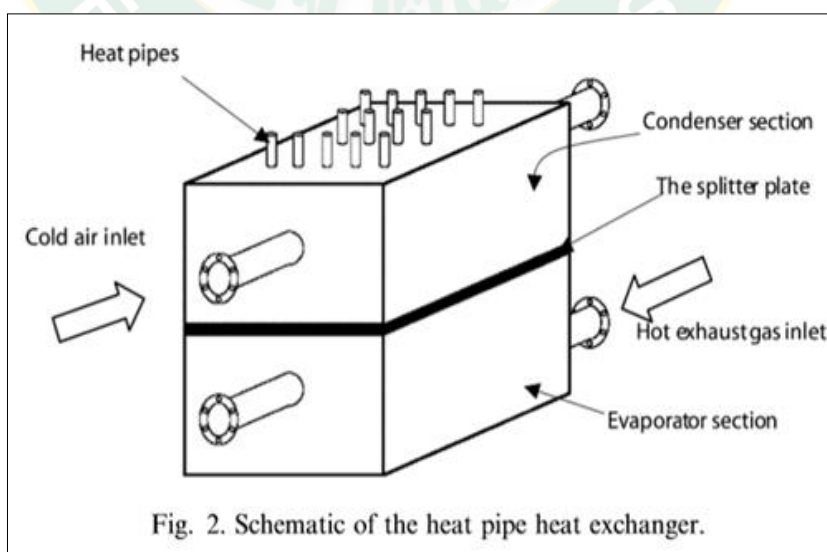
Feng Y. et al. (2003) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนโดยใช้ก๊าซไอเสียรถยนต์และพัฒนาวิธีการคำนวณ ส่วนท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ประโยชน์ได้ถูกตั้งค่าเพื่อให้ความร้อน HS663 โดยทำการทดลอง ในรถบรรทุกขนาดใหญ่ เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของตัวแลกเปลี่ยนความร้อน แสดงให้เห็นว่าผลการทดลองบ่งบอกถึงประโยชน์ของการนำความร้อนจากก๊าซไอเสียนั้นดีตามผลลัพธ์เชิงตัวเลข ในส่วนของพลังงานความร้อนที่ปล่อยออกมาของก๊าซไอเสีย มีประมาณ 25 - 30 % หากนำก๊าซไอเสียรถยนต์มาถ่ายเทความร้อนเข้าสู่

พื้นที่ผู้โดยสารโดยใช้ท่อความร้อน จะทำให้อากาศในห้องผู้โดยสารอุ่นขึ้น ผลการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย 100 °C 200 °C และ 300 °C จะได้อุณหภูมิของห้องโดยสาร 27 °C 42 °C และ 70 °C ตามลำดับ และมีอัตราการถ่ายเทความร้อน 1,989 W 3,559 W และ 6,490 W ตามลำดับ โดยแผนภาพการนำไอเสียมาใช้ ดังภาพที่ 13 และลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 13 แผนภาพของการใช้ก๊าซไอเสีย

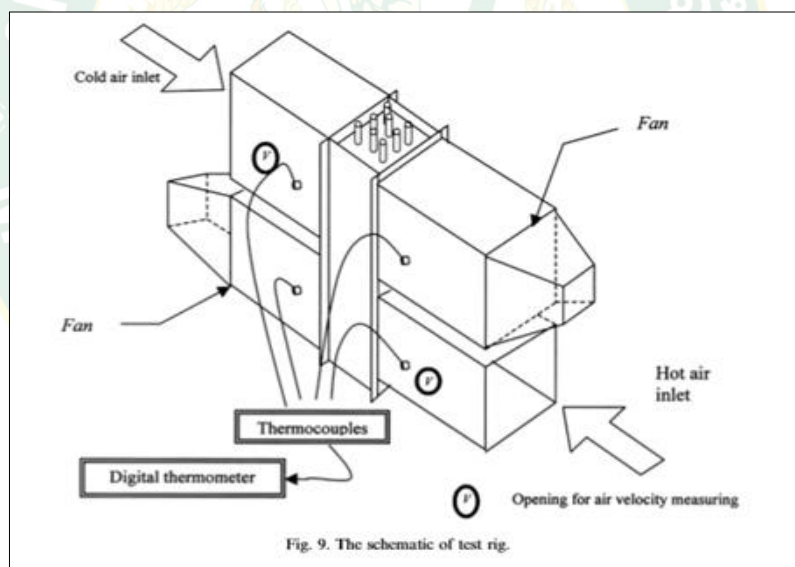
ที่มา: Feng Y. et al. (2003)



ภาพที่ 14 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน

ที่มา: Feng Y. et al. (2003)

Noie Baghban H. et al. (2000) ได้ศึกษาการนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่โดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน (HPHE) สำหรับห้องผ่าตัดในโรงพยาบาล โดยดำเนินการตามทฤษฎีการออกแบบและสร้างท่อความร้อน โดยใช้เฉพาะในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อ ความร้อนเพื่อนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ ลดมลพิษทางอากาศ และอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ในงานวิจัยนี้ มีลักษณะการออกแบบและมีข้อจำกัดการถ่ายเทความร้อน ของท่อความร้อนเดียวทำการทดสอบภายใต้สภาวะทำงานที่อุณหภูมิ 150 - 558 °C โดยใช้เมทานอลเป็นสารทำงาน ผลของการทดลองสำหรับการดูดความร้อนด้วยเครื่องระเหยนั้นใกล้เคียงกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพต่ำเพียงค่า 0.16 % เกิดจากอัตราส่วนระหว่างพิทช์กับเส้นผ่านศูนย์กลางสูงของท่อและขาดครีบ เมื่อพิจารณาความเป็นจริงแล้ว นี่เป็นหนึ่งในการใช้งานจริงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน ผลลัพธ์ที่ได้นั้นเป็นข้อมูลพื้นฐานและเป็นวิธี แนวทางในการวิจัยต่อไป โดยมีลักษณะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แสดงดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน (HPHE)

ที่มา: Noie - Baghban H. et al. (2000)

Hussam J. et al. 2018 ได้ศึกษาเทคโนโลยีการนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ พบว่าการมีหลายรูปแบบขึ้นกับแหล่งความร้อนซึ่งว่าเหมาะสมกับเทคโนโลยีประเภทไหน โดยแบ่งแหล่งความร้อนทิ้งได้ 3 ช่วง คือ ช่วงอุณหภูมิสูง (>400 °C) ช่วงอุณหภูมิต่ำปานกลาง (100 - 400 °C) และช่วงอุณหภูมิต่ำ (<100 °C) โดยมีเทคโนโลยีที่นำมาใช้ ดังนี้

1. Regenerative and recuperative burners ส่วนใหญ่จะนำไปใช้กับอุตสาหกรรมเตาหลอมเพื่ออุ่นอากาศเข้าเตาเผาโดยผ่านหัว recuperative burners
2. Economizers จะนำไปอุ่นน้ำเพื่อเข้าสู่หม้อต้มไอน้ำ ใช้งานมากในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารและโรงไฟฟ้า หรืออุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไอน้ำ
3. Air preheaters นำความร้อนกลับมาใช้เพื่ออุ่นอากาศ ก่อนป้อนให้กับระบบอีกครั้งหนึ่ง
4. Heat Recovery steam generator (HSG) เป็นการนำไอน้ำที่มีอยู่ในระบบนำมาเพิ่มอุณหภูมิ ให้เป็นไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูง ความดันสูง มาใช้กับกังหันไอน้ำต่อไป
5. Heat pipe systems (Pulsating heat pipes) จะเป็นการทำน้ำร้อนหรือก๊าซไอเสีย โดยเป็นการนำความร้อนมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำความร้อนทิ้งไปใช้ประโยชน์
6. Heat exchanger เป็นการนำความร้อนมาแลกเปลี่ยนกัน โดยอาจจะเป็นของไหลต่างชนิดกัน หรือชนิดเดียวกันก็ได้
7. Thermodynamic cycles used for waste heat recovery (ORC, Kalina cycle) จะนำความร้อนทิ้งไปใช้ในการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก
8. Heat pumps เป็นการนำความร้อนมาเพื่อเพิ่มความร้อนให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

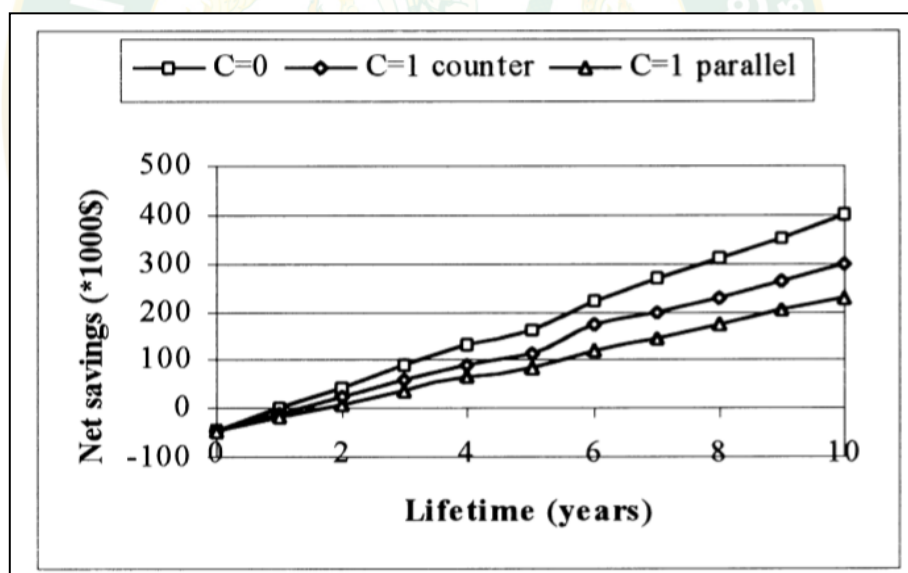
3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

Irfan A. et al. (2013) ได้ศึกษาการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยอาศัยหลักการเชิงกล และเชิงความร้อน ตามมาตรฐาน TMEA/ASME พบว่า การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and Tube Heat Exchanger) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1,336 mm ความยาว 10,000 mm จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อน 5,064.9 W และความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก (LMTD) 9.15 °C ซึ่งสรุปได้ว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ เหมาะสมสำหรับความดันมากกว่า 30 bar และอุณหภูมิมากกว่า 260 °C

Nizovtsev M. et al. (2016) ได้ศึกษาการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอากาศสู่อากาศด้วยการเปลี่ยนทิศทางการไหลเป็นช่วง ๆ ผลของการตรวจสอบการทดลองและแบบจำลองทางกายภาพทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอากาศสู่อากาศ พร้อมกับการเปลี่ยนทิศทางการไหลเวียนของอากาศเป็นระยะเพื่อการระบายอากาศในห้อง ในบทความนี้ จากการวิเคราะห์ร่วมของสมดุลความร้อนในการไหลของอากาศและในวัสดุของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แนะนำให้ใช้แบบจำลองสำหรับการคำนวณการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ผลจากการคำนวณ มีผลที่น่าพอใจว่าแบบจำลองที่เสนอนั้นสอดคล้องกับข้อมูลการทดลอง การพึ่งพาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มี

ต่ออัตราการไหลของอากาศถูกกำหนดในเชิงทฤษฎีและทดลอง พบว่าประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่ออัตราการไหลลดลง แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของอัตราการไหลของกระแสน้ำอากาศตรงข้าม ผ่านตัวแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถควบคุมอุณหภูมิของอากาศที่จ่ายเข้าสู่ห้องได้ สรุปมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้แบบจำลองนี้เพื่อปรับกับการทำงานและพารามิเตอร์

Soylemez M. (2000) ได้วิเคราะห์การเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อน โดยมีการนำเสนอสูตรพีชคณิตแบบง่ายสำหรับการประเมินพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำพลังงานมากกลับใช้ โดยศึกษาด้วยวิธี P1 - P2 พร้อมกับวิธี Effectiveness - NTU สำหรับการวิเคราะห์ทางความร้อนเชิงเศรษฐศาสตร์ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางกัน (Countercurrent flow) กับแบบไหลทางเดียวกัน (Parallel flow) พบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Counter current flow สามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่า Parallel flow แสดงดังภาพที่ 16



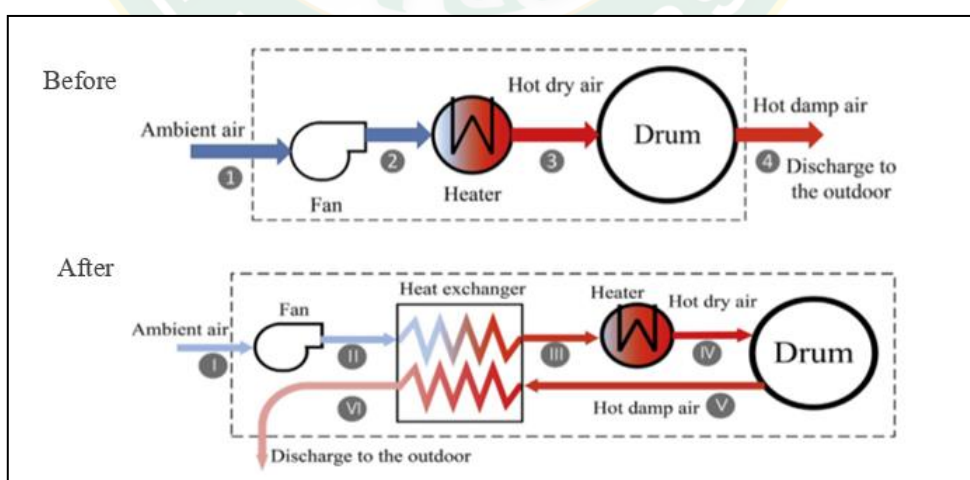
ภาพที่ 16 กราฟแสดงค่าการประหยัดพลังงานสุทธิของเครื่องอบแห้ง 3 แบบ
ที่มา: Soylemez M. (2000)

ยงยุทธ เครือวงษา (2551) ได้ทำการศึกษา ออกแบบ สร้าง และทดสอบหาคูณลักษณะทางความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดกะทัดรัด เพื่อนำความร้อนทิ้งจากก๊าซไอเสียในระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งกลับมาใช้ใหม่ก่อนที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศภายนอก โดยกำหนดอากาศร้อนทิ้งที่อุณหภูมิประมาณ 200 – 340 °C โดยออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดความกว้าง 0.20 m ความยาว 0.22 m และสูง 0.22 m แกนกลางใช้ท่อทองแดง ครีบ

อลูมิเนียมแผ่นแบบรอยหยักชนิดไหลขวาง อากาศร้อนจะไหลอยู่ภายนอกในขณะที่น้ำไหลอยู่ภายใน ท่อทิศทางการไหลของน้ำและอากาศร้อนเป็นแบบไหลขวาง โดยการศึกษาได้ทำการแปรผันค่าพารามิเตอร์ ดังนี้ อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า $340\text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิน้ำขาเข้า $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ อัตราการไหลของอากาศร้อน 0.00404 kg/s และอัตราการไหลของน้ำ 0.0094 kg/s พบว่าสามารถดึงความร้อนทิ้งของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งให้กับน้ำได้มากที่สุด โดยมีค่าอัตราการถ่ายความร้อนโดยเฉลี่ย 1.243 kW ค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 97.10% และค่า NTU เท่ากับ 5.6 อีกทั้งสามารถลดอุณหภูมิอากาศร้อนขาออกให้เหลือต่ำเพียง $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ และเพิ่มอุณหภูมิของน้ำได้เป็น $62\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยเกิดความดันอากาศร้อนตกคร่อมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุดประมาณ 5.128 Pa

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ในระบบอบแห้ง

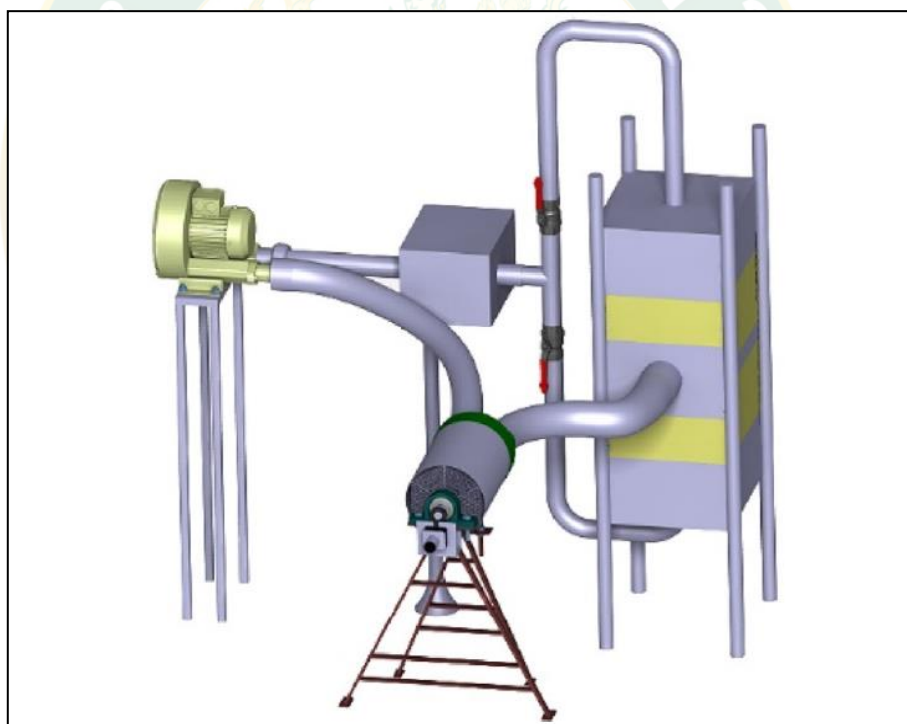
Qifei J and Lizhong L. (2018) ได้ศึกษาการลดการใช้พลังงานในเครื่องอบแห้งผ้าแบบใช้ไฟฟ้า โดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อพบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการคืนความร้อนจะพบว่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานของเครื่องอบผ้าที่มีการระบายความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 10.122% เป็น 12.292% และพลังงานความร้อนที่ได้เพิ่มขึ้นจาก 47.211% เป็น 57.335% การนำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อมาอุ่นอากาศก่อนเข้าเครื่องทำความร้อน สามารถลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าได้ 17.606% การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ด้วยท่อความร้อนในเครื่องอบแห้งเป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องอบผ้า ลักษณะก่อนและหลังของติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แสดงดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ลักษณะก่อนและหลังของติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ที่มา: Qifei J and Lizhong L. (2018)

Amirhossein A. et al. (2018) ได้ศึกษาการวิเคราะห์เชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบหมุนสำหรับการนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ จากไอเสียของเครื่องอบแห้ง เพื่ออุ่นอากาศเข้าของเครื่องอบแห้งอาหารด้วยอากาศร้อน ซึ่งนำพลังงานความร้อนจากปล่องไอเสียกลับมาใช้ โดยผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบหมุนนี้ใช้แผ่นอลูมิเนียมที่มีความหนา 0.5 mm กำหนดและปรับอุณหภูมิอากาศเข้า ความเร็วในการหมุนของเมทริกซ์และอัตราการไหลของอากาศร้อน ในการทดสอบจะดำเนินการที่ 3 ระดับของพารามิเตอร์ ผลการวิจัยพบว่า ความเร็วในการหมุนของเมทริกซ์ และการไหลของการไหล ส่งผลให้อุณหภูมิขาออก ของไหลร้อนและประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ลดลงด้วย ซึ่งตำแหน่งการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบหมุน แสดงดังภาพที่ 18 สรุปได้ว่าส่วนใหญ่อุณหภูมิอากาศเข้าของอากาศร้อน มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของเมทริกซ์และการเก็บความร้อน ประสิทธิภาพของการนำความร้อนกลับมาใช้ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้น 42.2 %



ภาพที่ 18 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบหมุน ในระบบอบแห้ง
ที่มา: Amirhossein A. et al. (2018)

สรุปสาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 4 สรุปสาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชื่อผู้วิจัย	เรื่อง	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	วัตถุประสงค์	สาระสำคัญ
ใจทิพย์ วานิชชัง และคณะ (2550)	การศึกษากาการเพิ่มศักยภาพการทำงานของเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบไหลผสม	-	ข้าวเปลือก	อุณหภูมิที่ใช้ในการอบข้าวเปลือกไม่ควรสูงเกิน 50 °C และการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบไหลผสมจะสามารถลดการใช้พลังงานได้
กิตติศักดิ์ วิธินันทิกิตต์ และคณะ (2553)	การอบแห้งสมุนไพรด้วยเครื่องอบแห้งแบบสมร่อนร่วมกับอินฟราเรดเทเล	-	สมุนไพร	อุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้งสมุนไพร อยู่ที่ 45-65 °C และมีความเร็วลมร้อน 1.7 m/s
ผดุงศักดิ์ วานิชชัง และคณะ (2551)	การศึกษากาการวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชสำหรับเกษตรกร	-	ข้าวเปลือก	เครื่องอบแห้งแบบไหลต่อเนื่อง สามารถอบแห้งข้าวเปลือกได้มาก และมีอัตราการลดความชื้นสูง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูง

ชื่อผู้วิจัย	เรื่อง	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	วัสดุตัวป	สาระสำคัญ
บัณฑิต กฤตาคม (2556)	แบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสม สำหรับการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อน	-	บอระเพ็ด	อุณหภูมิที่เหมาะสมของการอบแห้งพืช 50 - 70 °C และ ความเร็วลม 1.0 - 2.0 m/s
Hanning L. et al. (2015)	Evaluation of a biomass dryer process using waste heat from process industries: a case study	-	ซีวามล	อุณหภูมิก๊าซไอเสียที่แตกต่างกันส่งผล ให้การใช้ก๊าซเชื้อเพลิงเปลี่ยนไป เมื่อมี อุณหภูมิก๊าซไอเสียยิ่งเพิ่มสูงขึ้น ความ ต้องการใช้ก๊าซเชื้อเพลิงก็จะลดลง
วรวิมล มั่นสกุล (2544)	การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์อุ่น อากาศด้วยไอเสีย สำหรับเตาเผา อุตสาหกรรม	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบบเปลือกและท่อ		การจัดเรียงท่อภายในเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อนแบบแนวเอียงกัน (Staggered) จะสามารถอุ่นอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้ได้ ดีกว่าแบบแนวตรง สามารถประหยัด เชื้อเพลิงได้ดีกว่า และมีประสิทธิภาพที่สูง ส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ เตาเผาเพิ่มขึ้น

ชื่อผู้วิจัย	เรื่อง	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	วัสดุดิบ	สาระสำคัญ
Feng Y. et al. (2003)	Waste heat recovery using heat pipe heat exchanger for heating automobile using exhaust gas	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน	-	อุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่สูง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีการถ่ายเทความร้อนที่สูง ส่งผลให้อุณหภูมิเย็นขาออกเพิ่มขึ้น
Noie Baghban H. et al. (2000)	Waste heat recovery using heat pipe heat exchanger (HPHE) for surgery rooms in hospitals.	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน	-	การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์และการทดลองมีค่าพารามิเตอร์ใกล้เคียงกัน แต่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างพื้นที่กับเส้นผ่านศูนย์กลางสูงของท่อและขาดครีบบมีระยะห่างเกินไป

ชื่อผู้วิจัย	เรื่อง	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	วัตถุประสงค์	สาระสำคัญ
Irfan A. et al. (2013)	Study the design of heat exchangers. based on mechanical principles and thermal according to TMEA/ASME standards	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ	-	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ มีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูง และมีค่าความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบเปลือก (LMTD) สูง
Nizovtsev M. et al. (2016)	Analysis of the efficiency of air-to-air heat exchanger with a periodic change in the flow direction	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอากาศสู่อากาศ	-	ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่ออัตราการไหลลดลง แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลของอากาศมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับประสิทธิภาพ ดังนั้นสามารถควบคุมอุณหภูมิของอากาศที่จ่ายเข้าสู่ห้องได้โดยการปรับอัตราการไหลของอากาศ

ชื่อผู้วิจัย	เรื่อง	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	วัสดุดิบ	สาระสำคัญ
Soylemez M. (2000)	The optimum heat exchanger sizing for heat recovery	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน - Countercurrent flow - Parallel flow	-	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Counter current flow สามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่า Parallel flow
ยงยุทธ เครือวงษา (2551)	การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดกะทัดรัดเพื่อนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบบไหลขวาง	-	การติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางสามารถดึงความร้อนทิ้งของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งให้กลับมาได้มากที่สุด ซึ่งสามารถลดอุณหภูมิอากาศร้อนจนขาออกได้ และเพิ่มอุณหภูมิของน้ำได้
Qifei J and Lizhong L. (2018)	The improvement on efficiency and drying performance of a domestic venting tumble clothes dryer by using a heat pipe heat recovery heat exchanger	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบบท่อความร้อน	ผ้า	การติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงพลังงานของเครื่องอบผ้าและสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าได้

ชื่อผู้วิจัย	เรื่อง	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	วัตถุประสงค์	สาระสำคัญ
Amirhossein A. et al. (2018)	Experimental analysis of a rotary heat exchanger for waste heat recovery from the exhaust gas of dryer	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบหมุน	-	<p>1. ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแปรผกผันกับความเร็วของการหมุน และอัตราการไหลของอากาศเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน</p> <p>2. ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแปรผันตรงกับอุณหภูมิอากาศเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน</p>

บทที่ 3

อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีการดำเนินงานวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวิจัยและพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร มีรายละเอียดดังนี้

1. เครื่องวัดค่าพลังงานไฟฟ้า

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัดค่าพลังงานไฟฟ้ายี่ห้อ Eastron รุ่น SDM630MCT ดังภาพที่ 19 โดยเครื่องมือดังกล่าวสามารถวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าในหน่วยต่าง ๆ ได้แก่ V A, KVA, PF, KW, kWh อุปกรณ์นี้ใช้สำหรับการวิเคราะห์การทำงานและการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบอบแห้งเพื่อทำการพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมต่อไปในอนาคต



ภาพที่ 19 เครื่องวัดค่าพลังงานไฟฟ้า ยี่ห้อ Eastron รุ่น SDM630MCT

2. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เทอร์โมคัปเปิลเป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ใช้หลักการแปลงความร้อนหรืออุณหภูมิให้เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า เทอร์โมคัปเปิลประกอบด้วยลวดโลหะตัวนำ 2 ชนิดที่แตกต่างกันทางโครงสร้างของอะตอม นำมาเชื่อมปลายทั้ง 2 เข้าด้วยกัน โดยเรียกปลายนี้ว่าจุดวัดอุณหภูมิ (Measuring point หรือ Hot junction) ซึ่งเป็นจุดที่ใช้วัดอุณหภูมิ และจะมีปลายอีกข้างหนึ่งของลวดโลหะปล่อยว่าง ซึ่งเรียกว่าจุดอ้างอิง (Cold junction) ซึ่งหากจุดวัดอุณหภูมิ และจุดอ้างอิง มีอุณหภูมิต่างกันก็จะทำให้เกิดการนำกระแสในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง งานวิจัยนี้เลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งเป็นเทอร์โมคัปเปิลชนิดที่นิยมใช้แพร่หลาย และมีราคาถูก อุปกรณ์ชนิดนี้สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -

270 °C ถึง 1,372 °C มีค่าความเป็นเชิงเส้นสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมคัปเปิลชนิดอื่น ให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตสูง ให้อัตราการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าต่ออุณหภูมิดีกว่าแบบอื่นหรือมีค่าความชันใกล้เคียง 1 และสามารถใช้งานได้กับงานที่มีการแผ่รังสีความร้อน (Thermal radiation) ได้ รายละเอียดข้อมูลเฉพาะของเทอร์โมคัปเปิลชนิด K แสดงดังตารางที่ 5



ภาพที่ 20 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K

ตารางที่ 5 ข้อมูลเฉพาะของเทอร์โมคัปเปิลชนิด K

ชนิด เทอร์โมคัปเปิล	ย่านอุณหภูมิใช้งาน (°C)	ย่านอุณหภูมิ (°C)	ค่าความผิดพลาด (°C)	ค่าความไวสูงสุด ($\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$)
K	-270 ถึง 1372	-270.00 ถึง 0.00	-0.02 ถึง 0.04	50
		0.00 ถึง 500.00	-0.05 ถึง 0.04	
		500.00 ถึง 1,372.00	-0.05 ถึง 0.06	

ที่มา : <http://www.psptech.co.th/thermocouple-16698.page>

3. เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ

เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดและเก็บข้อมูลอุณหภูมิ พื้นฐานของระบบนี้ประกอบไปด้วย Scanner หรือ Multiplexer digital-voltmeter และตัวบันทึกข้อมูล ซึ่งรับ Input ที่เป็นสัญญาณแบบ Analog จากเทอร์โมคัปเปิลแล้วทำการเปลี่ยนข้อมูลเป็นสัญญาณแบบ Digital และเก็บข้อมูลไว้ในหน่วยความจำตามช่วงเวลาที่กำหนดไว้โดยอัตโนมัติเพื่อการนำไปทำการวิเคราะห์ต่อไป ซึ่งในการวิจัยนี้จะใช้เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ ยี่ห้อ Lutron รุ่น TM-1947SD แสดงดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ

4. เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer)

เครื่องวัดความเร็วลมเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการตรวจสอบความเร็วลมภายในท่อลม พัดลม เครื่องเป่าลมรวมถึงตรวจสอบความเร็วลมของระบบปรับอากาศ เป็นต้น อุปกรณ์นี้จะแสดงผลเป็น อัตราเร็วของกระแสการไหลของอากาศในหน่วยต่าง ๆ ได้แก่ m/s, f/min, knots, km/h และ mph ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัดแยก (Digital Handheld Wind Speed Meter Anemometer) ยี่ห้อ Richmoto รุ่น WM-04 ที่มี 2 รูปแบบในการใช้งาน ได้แก่ การวัดความเร็วลม และการวัดอุณหภูมิแสดงดังภาพที่ 22 โดยความเร็วลมและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้งาน ได้แก่ 0.1 m/s ถึง 45 m/s และ -10°C ถึง 50°C ตามลำดับ ทั้งนี้ความชื้นที่เหมาะสมในการใช้งานควรอยู่ในช่วง 40 %RH ถึง 85 %RH โดยรายละเอียดข้อมูลเฉพาะของอุปกรณ์นี้แสดงดังตารางที่ 6



ภาพที่ 22 เครื่องวัดความเร็วลม ใบพัดแยก

(Digital Handheld Wind Speed Meter Anemometer)

ตารางที่ 6 ข้อมูลเฉพาะเครื่องวัดความเร็วลม ใบพัดแยก ยี่ห้อ Richmoto รุ่น WM-04

หน่วยวัด ความเร็วลม	ช่วงใช้งาน	ความละเอียด	ค่าเริ่มต้น	ความแม่นยำ
m/s	0 ~ 45	0.1	0.3	±3 % ± 0.1dpts
ft/min	0 ~ 8800	19	60	±3 % ± 0.1dpts
knots	0 ~ 88	0.2	0.6	±3 % ± 0.1dpts
km/h	0 ~ 140	0.3	1	±3 % ± 0.1dpts
mph	0 ~ 100	0.2	0.7	±3 % ± 0.1dpts

ที่มา : <https://www.richmoto.net/product/wm04-anemometer>

5. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller)

เครื่องควบคุมอุณหภูมิเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมกับงาน โดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิจะรับสัญญาณค่าอุณหภูมิ (Input) จากหัววัดหรือเซ็นเซอร์เพื่อประมวลผล หากอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งตรวจวัดไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้ก็จะสั่งงาน (Output) ไปยังอุปกรณ์ทำความร้อนหรืออุปกรณ์ทำความเย็นให้ทำงานได้ตามค่าที่กำหนดไว้ โดยในการวิจัยนี้ใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ IPD Temperature Controller ยี่ห้อ Toky รุ่น AI208 แสดงดังภาพที่ 23 ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วง 0 °C ถึง 500 °C ทั้งนี้ความชื้นที่เหมาะสมในการใช้งานควรอยู่ในช่วง 5 %RH ถึง 100 %RH



ภาพที่ 23 PID Temperature Controller

6. อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ จะเป็นการปรับความถี่ทางไฟฟ้าทำให้สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์ดังกล่าวสำหรับการปรับรอบการหมุนของพัดลม โดยอินเวอร์เตอร์ที่นำมาใช้ในการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น D700 ขนาดแรงดันไฟฟ้า 220 VAC สามารถปรับความถี่ได้ในช่วง 0 Hz ถึง 50 Hz แสดงดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 อินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น D700

7. เครื่องอบแห้ง (Dryer)

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการงานวิจัยนี้เป็นเครื่องอบแห้งมาตรฐานระดับกึ่งอุตสาหกรรม ตัวเครื่องสร้างจากวัสดุสแตนเลสสตีลเกรด 304 (SUS 304) ที่ผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องอบแห้งนี้มีมิติห้องอบกว้าง 800 mm ยาว 800 mm และสูง 1,200 mm (ปริมาตรห้องอบประมาณ 0.77 m³) ทำงานด้วยระบบไฟฟ้าแบบ 3 Phase ใช้แรงดันไฟฟ้า 380 V ใช้แหล่งความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric heater) ขนาด 15 A สามารถสร้างอุณหภูมิภายในห้องอบได้สูงสุดเท่ากับ 200 °C แสดงดังภาพที่ 25 - 26



ภาพที่ 25 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้



ภาพที่ 26 รายละเอียดเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน

8. เครื่องวัดวิเคราะห์ความชื้น (Moisture Analyzer)

เครื่องวัดวิเคราะห์ความชื้นเป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดปริมาณน้ำภายในผลิตภัณฑ์ เครื่องนี้จะทำงานโดยใช้หลักการให้ความร้อนกับตัวอย่างผลิตภัณฑ์เพื่อระเหยน้ำออกจนหมดเพื่อวิเคราะห์ผลต่างของมวลผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังการให้ความร้อนเพื่อคำนวณแล้วแสดงผลเป็นความชื้นฐานเปียก (%wb) โดยงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัดวิเคราะห์ความชื้นมาตรฐานอุตสาหกรรมยี่ห้อ Ohaus รุ่น MB25 แสดงดังภาพที่ 27 ซึ่งติดตั้งหลอด Halogen สำหรับให้ความร้อนแก่ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักในช่วง 3 g ถึง 20 g ด้วยอุณหภูมิในช่วง 50 °C ถึง 160 °C (± 5 °C) สามารถตั้งค่าเวลาในการให้ความร้อนได้ตั้งแต่ 1 min ถึง 99 min ทั้งนี้เครื่องจะทำงานโดยชั่งน้ำหนักและให้ความร้อนแก่

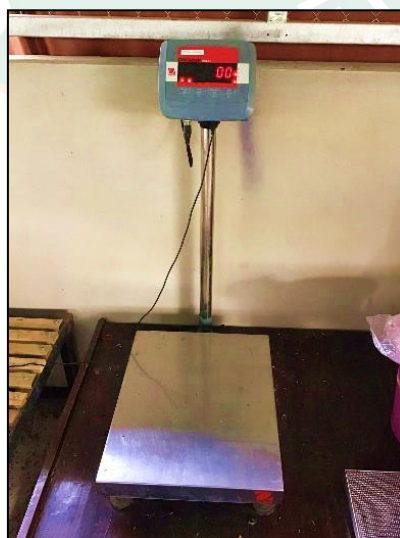
ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อัตโนมัติจมน้ำภายในผลิตภัณฑ์ระเหยออกจนหมดหลังจากนั้นเครื่องจะแสดงผลเป็นค่าความชื้นฐานเปียก (%wb) น้ำหนักเริ่มต้นและสุดท้าย (ความละเอียดระดับทศนิยม 3 ตำแหน่งในหน่วย g) ของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวผ่านทางหน้าจอแสดงผลเพื่อนำค่าต่าง ๆ ไปวิเคราะห์ต่อไป



ภาพที่ 27 เครื่องวัดวิเคราะห์ความชื้น Ohaus รุ่น MB25

9. เครื่องชั่งดิจิตอล

เครื่องชั่งดิจิตอลเป็นอุปกรณ์สำหรับใช้ในการชั่งน้ำหนักวัตถุดิบก่อนและหลังการอบแห้ง โดยงานวิจัยนี้ใช้เครื่องชั่งดิจิตอลยี่ห้อ Ohaus รุ่น Defender 2000 แสดงดังภาพที่ 28 ซึ่งสามารถชั่งน้ำหนักด้วยความละเอียดระดับทศนิยม 2 ตำแหน่งในหน่วย kg



ภาพที่ 28 เครื่องชั่งดิจิตอลยี่ห้อ Ohaus รุ่น Defender 2000

10. เครื่องวัดความเข้มของแสง (Spectrophotometer)

เครื่องวัดความเข้มของแสงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าสีผลิตภัณฑ์อบแห้ง โดยอุปกรณ์ดังกล่าวใช้หลักการวัดปริมาณของแสงที่ตัวอย่างดูดกลืนเข้าไป ตัวเครื่องประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง (Light source) เลนส์หรือกระจกรับแสง (Lens or Mirror) ตัวแยกความยาวคลื่น (Monochromator) และตัวตรวจจับสัญญาณ แหล่งกำเนิดแสงจะทำหน้าที่ให้แสงผ่านตัวอย่างที่ต้องการวัดค่า โดยตัวตรวจจับสัญญาณจะทำการบันทึกค่าความยาวคลื่นและค่ามุมของแต่ละความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืน ในการวิเคราะห์สีจะวิเคราะห์ด้วยระบบ CIE ซึ่งเป็นระบบบรรยายสีแบบ 3 มิติ ด้วยแกน L^* , a^* , b^* ตามลำดับ ทั้งนี้แกน L^* จะแสดงถึงความสว่าง โดยค่า $-L^*$ แสดงถึงสีดำและค่า $+L^*$ แสดงถึงสีขาว แกน a^* จะแสดงถึงค่าสีเขียวจนถึงสีแดง โดยค่า $-a^*$ แสดงถึงสีเขียวและค่า $+a^*$ แสดงถึงสีแดง แกน b^* จะแสดงถึงค่าน้ำเงินจนถึงสีเหลือง โดยค่า $-b^*$ แสดงถึงสีน้ำเงินและค่า $+b^*$ แสดงถึงสีเหลือง อีกทั้งยังวัดค่าความแตกต่างสีโดยรวม (Total Color Difference, ΔE) เพื่อวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งอีกด้วย โดยงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัดความเข้มของแสงยี่ห้อ Hunter lab รุ่น Mini Scan XE Plus แสดงดังภาพที่ 29 ในการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น



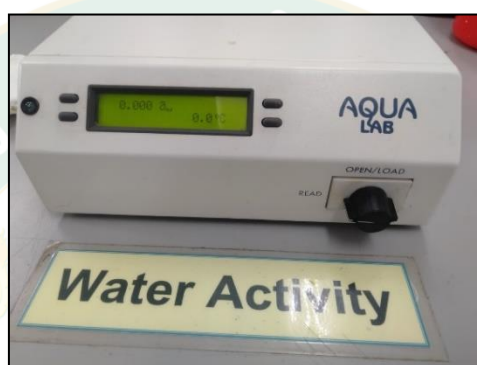
ภาพที่ 29 เครื่องวัดความเข้มของแสง (Spectrophotometer)

ยี่ห้อ Hunter lab รุ่น Mini Scan XE Plus

11. เครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water Activity meter)

เครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ภายในผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้ง โดยค่าดังกล่าวแสดงถึงระดับพลังงานของน้ำซึ่งเป็นอัตราส่วนของความดันไอ (Vapour pressure) ของน้ำภายในผลิตภัณฑ์ (P) ต่อความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ (P_0) ที่อุณหภูมิ

และความดันเดียวกัน ซึ่งปริมาณน้ำภายในผลิตภัณฑ์มี 2 ประเภทได้แก่ น้ำที่สร้างพันธะกับองค์ประกอบต่าง ๆ ภายในผลิตภัณฑ์ และน้ำอิสระระหว่างช่องว่างของผลิตภัณฑ์ โดยปริมาณน้ำอิสระนี้เชื้อจุลินทรีย์จะใช้ในการเจริญเติบโต ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเสื่อมสภาพหรือเน่าเสียส่งผลต่อสุขภาพผู้บริโภค ดังนั้นค่าปริมาณน้ำอิสระ (aw) ภายในผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งที่เหมาะสมและไม่ทำให้เชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ สามารถเจริญเติบโตได้ต้องมีค่าต่ำกว่า 0.70 โดยงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ (aw) ยี่ห้อ AQUA LAB รุ่น AQUA LAB Series 3 TE ดังภาพที่ 30 ในการวัดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว



ภาพที่ 30 เครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ (aw)
ยี่ห้อ AQUA LAB รุ่น AQUA LAB Series 3 TE

12. ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรใช้ในการทดสอบ

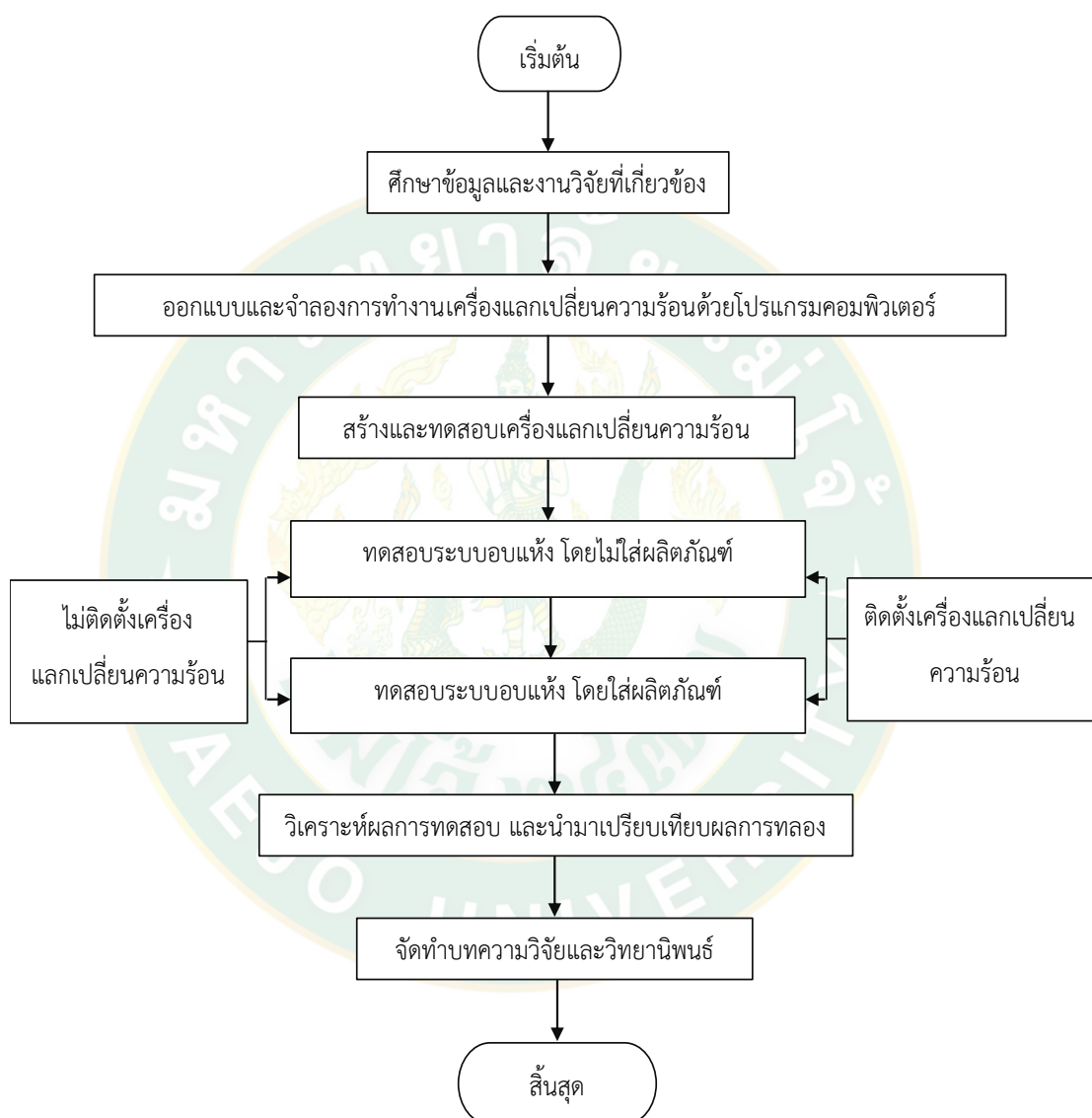
งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบระบบอบแห้งตามขอบเขตการวิจัยโดยใช้ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรทั้งสิ้น 2 ชนิด ได้แก่ ใบมะกรูด และเห็ดหูหนูดำ แสดงดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 ลักษณะใบมะกรูดสดและเห็ดหูหนูดำสดที่ใช้ในงานวิจัยนี้

วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยการนำความร้อนที่กลับมาใช้ประโยชน์ในระบบอบแห้งโดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย แสดงดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำความร้อนทิ้งจากอากาศชั้นที่ปล่อยออกจากเครื่องอบแห้งมาใช้อุ่นอากาศแห้งที่ต้องการเติมเข้าสู่ระบบเพื่อลดการใช้พลังงานและลดการปล่อยความร้อนทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสิ้น 2 แบบ ได้แก่ 1) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and Tube Heat Exchanger) และ 2) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง (Cross Flow Heat Exchanger) โดยการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีขั้นตอนและรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ตั้งสมมุติฐานในการออกแบบ งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ตั้งสมมุติฐานในการออกแบบดังนี้

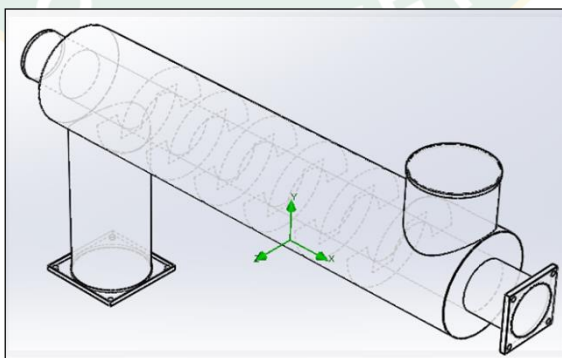
1.1 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศชั้นปล่อยทิ้งมีค่าเท่ากับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้งที่เติมเข้าสู่ระบบ

1.2 ความดันตกคร่อม (Pressure drop) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านกระแสร้อน (อากาศชั้นระบายทิ้ง) และด้านกระแสเย็น (อากาศแห้งจากภายนอกที่ต้องการเติมเข้าสู่ระบบ) มีค่าแตกต่างกันน้อยมาก

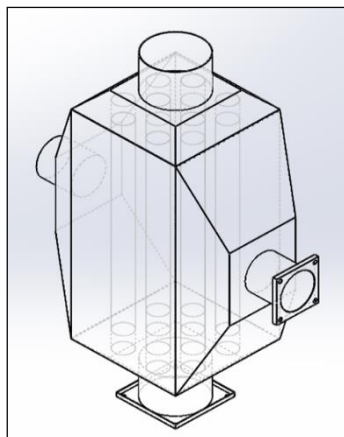
2. สืบหาเครื่องอบแห้งที่จะทำการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อทราบถึงข้อจำกัดในการออกแบบ

3. กำหนดขนาดท่อและมิติด้านต่าง ๆ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่าง ๆ โดยพิจารณาจากข้อจำกัดที่ได้ทำการสืบหาเครื่องอบแห้งเบื้องต้น

4. ทำการสร้างแบบจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 2 แบบ ขนาดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังภาพที่ 3 และ 34



ภาพที่ 33 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ
(Shell and Tube Heat Exchanger)



ภาพที่ 34 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง
(Cross Flow Heat Exchanger)

5. จำลองการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 2 แบบ ด้วยโปรแกรม Solid Work Flow Simulation โดยทำการจำลองทิศทางการไหลของอากาศ อุณหภูมิของอากาศ อุณหภูมิของผิววัสดุ ความเร็วลมของอากาศ และอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 2 แบบโดยจะทำการป้อนข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นในการจำลองการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนี้ กำหนดวัสดุของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เป็นโลหะสแตนเลส (Stainless steel) ชนิด 304 (SUS 304) กำหนดอุณหภูมิฝั่งกระแสน้ำร้อนอยู่ในช่วง 50°C 60°C และ 70°C และอุณหภูมิฝั่งกระแสน้ำเย็นคงที่เท่ากับ 30°C และกำหนดความเร็วลมของอากาศเท่ากับ 1.0 m/s 1.5 m/s และ 2.0 m/s ตามลำดับ

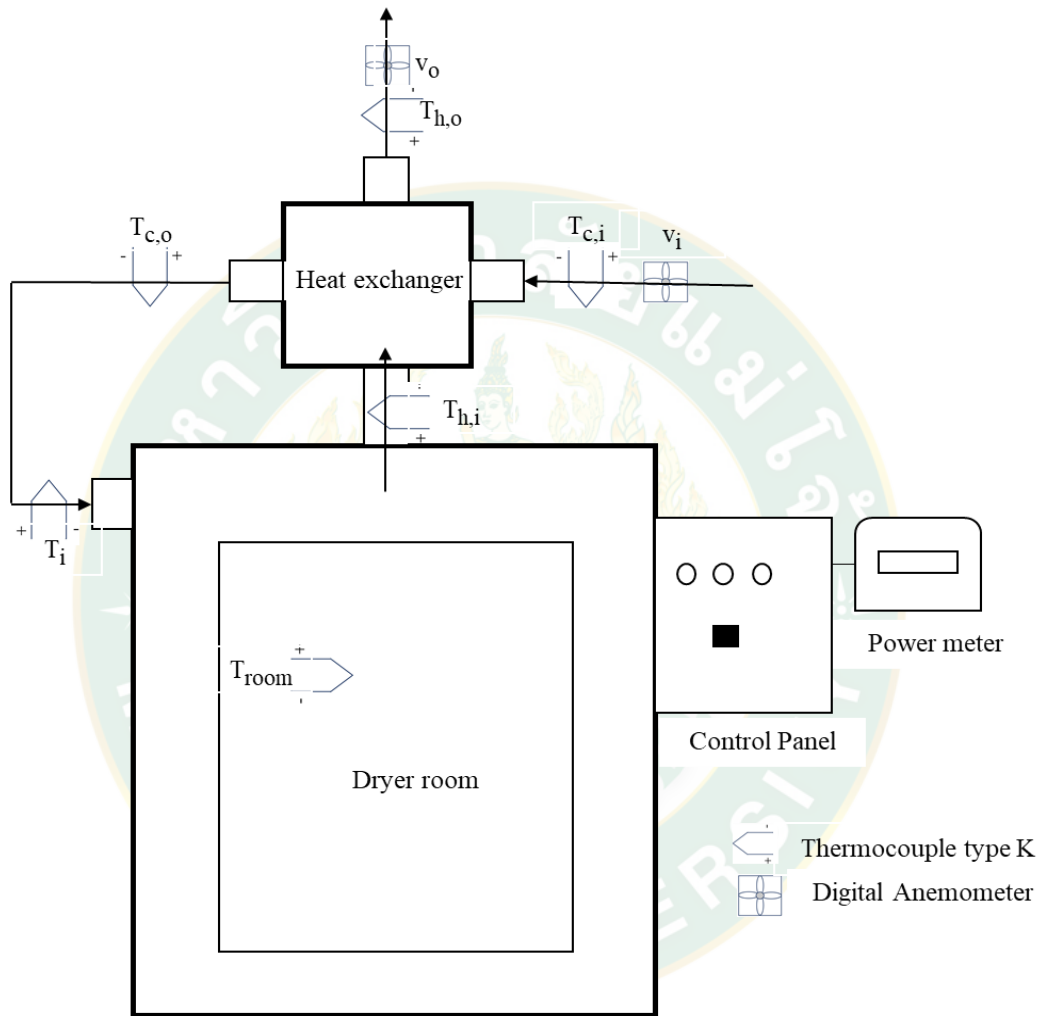
6. พิจารณาผลจากแบบจำลองการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แล้วเลือกขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีค่าประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อการสั่งสร้าง

7. สร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตามแบบโดยใช้วัสดุที่ผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรมอาหาร

การทดสอบระบบอบแห้ง

การทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้งในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบทั้งในกรณีติดตั้งและไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการทดสอบมีขั้นตอนและรายละเอียดดังนี้

1. ทำการออกแบบการทดลองและกำหนดตำแหน่งของอุปกรณ์และเครื่องมือวัดดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 การกำหนดตำแหน่งของอุปกรณ์และเครื่องมือวัด

เมื่อ

$T_{c,i}$ คือ อุณหภูมิฝั่งอากาศเย็นขาเข้า

T_{room} คือ อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้ง

$T_{c,o}$ คือ อุณหภูมิฝั่งอากาศเย็นขาออก

V_i คือ ความเร็วลมขาเข้า

$T_{h,i}$ คือ อุณหภูมิฝั่งอากาศร้อนขาเข้า

V_o คือ ความเร็วลมขาออก

$T_{h,o}$ คือ อุณหภูมิฝั่งอากาศร้อนขาออก

T_i คือ อุณหภูมิขาเข้าเครื่องอบแห้ง

2. ทำการทดสอบเครื่องอบแห้งที่ไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยทำการตั้งค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบเครื่องอบแห้งเท่ากับ 100 °C แล้วทำการจดบันทึกอุณหภูมิ ความเร็วลม ระยะเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงเป้าหมาย และค่าพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องอบแห้งใช้ตลอดระยะเวลาการทดสอบ

3. ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตามที่ได้ออกแบบไว้ขั้นต้น แสดงดังภาพที่ 36 แล้วทำการทดสอบเครื่องอบแห้งเช่นเดียวกับข้อ 2



(a)

(b)

ภาพที่ 36 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

(a) แบบเปลือกและท่อ และ (b) แบบไหลขวาง

4. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าสมรรถนะด้านต่าง ๆ ระหว่างเครื่องอบแห้งที่ไม่ติดตั้งและติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 2 แบบ

การทดลองอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร

งานวิจัยนี้จะทำการทดลองอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรโดยใช้โบรมะกูดและเห็ดหูหนูดำ เป็นวัตถุดิบด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนมาตรฐานอุตสาหกรรมอาหารดังที่ได้กล่าวถึงข้างต้น ทั้งนี้ ผู้วิจัยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ 1) การใช้เครื่องอบแห้งที่ไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 2) การใช้เครื่องอบแห้งที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง และ 3) การใช้เครื่องอบแห้งที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ ดังภาพที่ 37 โดยการทดลองอบแห้งทั้ง 3 กรณีมีขั้นตอนและรายละเอียดวิธีการทดลองดังนี้



(A)



(B)

(C)

ภาพที่ 37 (A) ไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (B) ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง และ (C) ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ

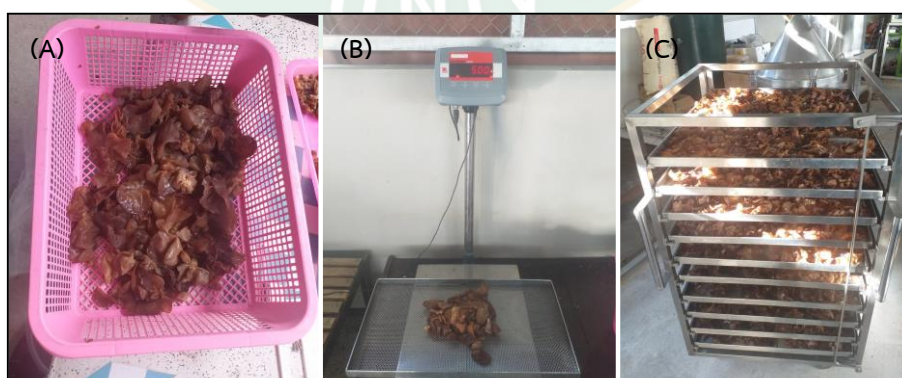
การเตรียมวัตถุดิบในการทดลองอบแห้ง

1.1 การเตรียมใบมะกรูด เริ่มจากการทำความสะอาดใบมะกรูดด้วยน้ำสะอาด จากนั้นทำการล้างใ้ประมาณ 1 h ถึง 2 h เพื่อให้ใบมะกรูดสะอาดเต็ดน้ำ จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักใบมะกรูดจำนวน 4,000 g (4 kg) และทำการบรรจุใบมะกรูดในถาดอบ ปริมาณถาดละ 200 g จำนวน 20 ถาด แสดงดังภาพที่ 38



ภาพที่ 38 ขั้นตอนการเตรียมใบมะกรูด (A) ใบมะกรูดที่ผ่านการทำความสะอาด
(B) การชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการอบแห้ง (C) การบรรจุใบมะกรูดในถาดอบ

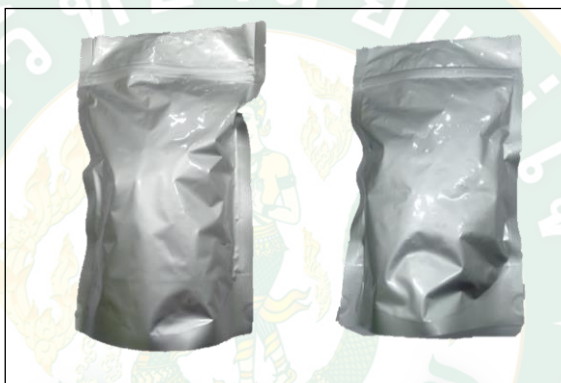
1.2 การเตรียมเห็ดหูหนูดำ เริ่มจากการทำความสะอาดเห็ดหูหนูดำทั้งดอกด้วยน้ำสะอาด ทำการตัดแต่งดอกเห็ดแล้วล้างอากาศใ้ประมาณ 1 h ถึง 2 h เพื่อให้เห็ดสะอาดเต็ดน้ำ จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักเห็ดหูหนูดำจำนวน 10,000 g (10 kg) และทำการบรรจุเห็ดในถาดอบ ปริมาณถาดละ 500 g จำนวน 20 ถาด แสดงดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 ขั้นตอนการเตรียมเห็ดหูหนูดำ (A) เห็ดที่ผ่านการทำความสะอาดและตัดแต่ง (B)
การชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการอบแห้ง (C) การบรรจุเห็ดในถาดอบ

การทดลองอบแห้งผลิตภัณฑ์

1. ทดลองอบแห้งใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำด้วยเครื่องอบแห้งที่ไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนร้อนโดยกำหนดอุณหภูมิในการอบ 3 ค่า ได้แก่ 45 °C 55 °C และ 65 °C และทำการเก็บตัวอย่างวัตถุดิบทั้งสองชนิดที่ผ่านการอบประมาณ 10 g ใส่ถุงกันความชื้นทุก ๆ 30 min ดังภาพที่ 40 เพื่อนำไปหาค่าความชื้นในช่วงเวลาต่าง ๆ จนผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีค่าความชื้นฐานเปียกต่ำกว่า 10 %wb จึงหยุดกระบวนการอบ ทำการชั่งน้ำหนักสุดท้ายของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งเพื่อหาปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์แล้วนำข้อมูลไปวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ เพื่อทราบถึงค่าอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการอบแห้งวัตถุดิบทั้งสองดังกล่าวข้างต้นดังภาพที่ 41



ภาพที่ 40 ตัวอย่างวัตถุในถุงกันความชื้น



(A)



(B)

ภาพที่ 41 การทดลองอบแห้งผลิตภัณฑ์ (A) ใบมะกรูด และ (B) เห็ดหูหนูดำ

2. เมื่อทราบถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้งวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิดจากข้อ 1 ผู้วิจัยจะทำการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่าง ๆ แล้วทำการทดลองอบแห้งวัตถุดิบดังกล่าวโดยใช้ค่าอุณหภูมิอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดค่าเดียวกันกับกรณีที่ใช้เครื่องอบแห้งที่ไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยทำการเก็บข้อมูลต่าง ๆ เช่นเดียวกับการทดลองอบแห้งในข้อ 1

3. นำข้อมูลต่าง ๆ จากกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรทั้ง 2 ชนิดด้วยเครื่องอบแห้งทั้ง 3 แบบ ได้แก่ 1) เครื่องอบแห้งที่ไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 2) เครื่องอบแห้งที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง และ 3) เครื่องอบแห้งที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ มาวิเคราะห์และเปรียบเทียบเพื่อค่าสมรรถนะด้านต่าง ๆ ต่อไป

การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลเชิงวิศวกรรมพลังงาน

ระหว่างดำเนินการทดลองจะทำการเก็บข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมพลังงาน อันได้แก่ อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้ง อุณหภูมิอากาศเย็นและอากาศร้อน ขาเข้า/ขาออกเครื่องอบแห้ง อุณหภูมิอากาศเย็นและอากาศร้อน ขาเข้า/ขาออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ความเร็วลม ณ จุดต่าง ๆ พลังงานไฟฟ้าที่ระบบอบแห้งใช้ จากนั้นจะนำข้อมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ได้แก่ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของระบบอบแห้ง ค่าประสิทธิภาพ ค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและระบบอบแห้ง

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางอาหารของผลิตภัณฑ์อบแห้ง

การทดสอบคุณสมบัติทางอาหารของผลิตภัณฑ์อบแห้งทั้งสองชนิดในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความชื้นในผลิตภัณฑ์ คุณภาพทางด้านสี การคืนตัว ค่าน้ำในวัสดุ โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

1. การวิเคราะห์ค่าความชื้นในผลิตภัณฑ์อบแห้งทำได้โดยนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิดที่ผ่านการอบในช่วงเวลาต่าง ๆ ประมาณ 3 g มาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วบรรจุในเครื่องวัดปริมาณความชื้น แล้วเปิดเครื่องโดยตั้งค่าอุณหภูมิในการทดสอบเท่ากับ 150 °C จากนั้นเครื่องจะทำการระเหยน้ำภายในตัวอย่างผลิตภัณฑ์ออกจนผลิตภัณฑ์นั้นมีน้ำหนักคงที่แล้วเครื่องจะคำนวณค่าความชื้นพร้อมแสดงผลเป็นทางหน้าจอเป็นค่าความชื้นมาตรฐานเปียก (%wb) ดังภาพที่ 42



(A)

(B)

ภาพที่ 42 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์อบแห้ง

(A) ใบมะกรูด (B) เห็ดหูหนูดำ

2. การวิเคราะห์การคืนตัว (Rehydration) ของผลิตภัณฑ์อบแห้งทำได้โดยการนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์มาชั่งน้ำหนัก แล้วนำไปแช่ในน้ำร้อนอุณหภูมิ $90^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 10 min จากนั้นรินน้ำออกและทำการชั่งน้ำหนักออกจากผลิตภัณฑ์ให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนักของตัวอย่างหลังการคืนตัวดังภาพที่ 44 (A)

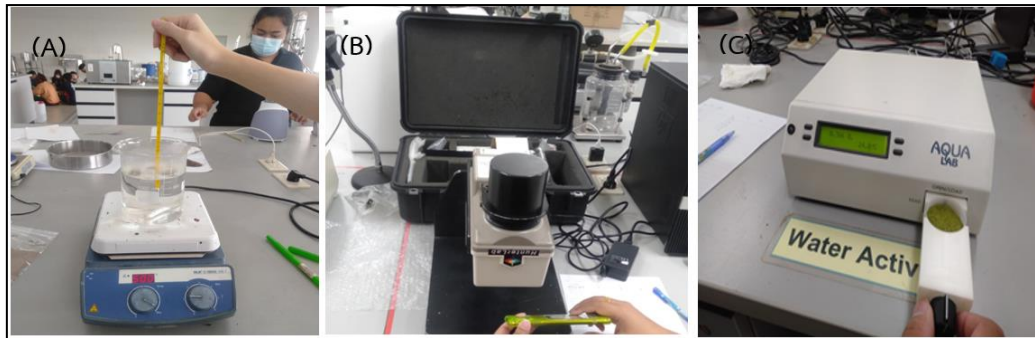
3. การวิเคราะห์คุณภาพทางด้านสีของผลิตภัณฑ์อบแห้งทำได้โดยนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิดที่ผ่านการอบตามระยะเวลาที่กำหนดมาบดให้ละเอียดดังภาพที่ 43 จากนั้นนำไปบรรจุในเครื่องวัดความเข้มของแสง (Spectrophotometer) ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จะแสดงค่าในรูปแบบตัวแปร L, a และ b โดยค่า L จะแสดงถึงค่าความสว่าง ค่า a จะแสดงถึงค่าความเป็นสีแดงและสีเขียว ค่า b จะแสดงถึงค่าความเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงินดังภาพที่ 44 (B)

4. การวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำอิสระในผลิตภัณฑ์ (Water Activity; a_w) ทำได้โดยนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิดที่ผ่านการอบตามระยะเวลาที่กำหนดมาบดให้ละเอียดดังภาพที่ 43 จากนั้นนำไปบรรจุในถ้วยวัด a_w ประมาณ $3/4$ ของถ้วย แล้วใส่ถ้วยเข้าเครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระดังภาพที่ 44 (C) โดยค่า a_w ที่อ่านได้จะมีค่าตั้งแต่ 0.000 a_w ถึง 1.000 a_w หากค่าที่วัดได้มีค่าเข้าใกล้ 1.000 จะหมายถึงวัสดุนั้น ๆ มีปริมาณน้ำอิสระจำนวนมาก



ภาพที่ 43 การเตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์อบแห้งสำหรับการวิเคราะห์ค่าสีและค่า a_w

(A) ใบมะกรูดอบแห้ง และ (B) เห็ดหูหนูดำอบแห้ง



ภาพที่ 44 (A) การวิเคราะห์ค่าการคืนตัวของผลิตภัณฑ์ (B) การวิเคราะห์ค่าสีของผลิตภัณฑ์ และ (C) การวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำอิสระในผลิตภัณฑ์ (a_w)



บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรทั้งสิ้น 2 ชนิด และได้ทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องอบแห้งดังกล่าว ทั้งนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์การวิจัยและขอบเขตการศึกษาโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1: ผลการออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และส่วนที่ 2: ผลการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรตามเงื่อนไขที่กำหนดในขอบเขตการศึกษา โดยผลการวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ผลการวิจัยส่วนที่ 1: ผลการออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

จากผลสำรวจเครื่องอบแห้งที่จะทำการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อทราบถึงข้อจำกัดในการออกแบบพบว่า

1. เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดสอบติดตั้งท่อระบายอากาศขึ้นทิ้งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 15 cm ดังนั้นเพื่อให้เกิดความดันตกคร่อม (Pressure drop) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สุดผู้วิจัยจึงออกแบบให้ท่อทางเข้าและทางออกของกระแสนอน (อากาศขึ้นระบายทิ้ง) ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมากกว่าหรือเท่ากับ 15 cm ในทำนองเดียวกันเครื่องอบแห้งดังกล่าวก็ติดตั้งท่อเติมอากาศแห่งเข้าสู่ระบบ โดยท่อดังกล่าวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 10 cm ผู้วิจัยจึงออกแบบให้ท่อทางเข้าและทางออกของกระแสนอน (อากาศแห้งจากภายนอกที่ต้องการเติมเข้าสู่ระบบ) ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมากกว่าหรือเท่ากับ 10 cm เช่นกัน

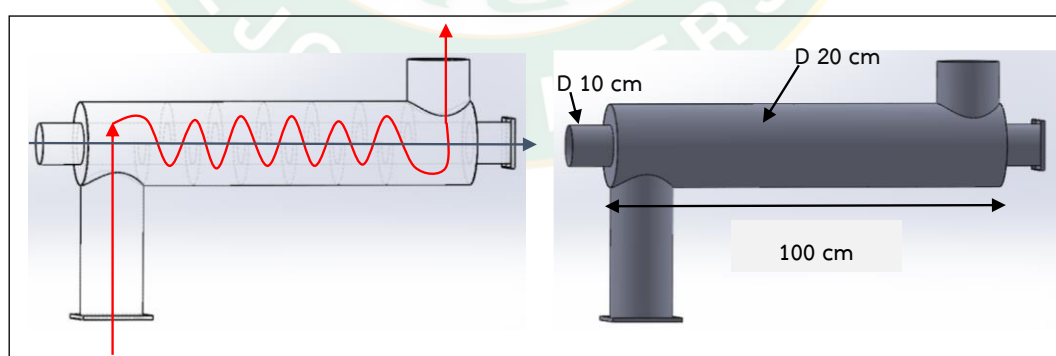
2. เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดสอบมีมิติความสูงโดยรวมประมาณ 180 cm ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความสูงของเพดานห้องที่จะทำการติดตั้งระบบอบแห้งจะมีความสูงประมาณ 300 cm ดังนั้นผู้วิจัยจะต้องออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองแบบให้มีมิติหลังการติดตั้งแล้วเหลือระยะห่างจากเพดานพอสมควรเพื่อการระบายอากาศ

3. เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดสอบมีมิติความกว้างโดยรวมประมาณ 150 cm ดังนั้นผู้วิจัยจะต้องออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองแบบให้มีมิติหลังการติดตั้งแล้วไม่ทำให้มิติความกว้างโดยรวมของระบบอบแห้งกว้างขึ้นมากกว่า 50% ซึ่งจะทำให้ยากต่อการจัดวางตำแหน่งภายในโรงเรือนในภายหลัง

จากสมมุติฐานและข้อจำกัดในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดังกล่าวข้างต้นนำไปสู่การจำลองการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่าง ๆ ซึ่งมีรายละเอียดผลการจำลองการทำงานดังต่อไปนี้

ผลการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and Tube Heat Exchanger)

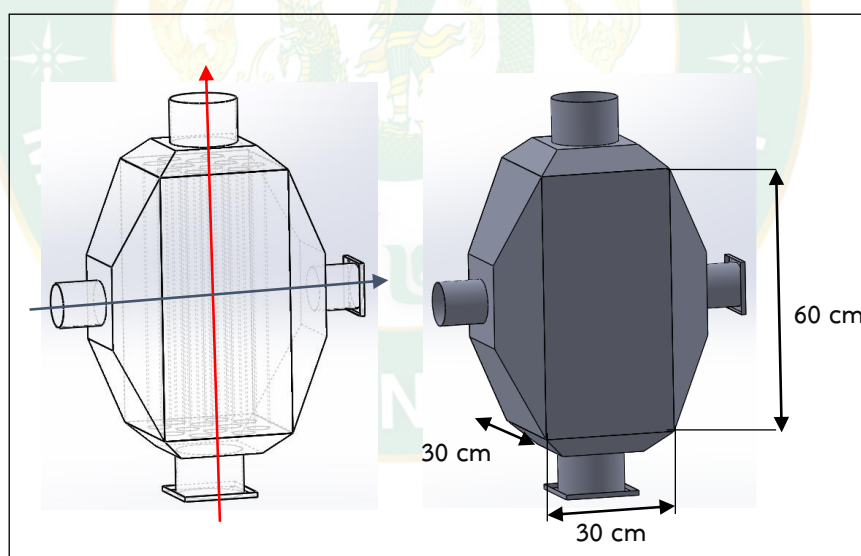
เมื่อพิจารณาข้อจำกัดในการออกแบบทางด้านมิติและองค์ประกอบของเครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำให้ผู้วิจัยทำการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อโดยกำหนดให้ขนาดท่อทางเข้าและทางออกของทั้งกระแสนอน (อากาศชั้นระบายทิ้ง) และกระแสนอน (อากาศแห้งจากภายนอกที่ต้องการเติมเข้าสู่ระบบ) มีขนาดเท่ากับ 15 cm และ 10 cm ซึ่งเป็นขนาดที่เท่ากับท่อระบายและท่อดูดของเครื่องอบแห้งตามลำดับและกำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเปลือก (shell) ซึ่งครอบอยู่ภายนอกและใช้เป็นทางเดินของกระแสนอนถูกออกแบบให้มีขนาดเท่ากับ 20 cm เพื่อให้สามารถเชื่อมติดกับทางเข้าและทางออกของกระแสนอนได้ เนื่องจากหากออกแบบให้เปลือก และทางเข้า/ทางออก มีขนาดเท่ากันจะทำให้การขึ้นรูปชิ้นงานทำได้ยาก ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดในการติดตั้งทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อมีความยาวโดยรวมได้สูงสุดไม่เกิน 150 cm ทำให้เปลือก (shell) ถูกออกแบบให้มีความยาวเท่ากับ 100 cm และภายในของเปลือกได้ทำการแบ่งห้องด้วยการติดตั้งแผ่นบังค้ำการไหลวนของของไหล (Pass Divider) ทำหน้าที่บังค้ำให้เกิดการไหลวนไปมาวางสลับกันห่างกันแผ่นละ 10 cm ดังแสดงในภาพที่ 45



ภาพที่ 45 ผลการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ

ผลการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดไหลขวาง (Cross Flow Heat Exchanger)

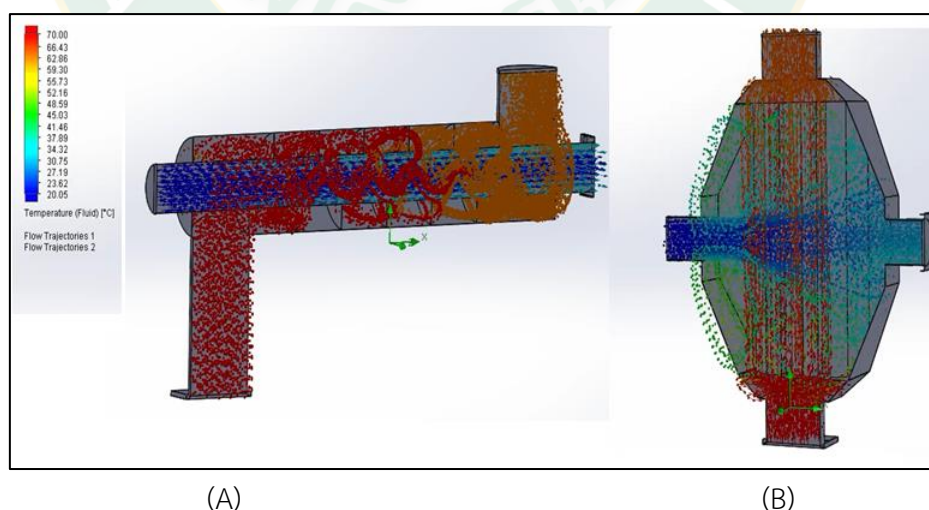
เมื่อพิจารณาข้อจำกัดในการออกแบบทางด้านมิติและองค์ประกอบของเครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำให้ผู้วิจัยทำการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง (Cross Flow Heat Exchanger) โดยกำหนดให้ขนาดท่อทางเข้าและทางออกของทั้งกระแสร้อน (อากาศชั้นระบายทิ้ง) และกระแสเย็น (อากาศแห้งจากภายนอกที่ต้องการเติมเข้าสู่ระบบ) ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับท่อทางเข้าและทางออกของทั้งกระแสร้อนและเย็นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ เนื่องจากถูกกำหนดด้วยขนาดท่อของเครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ภายในของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางนี้ถูกติดตั้งชุดท่อขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm จำนวน 12 ท่อวางเรียงแนวสลับกันทั้งสิ้น 5 แถวทำหน้าที่เป็นเป็นทางเดินของกระแสร้อน (อากาศชั้นระบายทิ้ง) ดังภาพที่ 46 ทั้งนี้กลุ่มท่อขนาดเล็กดังกล่าวจะมีความยาวสูงสุดได้ไม่เกิน 60 cm เนื่องจากถูกจำกัดด้วยความสูงของสถานที่ในการติดตั้ง ผลจากการติดตั้งกลุ่มท่อขนาดเล็กนั้นทำให้มีขนาดพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนประมาณ 1.13 m^2 ซึ่งมากกว่าการติดตั้งท่อเดี่ยวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm ที่มีความยาวเท่ากันถึง 400%



ภาพที่ 46 ผลการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดไหลขวาง

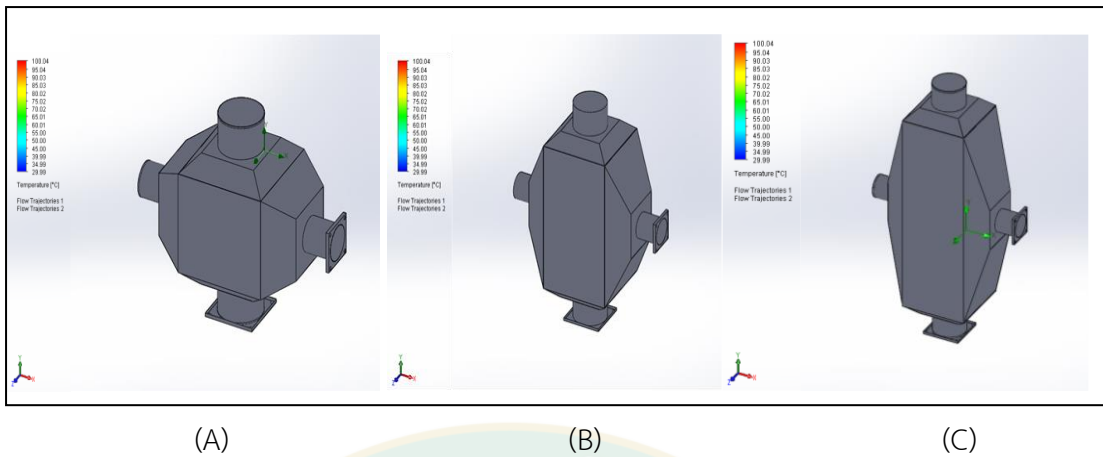
ผลการจำลองการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

จากสมมุติฐานและข้อจำกัดในการออกแบบดังกล่าวข้างต้นนำไปสู่การกำหนดมิติและขนาดท่อต่าง ๆ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และเมื่อกำหนดขนาดแล้วเสร็จจึงผู้วิจัยได้ทำการจำลองการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 2 ชนิดด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation เพื่อศึกษาทิศทางการไหลและอุณหภูมิของอากาศ จากผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์พบว่าอากาศเย็นที่ไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นในขณะที่อุณหภูมิอากาศร้อนที่ไหลออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีอุณหภูมิที่ลดลงซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐานของการออกแบบ ทั้งนี้ลักษณะและทิศทางการไหลของอากาศภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 2 แบบจะมีความแตกต่างกัน โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and Tube Heat Exchanger) นั้นอากาศร้อนจะไหลในเปลือกที่ติดตั้งแผ่นบังค้ำบการไหลวนของของไหล (Pass Divider) ทำให้อากาศร้อนเคลื่อนที่ไหลวนผ่านแต่ละห้องอาบที่อากาศเย็นที่ติดตั้งไว้ภายในเปลือก ทำให้ผิวของท่อดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงขึ้นและถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศจนทำให้อากาศเย็นมีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนที่จะไหลเข้าสู่ส่วนทำความร้อนของเครื่องอบแห้ง ส่วนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง (Cross Flow Heat Exchanger) จะมีลักษณะการไหลของอากาศเย็นที่หมุนวนและเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มท่อขนาดเล็กซึ่งเป็นทางเดินของอากาศร้อนปล่อยทิ้งที่ติดตั้งอยู่ด้านในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดดังกล่าวทำให้อากาศเย็นได้รับความร้อนและมีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนที่จะไหลเข้าสู่ส่วนทำความร้อนของเครื่องอบแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 4

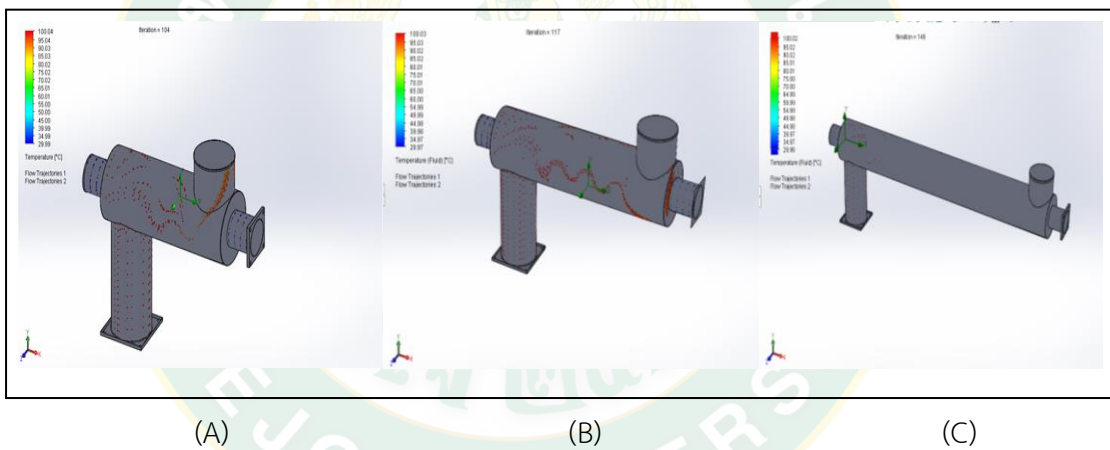


ภาพที่ 47 ทิศทางการไหลและอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
(A) แบบเปลือกและท่อ และ (B) แบบไหลขวาง

จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่กำหนดเงื่อนไขให้กระแสน้ำอากาศเย็นมีอุณหภูมิ ณ ทางเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคงที่เท่ากับ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ กระแสน้ำอากาศเย็นและกระแสน้ำอากาศร้อนมีอัตราการไหลเชิงมวล ณ ทางเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคงที่เท่ากันเท่ากับ 0.17 kg/s แล้วทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของกระแสน้ำอากาศร้อน ณ ทางเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ และปรับเปลี่ยนความยาวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 2 แบบ ทั้งสิ้น 3 ค่า โดยกรณีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางจะทำการปรับเปลี่ยนความสูงของชุดท่อเท่ากับ 30 cm 60 cm และ 90 cm ตามลำดับ ในขณะที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อจะทำการปรับเปลี่ยนความยาวของเปลือกเท่ากับ 50 cm 100 cm และ 150 cm ตามลำดับ เพื่อทดสอบสมมุติฐานในการออกแบบด้านมิติที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่าง ๆ เมื่อทำการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ดังกล่าวพบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางสามารถเพิ่มอุณหภูมิของกระแสน้ำเย็นได้สูงสุดเท่ากับ $14.17\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อความยาวกลุ่มท่อมีขนาดเท่ากับ 60 cm ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขในการออกแบบที่กล่าวไว้เบื้องต้น ในทำนองเดียวกันเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อสามารถเพิ่มอุณหภูมิของกระแสน้ำเย็นได้สูงสุดเท่ากับ $8.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อขนาดของเปลือกมีความยาวเท่ากับ 100 cm ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขในการออกแบบเช่นกัน ทั้งนี้เมื่อทำการเพิ่มค่าอัตราการไหลเชิงมวลของกระแสน้ำร้อนและกระแสน้ำเย็นที่ไหลเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองชนิดจะพบว่าผลต่างของอุณหภูมิอากาศเย็นที่ไหลเข้าและไหลออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าลดลงในทุกค่าอุณหภูมิที่ทำการจำลองผล กล่าวคือหากทำการระบายอากาศร้อนขึ้นออกจากห้องอบแห้งในปริมาณมากจะทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองชนิดจะมีความสามารถในการอุ่นอากาศเพื่อเติมเข้าห้องอบแห้งได้น้อยลง ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิของอากาศร้อนขึ้นที่ปล่อยทิ้งจากห้องอบแห้งมีค่าสูงขึ้นจะทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองชนิดจะมีความสามารถในการอุ่นอากาศเพื่อเติมเข้าห้องอบแห้งได้มากขึ้นโดยผลการจำลองการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละชนิดที่มีขนาดแตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 48 ถึง 49



ภาพที่ 48 การจำลองการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางที่มีความสูงกลุ่มท่อ
(A) 30 cm (B) 60 cm และ (C) 90 cm



ภาพที่ 49 การจำลองการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ
ที่มีความยาวเปลือก (A) 50 cm (B) 100 cm และ (C) 150 cm

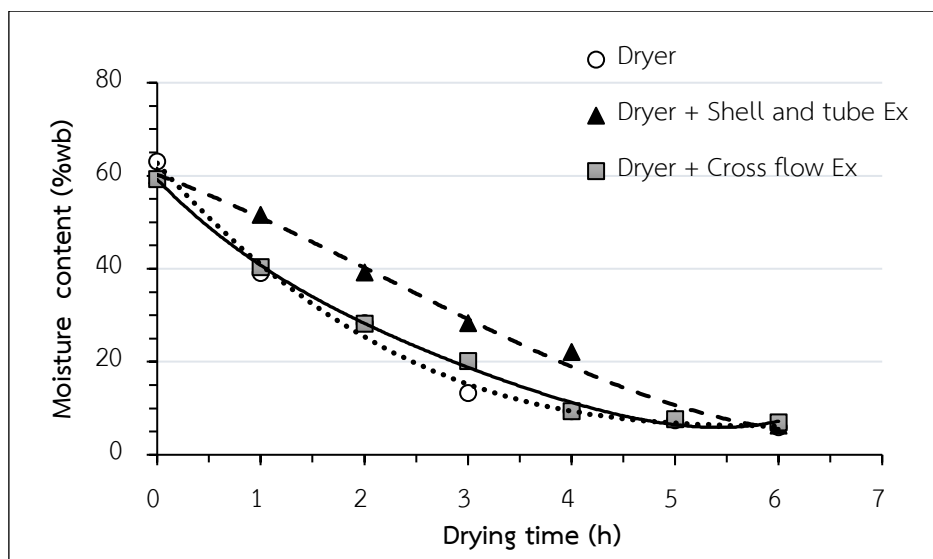
ผลการวิจัยส่วนที่ 2: ผลการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการอบแห้งผลิตภัณฑ์

ทางการเกษตร

จากการทดลองอบแห้งใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำด้วยเครื่องอบแห้งที่ไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนร้อนโดยกำหนดอุณหภูมิในการอบ 3 ค่า ได้แก่ 45 °C 55 °C และ 65 °C และทำการเก็บตัวอย่างวัตถุดิบทั้งสองชนิดที่ผ่านการอบประมาณ 10 g ใส่ถุงกันความชื้นทุก ๆ 30 min จนได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีค่าความชื้นฐานเปียกต่ำกว่า 10 %wb พบว่าการอบแห้งใบมะกรูดสดให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ใบมะกรูดอบแห้งที่มีสีสน้ำใกล้เคียงกับใบมะกรูดสดมากที่สุดซึ่งตัวแปรด้านสีของผลิตภัณฑ์นี้ส่งผลต่อราคาขายมากที่สุดจะใช้อุณหภูมิในการอบแห้งเท่ากับ 55 °C ในส่วนของเห็ดหูหนูดำพบว่าการอบด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 ค่าดังกล่าวข้างต้นไม่ส่งผลต่อตัวแปรด้านสีของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยยะสำคัญแต่พบว่าการอบแห้งที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดจะใช้อุณหภูมิในการอบแห้งเท่ากับ 65 °C จากข้อมูลการทดลองอบแห้งใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำด้วยเครื่องอบแห้งที่ไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนร้อนดังที่กล่าวข้างต้นนำไปสู่การทดลองโดยใช้เครื่องอบแห้งที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ และแบบไหลขวางที่กำหนดอุณหภูมิในการอบแห้งให้เหมาะสมกับวัตถุดิบต่าง ๆ โดยผลการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

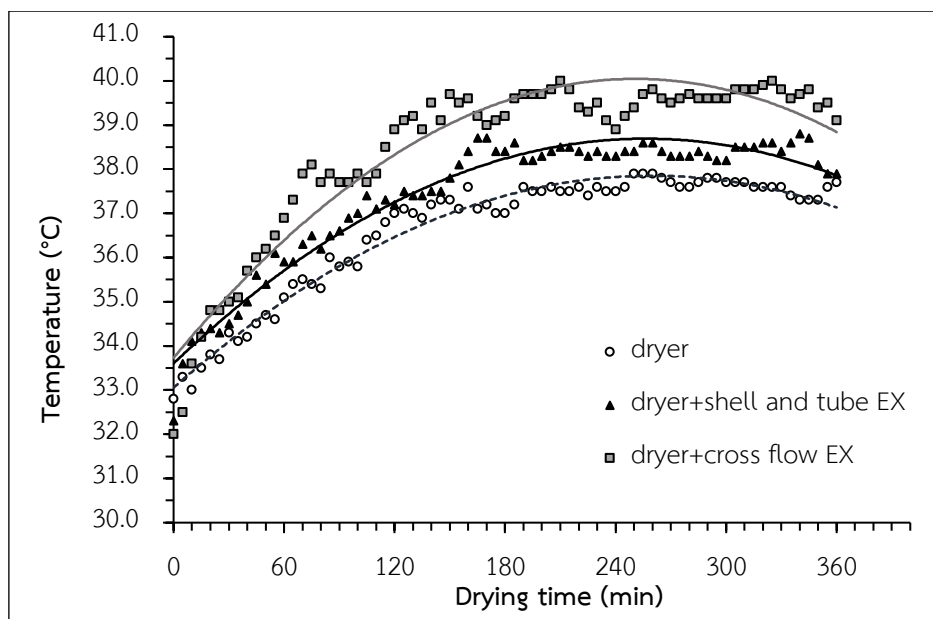
ผลการทดลองอบแห้งใบมะกรูด

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองอบแห้งใบมะกรูดที่มีความชื้นเริ่มต้นใกล้เคียงกัน (ประมาณ 60 %wb) ด้วยอุณหภูมิตอบแห้งเท่ากับ 55 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมจากการทดลองด้วยเครื่องอบแห้งที่ไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยเมื่อทำการทดลองด้วยเครื่องอบแห้งที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองชนิดพบว่า การติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไม่ส่งผลต่อการลดระยะเวลาในการอบแห้งอย่างมีนัยยะสำคัญ เนื่องจากการอบแห้งใบมะกรูดด้วยเครื่องอบแห้งทั้ง 3 แบบจนได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีค่าความชื้นฐานเปียกต่ำกว่า 10 %wb ใช้เวลาใกล้เคียงกันคือประมาณ 5 h โดยความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาในการอบแห้งใบมะกรูดด้วยเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 50



ภาพที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาในการอบแห้งใบมะกรูด

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ที่ทำการตรวจวัดระหว่างดำเนินการอบแห้งจากภาพที่ 51 พบว่าการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 2 แบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิกระแสเย็น (อากาศแห้งจากภายนอกที่ต้องการเติมเข้าสู่ระบบ) มีค่าเพิ่มขึ้นจากปกติ โดยกรณีติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อสามารถเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าได้สูงสุดเท่ากับ $3.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1.65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ส่วนกรณีติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางสามารถเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าได้สูงสุดเท่ากับ $6.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ $4.42\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยเมื่อพิจารณาถึงผลต่างของอุณหภูมิกระแสน้ำร้อนและกระแสเย็น ณ ทางเข้าและออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองแบบจะพบว่าความร้อนแบบเปลือกและท่อมีค่าประสิทธิผล (Effectiveness) และค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 16.67% และ 58.48% ในขณะที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางมีค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเท่ากับ 31.58% และ 75.19% ตามลำดับ

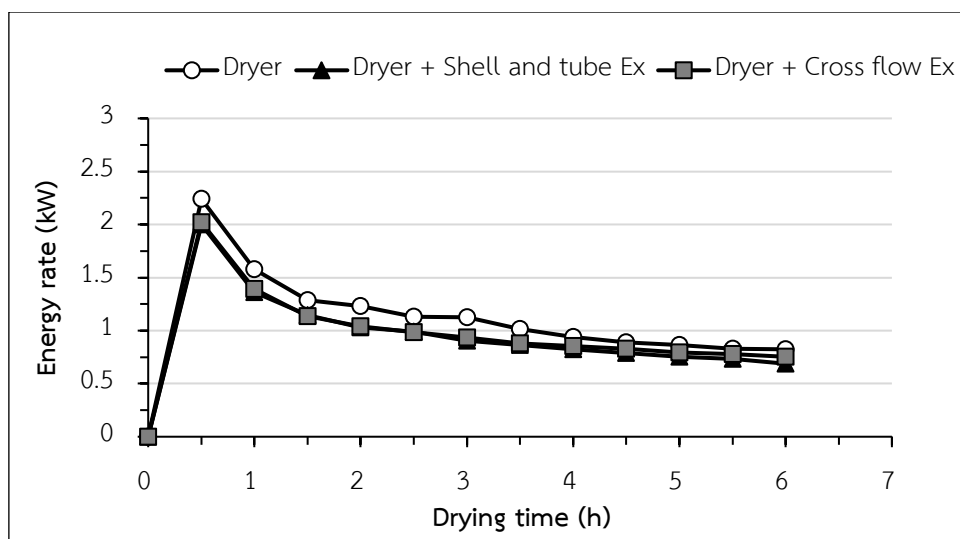


ภาพที่ 51 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกระแสน้ำ

การใช้พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้งใบมะกรูด

ผลการศึกษาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้งใบมะกรูด จากภาพที่ 52 พบว่า ช่วงเวลา 15 min ของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งทั้ง 3 แบบจะมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากอุณหภูมิเริ่มต้นทั้งวัตถุดิบรวมถึงส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ติดตั้งภายในห้องอบ เช่น ชั้นวางวัตถุดิบ ผนังห้องอบ ยังมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับอุณหภูมิลมร้อนทำให้วัสดุตั้งกล่าวดูดความร้อนทั้งหมดเข้าไปเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้ใกล้เคียงกับลมร้อนทำให้ขดลวดไฟฟ้าต้องทำงานหนักในช่วงแรก โดยการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอบแห้งทั้ง 3 แบบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่เมื่อเวลาผ่านไป อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าจะมีค่าลดลง จนกระทั่งอุณหภูมิของใบมะกรูดเริ่มเข้าใกล้อุณหภูมิของลมร้อน โดยเมื่อความชื้นในใบมะกรูดเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อระยะเวลาผ่านไปประมาณ 5 h อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าก็จะเริ่มคงที่เช่นเดียวกันทั้ง 3 แบบของเครื่องอบแห้งทั้งนี้เมื่อพิจารณาปริมาณการใช้ไฟฟ้าของการอบแห้งใบมะกรูดจนได้ผลิตภัณฑ์ใบมะกรูดอบแห้งที่มีความชื้นฐานเปียกต่ำกว่า 10 %wb พบว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่ไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงที่สุด รองลงมา คือ การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเปลือกและท่อ และแบบไหลขวาง ซึ่งการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ มีค่าเท่ากับ 4.00 kWh 3.77 kWh และ 3.72 kWh ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

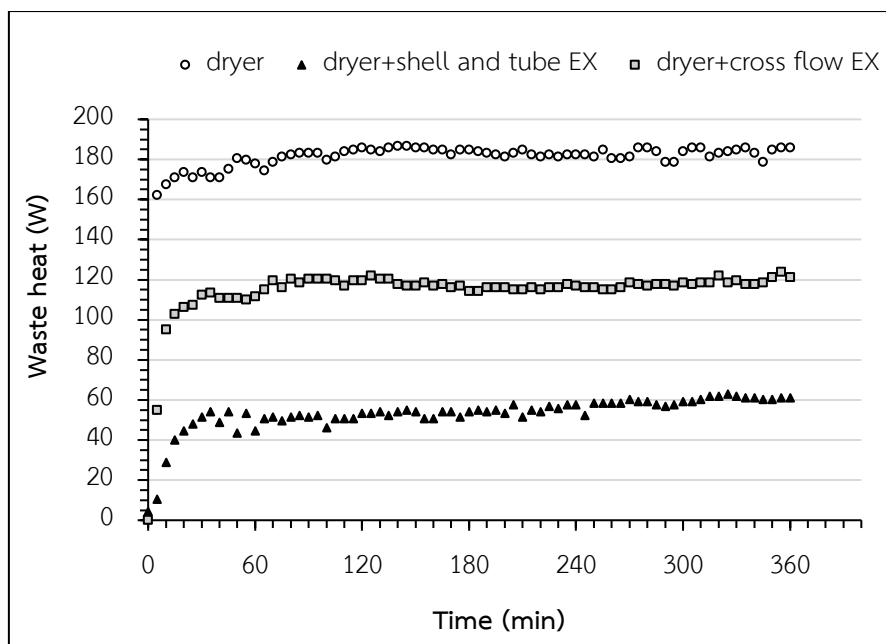
แบบเปลือกและท่อ และแบบไหลขวาง สามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการอบแห้งใบมะกรูดได้เท่ากับ 5.78 % และ 7.00 % ตามลำดับ



ภาพที่ 52 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้งใบมะกรูด

อัตราการปล่อยความร้อนทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมของการอบแห้งใบมะกรูด

ผลการทดสอบอัตราการปล่อยความร้อนทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมของการอบแห้งใบมะกรูดด้วยเครื่องอบแห้งทั้ง 3 แบบ จากภาพที่ 53 พบว่าช่วงเวลาการอบแห้งเท่ากับ 0 min ถึง 30 min จะเป็นช่วงการเริ่มต้นของกระบวนการอบแห้ง โดยอุณหภูมิกระแสร้อน (อากาศชั้นระบายทิ้ง) ที่ออกจากเครื่องอบแห้งในช่วงนี้จะมีแนวโน้มสูงขึ้น และหลังจากนั้นอัตราความร้อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมของการอบแห้งแต่ละแบบก็จะเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยกรณีการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีอัตราความร้อนที่ปล่อยสิ่งแวดล้อมสูงสุด รองมาคือการอบแห้งแบบติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง และต่ำสุด คือ การอบแห้งแบบติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ ซึ่งแต่ละกรณีมีอัตราการปล่อยความร้อนทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมเฉลี่ยเท่ากับ 182.21 W 120.36 W และ 58.10 W ตามลำดับ



ภาพที่ 53 อัตราการปล่อยความร้อนทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมของการอบแห้งใบมะกรูด

ค่าสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

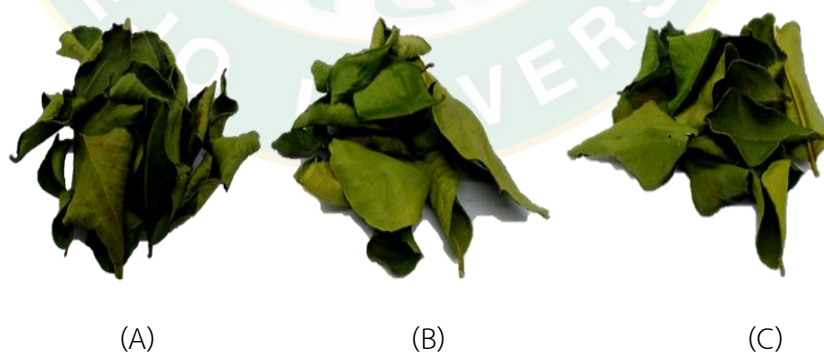
เมื่อพิจารณาค่าสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพบว่าค่าอัตราการระเหยน้ำของเครื่องอบแห้งทุกแบบมีค่าไม่ต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาในด้านพลังงานจะพบว่าการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแบบไหลขวาง และ แบบเปลือกและท่อสามารถลดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งใบมะกรูดได้ประมาณ $408 \text{ kJ/kg}_{\text{water}}$ และ $320 \text{ kJ/kg}_{\text{water}}$ ตามลำดับ ทั้งนี้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองแบบดังกล่าวยังสามารถเพิ่มค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ เท่ากับ $0.04 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kWh}$ และ $0.03 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kWh}$ ซึ่งส่งผลต่อการลดต้นทุนทางด้านพลังงานได้ถึง 7.00 % และ 5.50 % ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพของระบบอบแห้งก็จะพบว่าการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 2 แบบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดสอบได้ โดยค่าประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางแบบเปลือกและท่อ และแบบไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเท่ากับ 44.21 % 43.50 % และ 40.64 % ตามลำดับ โดยค่าพารามิเตอร์ของการทดสอบเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ กรณีอบแห้งใบมะกรูดแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ กรณีอบแห้งใบมะกรูด

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องอบแห้ง		
	Dryer	Dryer + Cross Flow	Dryer + Shell and Tube
การเพิ่มอุณหภูมิกระแสน้ำสูงสุด (°C)	-	6.00	3.00
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh)	4.00	3.72	3.77
อัตราการปล่อยความร้อนทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม (W)	182.21	120.36	58.10
อัตราการระเหยน้ำ ($\text{kg}_{\text{water}}/\text{h}$)	0.548	0.548	0.494
อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ($\text{kJ}/\text{kg}_{\text{water}}$)	5,830	5,421	5,509
อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ ($\text{kg}_{\text{water}}/\text{kWh}$)	0.62	0.66	0.65
ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (%)	-	31.58	16.67
ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (%)	-	75.19	58.48
ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง (%)	40.64	44.21	43.50

คุณสมบัติทางอาหารของผลิตภัณฑ์ใบมะกรูดอบแห้ง

การศึกษาคุณสมบัติทางอาหารของใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งนั้นประกอบด้วยคุณภาพสีสันของผลิตภัณฑ์ ค่าการคืนตัวเมื่อนำใบมะกรูดไปแช่น้ำ และค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water Activity; aw) ภายในใบมะกรูดซึ่งจะเป็นตัวชี้วัดด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้ง โดยใบมะกรูดที่ผ่านกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 °C ด้วยเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ จะลักษณะดังภาพที่ 54 และผลการศึกษาคุณสมบัติทางอาหารของใบมะกรูดที่ผ่านอบแห้งแสดงตารางที่ 8



ภาพที่ 54 ใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ

(A) Dryer (B) Dryer + Shell and Tube

และ (C) Dryer + Cross Flow

ตารางที่ 8 คุณสมบัติทางอาหารของใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ

เครื่องอบแห้ง	ค่าพารามิเตอร์สี				ค่าการคืนตัว (%)	Water Activity (aw)
	L*	a*	b*	ΔE		
ก่อนการอบแห้ง	39.36	-9.53	15.39	-	-	-
Dryer	43.61	-6.38	23.43	9.62	5.81	0.375
Dryer + Shell and Tube	37.28	-7.70	24.68	9.70	5.38	0.324
Dryer + Cross Flow	38.06	-7.68	24.38	9.34	5.23	0.391

จากตารางที่ 8 จะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์สีและค่าการคืนตัวของใบมะกรูดที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งทั้ง 3 แบบมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักทั้งนี้เนื่องจากการทดลองอบแห้งทุกกรณีได้ตั้งค่าอุณหภูมิการอบที่เท่ากันและทำการทดลองอบในวันที่มีสภาพแวดล้อมใกล้เคียงกันจึงทำให้ระยะเวลาในการอบด้วยเครื่องอบแห้งทุกแบบไม่ต่างกันส่งผลต่อสมบัติทางด้านอาหารของผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ใกล้เคียงกันด้วย เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์สีของใบมะกรูดอบแห้งที่มีความแตกต่างของสีต่ำกว่า 10 หมายถึงผลิตภัณฑ์นั้นอยู่ในเกรดเดียวกัน ในทำนองเดียวกันค่าการคืนตัวของใบมะกรูดอบแห้งก็มีค่าต่างกันไม่เกิน 1 % หมายถึงผลิตภัณฑ์นั้นสามารถคืนตัวเมื่อแช่ในน้ำได้ไม่ต่างกัน และเมื่อพิจารณาถึงค่าปริมาณน้ำอิสระ (aw) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งจะพบว่าใบมะกรูดอบแห้งที่ผลิตจากเครื่องอบแห้งทั้ง 3 แบบมีค่าไม่เกิน 0.4 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานการผลิตอาหารอบแห้งที่กำหนดไว้ในช่วง 0.3 ถึง 0.6

การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งใบมะกรูด

การวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โดยข้อมูลด้านเศรษฐศาสตร์ก็เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงด้วย ซึ่งผลการประหยัดรวมไปถึงระยะเวลาการคืนทุน แสดงดังตารางที่ 9

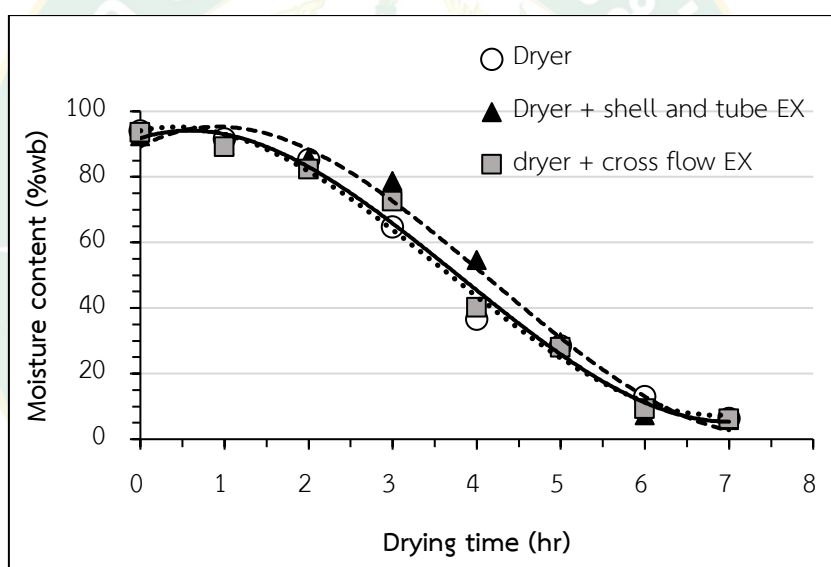
ตารางที่ 9 ผลประหยัดและระยะเวลาคืนทุนสำหรับการอบแห้งใบมะกรูด

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องอบแห้ง		
	Dryer	Dryer + Cross Flow	Dryer + Shell and Tube
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh)	4.00	3.72	3.77
ผลประหยัดพลังงานไฟฟ้า (kWh/time)	-	0.28	0.23
ผลประหยัด (Baht/day)	-	5.60	4.60
ต้นทุน (Baht)	-	6,000	6,000
ระยะเวลาคืนทุน (Year)	-	5.87	7.15

จากตารางที่ 9 พบว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง และการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าให้กับเครื่องอบแห้งได้เท่ากับ 0.28 kWh และ 0.23 kWh ตามลำดับ ต่อการอบใบมะกรูด 1 ครั้ง (5 h) ซึ่งลดการใช้ไฟฟ้าลงประมาณ 7 % และ 6 % ตามลำดับ หากทำการอบแห้งวันละ 2 ครั้ง ๆ ละ 5 h จะคิดเป็นผลประหยัดได้เท่ากับ 2.80 Baht/day และ 2.30 Baht/day ตามลำดับ ดังนั้นการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองแบบจะมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 5.87 year และ 7.15 year ตามลำดับ (คำนวณจากค่าไฟฟ้า 5 Baht/kWh และระยะเวลาการอบแห้ง 365 Day/year)

ผลการทดลองอบแห้งเห็ดหูหนูดำ

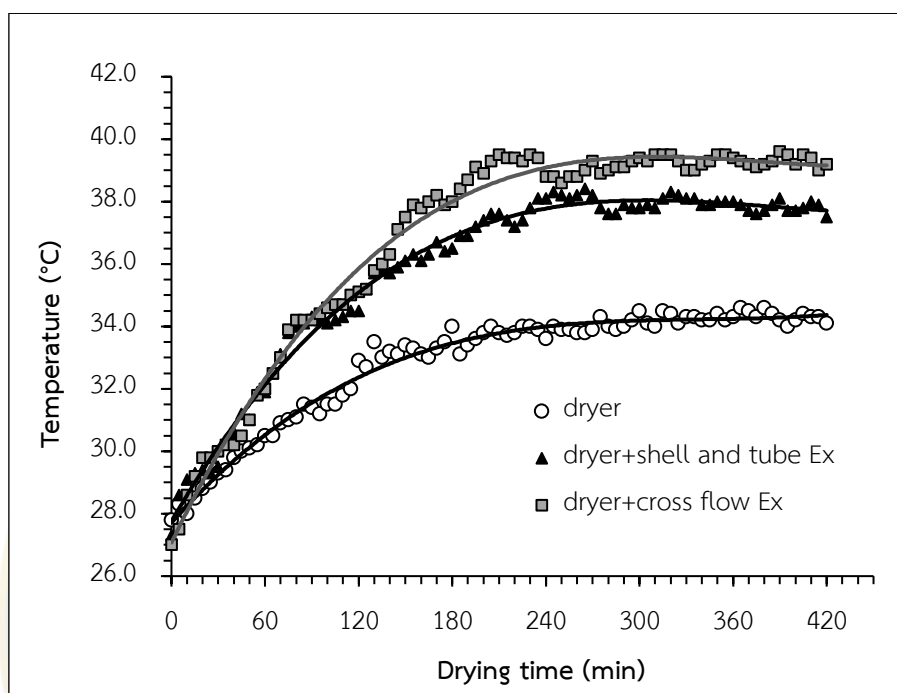
งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองอบแห้งเห็ดหูหนูดำที่มีความชื้นเริ่มต้นใกล้เคียงกัน (ประมาณ 90 %wb) ด้วยอุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 65 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมจากการทดลองด้วยเครื่องอบแห้งที่ไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยเมื่อทำการทดลองด้วยเครื่องอบแห้งที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองชนิดพบว่า การติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไม่ส่งผลกระทบต่อการลดระยะเวลาในการอบแห้งอย่างมีนัยยะสำคัญ เนื่องจากการอบแห้งเห็ดหูหนูดำด้วยเครื่องอบแห้งทั้ง 3 แบบจนได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีค่าความชื้นฐานเปียกต่ำกว่า 10 % wb ใช้เวลาใกล้เคียงกันคือ ประมาณ 6 h โดยความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาในการอบแห้งเห็ดหูหนูดำด้วยเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 55



ภาพที่ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาในการอบแห้งเห็ดหูหนูดำ

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ที่ทำการตรวจวัดระหว่างดำเนินกระบวนการอบแห้งจากภาพที่ 56 พบว่าการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 2 แบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิกระแสเย็น (อากาศแห้งจากภายนอกที่ต้องการเติมเข้าสู่ระบบ) มีค่าเพิ่มขึ้นจากปกติ โดยกรณีติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไปไหลขวางสามารถเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าได้สูงสุดเท่ากับ 9.60 °C คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.27 °C ส่วนกรณีติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อสามารถเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าได้สูงสุดเท่ากับ 7.40 °C คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.66 °C โดยเมื่อพิจารณาถึงผลต่างของอุณหภูมิกระแสร้อนและกระแสเย็น ณ ทางเข้าและออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสอง

แบบจะพบว่าความร้อนแบบเปลือกและท่อมี่ค่าประสิทธิผล (Effectiveness) และค่าประสิทธิภาพ เท่ากับ 20.45 % และ 41.38 % ในขณะที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางมีค่าพารามิเตอร์ ดังกล่าวเท่ากับ 25.27 % และ 75.89.90 % ตามลำดับ

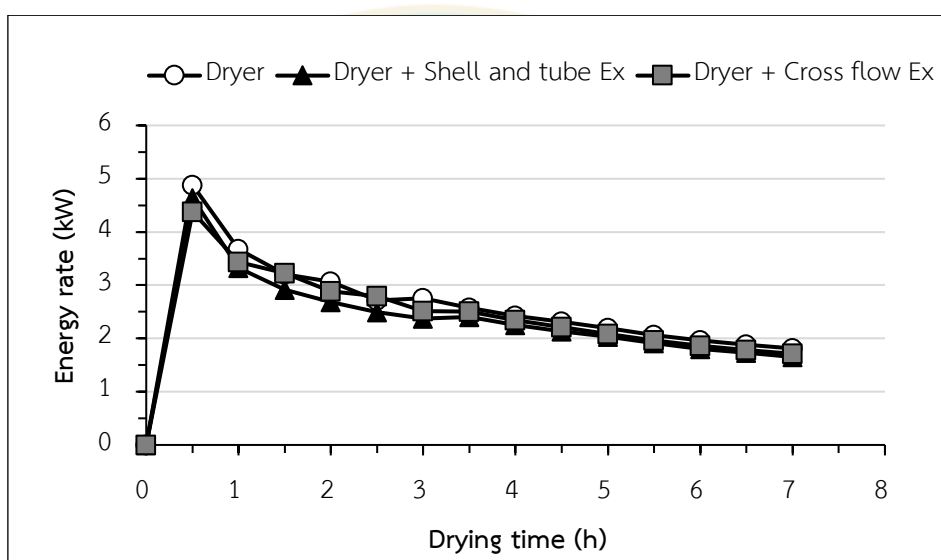


ภาพที่ 56 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกระแสร้อน

การใช้พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้งเห็ดหูหนูดำ

ผลการศึกษาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้งเห็ดหูหนูดำ จากภาพที่ 57 พบว่า ช่วงเวลา 15 min ของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งทั้ง 3 แบบจะมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากอุณหภูมิเริ่มต้นทั้งวัตถุดิบรวมถึงส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ติดตั้งภายใน ห้องอบ เช่น ชั้นวางวัตถุดิบ ผนังห้องอบ ยังมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับอุณหภูมิลมร้อนทำให้วัสดุดังกล่าวดูด ความร้อนทั้งหมดเข้าไปเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้ใกล้เคียงกับลมร้อนทำให้ขดลวดไฟฟ้าต้องทำงานหนัก ในช่วงแรก โดยการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอบแห้งทั้ง 3 แบบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่ เมื่อเวลาผ่านไป อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าจะมีค่าลดลง จนกระทั่งอุณหภูมิของเห็ดหูหนูดำเริ่มเข้า ใกล้เคียงอุณหภูมิของลมร้อน โดยเมื่อความชื้นในเห็ดหูหนูดำเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อระยะเวลาผ่านไปประมาณ 5 h อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าก็จะเริ่มคงที่เช่นเดียวกันทั้ง 3 แบบของเครื่องอบแห้งทั้งนี้เมื่อพิจารณา ปริมาณการใช้ไฟฟ้าของการอบแห้งเห็ดหูหนูดำจนได้ผลิตภัณฑ์เห็ดหูหนูดำอบแห้งที่มีความชื้นฐาน

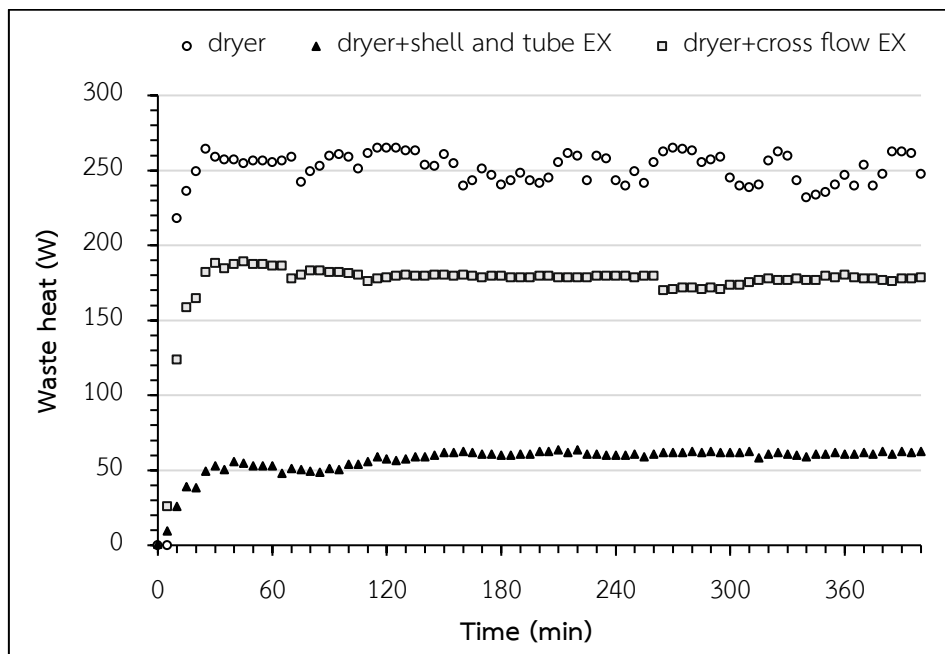
เป็ยกต่ำกว่า 10 %wb พบว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่ไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงที่สุด รองลงมา คือ การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ และแบบไหลขวาง ซึ่งการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอบแห้งแบบต่างๆ มีค่าเท่ากับ 11.79 kWh 11.24 kWh และ 11.20 kWh ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง และแบบเปลือกและท่อสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการอบแห้งเห็ดหูหนูดำได้เท่ากับ 5.01 % และ 4.66 % ตามลำดับ



ภาพที่ 57 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้งเห็ดหูหนูดำ

อัตราการปล่อยความร้อนทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมของการอบแห้งเห็ดหูหนูดำ

ผลการทดสอบอัตราการปล่อยความร้อนทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมของการอบแห้งเห็ดหูหนูดำด้วยเครื่องอบแห้งทั้ง 3 แบบ จากภาพที่ 58 พบว่าช่วงเวลาการอบแห้งเท่ากับ 0 min ถึง 30 min จะเป็นช่วงการเริ่มต้นของกระบวนการอบแห้ง โดยอุณหภูมิกระแสร้อน (อากาศชั้นระบายทิ้ง) ที่ออกจากเครื่องอบแห้งในช่วงนี้จะมีแนวโน้มสูงขึ้น และหลังจากนั้นอัตราความร้อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมของการอบแห้งแต่ละแบบก็จะเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยกรณีการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีอัตราความร้อนที่ปล่อยสิ่งแวดล้อมสูงสุด รองมาคือการอบแห้งแบบติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง และต่ำสุด คือ การอบแห้งแบบติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ ซึ่งแต่ละกรณีมีอัตราการปล่อยความร้อนทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมเฉลี่ยเท่ากับ 253.08 W 175.90 W และ 67.42 W ตามลำดับ



ภาพที่ 58 อัตราการปล่อยความร้อนทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมของการอบแห้งเห็ดหูหนูดำ

ค่าสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

เมื่อพิจารณาค่าสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพบว่าค่าอัตราการระเหยน้ำของเครื่องอบแห้งทุกแบบมีค่าไม่ต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาในด้านพลังงานจะพบว่าการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง และแบบเปลือกและท่อสามารถลดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งเห็ดหูหนูดำได้เท่ากับ $217.95 \text{ kJ/kg}_{\text{water}}$ และ $198.49 \text{ kJ/kg}_{\text{water}}$ ตามลำดับ ทั้งนี้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองแบบดังกล่าวยังสามารถเพิ่มค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) เท่ากับ $0.039 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kWh}$ และ $0.036 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kWh}$ ซึ่งส่งผลต่อการลดต้นทุนทางด้านพลังงานได้ถึง 4.76 % และ 4.34 % ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพของระบบอบแห้งก็จะพบว่าการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 2 แบบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดสอบได้ โดยค่าประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง แบบเปลือกและท่อ และแบบไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเท่ากับ 53.71 % 53.47 % และ 51.15 % ตามลำดับ โดยค่าพารามิเตอร์ของการทดสอบเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ กรณีอบแห้งเห็ดหูหนูดำแสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ค่าสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ กรณีอบแห้งเห็ดหูหนูดำ

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องอบแห้ง		
	Dryer	Dryer + Cross Flow	Dryer + Shell and Tube
การเพิ่มอุณหภูมิกระแสน้ำสูงสุด (°C)	-	9.60	7.40
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh)	11.76	11.20	11.25
อัตราการปล่อยความร้อนทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม (W)	253.08	175.90	67.42
อัตราการระเหยน้ำ (kg _{water} /h)	1.542	1.542	1.423
อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kJ/kg _{water})	4,576	4,358	4,378
อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (kg _{water} /kWh)	0.797	0.836	0.822
ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (%)	-	25.27	20.45
ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (%)	-	89.90	41.80
ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง (%)	51.15	53.71	53.47

คุณสมบัติทางอาหารของเห็ดหูหนูดำอบแห้ง

การศึกษาคุณสมบัติทางอาหารของเห็ดหูหนูดำที่ผ่านการอบแห้งนั้นประกอบด้วยคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ค่าการคืนตัวเมื่อนำเห็ดหูหนูดำไปแช่น้ำ และค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water Activity; aw) ภายในเห็ดหูหนูดำซึ่งจะเป็นตัวชี้วัดด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้ง โดยเห็ดหูหนูดำที่ผ่านกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 °C ด้วยเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ จะลักษณะดังภาพที่ 59 และผลการศึกษาคุณสมบัติทางอาหารของเห็ดหูหนูดำที่ผ่านอบแห้งแสดงตารางที่ 11



ภาพที่ 59 เห็ดหูหนูดำที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ

(A) Dryer (B) Dryer + Shell and Tube และ

(C) Dryer + Cross Flow

ตารางที่ 11 คุณสมบัติทางอาหารของเห็ดหูหนูดำที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ

เครื่องอบแห้ง	ค่าพารามิเตอร์สี				ค่าการคืนตัว (%)	Water Activity (aw)
	L*	a*	b*	ΔE		
ก่อนการอบแห้ง	49.36	5.53	9.39	-	-	-
Dryer	46.06	5.49	9.96	3.35	3.09	0.337
Dryer + Shell and Tube	45.95	5.37	9.19	3.42	3.70	0.354
Dryer + Cross Flow	43.35	5.42	9.15	3.01	3.76	0.351

จากตารางที่ 11 จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติสีและค่าการคืนตัวของเห็ดหูหนูดำที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งทั้ง 3 แบบมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองอบแห้งทุกกรณีได้ตั้งค่าอุณหภูมิการอบที่เท่ากันและทำการทดลองอบในวันที่มีสภาพแวดล้อมใกล้เคียงกันจึงทำให้ระยะเวลาในการอบด้วยเครื่องอบแห้งทุกแบบไม่ต่างกันส่งผลต่อสมบัติทางด้านอาหารของผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ใกล้เคียงกันด้วย เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์สีของเห็ดหูหนูดำอบแห้งที่มีความแตกต่างของสีต่ำกว่า 10 หมายถึง ผลิตภัณฑ์นั้นอยู่ในเกรดเดียวกัน ในทำนองเดียวกันค่าการคืนตัวของเห็ดหูหนูดำอบแห้งก็มีค่าต่างกันไม่เกิน 1 % หมายถึงผลิตภัณฑ์นั้นสามารถคืนตัวเมื่อแช่ในน้ำได้ไม่ต่างกัน และเมื่อพิจารณาถึงค่าปริมาณน้ำอิสระ (aw) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งจะพบว่าเห็ดหูหนูดำอบแห้งที่ผลิตจากเครื่องอบแห้งทั้ง 3 แบบมีค่าไม่เกิน 0.4 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานการผลิตอาหารอบแห้งที่กำหนดไว้ในช่วง 0.3 ถึง 0.6

การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งเห็ดหูหนูดำ

การวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โดยข้อมูลด้านเศรษฐศาสตร์ก็เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงด้วย ซึ่งผลการประหยัดรวมไปถึงระยะเวลาการคืนทุน แสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ผลประหยัดและระยะเวลาคืนทุนสำหรับการอบแห้งเห็ดหูหนูดำ

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องอบแห้ง		
	Dryer	Dryer + Cross Flow	Dryer + Shell and Tube
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh)	11.76	11.20	11.25
ผลประหยัดพลังงานไฟฟ้า (kWh/time)	-	0.56	0.51
ผลประหยัด (Baht/day)	-	11.20	10.20
ค่าใช้จ่าย ต้นทุน (Baht)	-	6,000	6,000
ระยะเวลาคืนทุน (Year)	-	2.94	3.22

จากตารางที่ 12 พบว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง และการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเดิมได้ เท่ากับ 0.56 kWh และ 0.51 kWh ตามลำดับ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 5.00% และ 4.66% หากทำการอบแห้งวันละ 2 ครั้ง ๆ ละ 6 h จะคิดเป็นผลประหยัดได้ เท่ากับ 5.60 Baht/day และ 5.10 Baht/day ตามลำดับ ดังนั้นการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองแบบจะมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 2.94 year และ 3.22 year ตามลำดับ (คำนวณจากค่าไฟฟ้า 5 Baht/kWh และระยะเวลาการอบแห้ง 365 Day/year)

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรทั้งสิ้น 2 แบบ ได้แก่ 1) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and Tube Heat Exchanger) และ 2) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง (Cross Flow Heat Exchanger) โดยผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและจำลองการทำงานของอุปกรณ์ทั้งสองดังกล่าวด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทดสอบสมมุติฐานในการออกแบบก่อนทำการสร้าง จากผลการทดสอบการทำงานในสภาวะจริงพบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางสามารถเพิ่มอุณหภูมิให้กับกระแสอากาศเย็นที่ใช้เติมเข้าสู่ระบบอบแห้งได้สูงกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับผลจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยตัวแปรที่มีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิกระแสอากาศเย็น ประสิทธิภาพ และประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองแบบ ได้แก่ ผลต่างของอุณหภูมิกระแสน้ำร้อนและกระแสน้ำเย็น กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนที่ปล่อยทิ้งจากเครื่องอบแห้งมีค่าสูงหรืออุณหภูมิของอากาศแวดล้อมมีค่าต่ำ จะทำให้ค่าประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองแบบสูงขึ้น ทั้งนี้เมื่อทดลองอบแห้งใบมะกรูดพบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางสามารถเพิ่มอุณหภูมิกระแสอากาศเย็นก่อนเข้าเครื่องอบแห้งได้สูงสุดเท่ากับ $6.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือคิดเป็น 16.44% ในขณะที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อสามารถเพิ่มอุณหภูมิดังกล่าวได้สูงสุดเท่ากับ $3.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือคิดเป็น 8.00% ในทำนองเดียวกันเมื่อทดลองอบแห้งเห็ดหูหนูดำ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางสามารถเพิ่มอุณหภูมิกระแสอากาศเย็นก่อนเข้าเครื่องอบแห้งได้สูงสุดเท่ากับ $9.60\text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือคิดเป็น 34.53% ในขณะที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อสามารถเพิ่มอุณหภูมิดังกล่าวได้สูงสุดเท่ากับ $7.40\text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือคิดเป็น 25.87% แต่ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกระแสอากาศเย็นก่อนเข้าเครื่องอบแห้งจากการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองแบบไม่ส่งผลต่อการลดระยะเวลาในการอบแห้ง กล่าวคือการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไม่มีส่วนในการเพิ่มอัตราการอบแห้ง แต่สามารถลดการใช้พลังงานในการอบแห้งได้ โดยการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง และแบบเปลือกและท่อสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้งใบมะกรูดได้เท่ากับ 0.28 kWh และ 0.23 kWh หรือคิดเป็น 7.00% และ 5.78% ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันการใช้พลังงานในการอบแห้งเห็ดหูหนูดำก็ลดลงเท่ากับ 0.56 kWh และ 0.51 kWh หรือคิดเป็น 5.01% และ 4.66% ตามลำดับ จากการลดลงของพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง (Input energy) จึงส่งผลให้

ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งเพิ่มขึ้น กล่าวคือการติดตั้งเครื่องอบแห้งแบบไหลขวางจะเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องอบแห้งได้เท่ากับ 7.54 % ในกรณีอบแห้งใบมะกรูดและ 5.00 % ในกรณีอบแห้งเห็ดหูหนูดำ ในทำนองเดียวกันการติดตั้งเครื่องอบแห้งแบบเปลือกและท่อจะเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องอบแห้งในกรณีอบแห้งใบมะกรูดและเห็ดหูหนูดำได้เท่ากับ 5.81 % และ 4.54 % ตามลำดับ จากผลการทดสอบดังกล่าวจึงสามารถสรุปได้ว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบเปลือกและท่อเล็กน้อยในทุกค่าพารามิเตอร์ โดยอุปกรณ์ทั้งสองชนิดสามารถลดการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรระดับกิ่งอุตสาหกรรมที่ใช้ในการทดสอบได้จริงซึ่งบรรลุตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย อีกทั้งยังช่วยลดปัญหาโลกร้อนจากการปล่อยความร้อนทิ้งสู่บรรยากาศได้อีกด้วย

ข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยเสนอให้ปรับเปลี่ยนวัสดุที่ใช้สร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากโลหะสแตนเลส (Stainless steel) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ต่ำเป็นโลหะกลุ่มอื่นที่ผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรมอาหาร เช่น อลูมิเนียม (Aluminium) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงกว่า

บรรณานุกรม

- Amirhossein A., Shahriar K. and Gholamreza C. 2018. Experimental analysis of a rotary Heat Exchanger for waste Heat Recovery from the exhaust gas of dryer. **Applied Thermal Engineering 2018. 138, 668-674.**
- BCS Incorporated. 2008. Waste heat recovery. **Technology and opportunities in U.S Industry, march 2008.**
- Cengel Y. A. 2003. Heat Transfer: A Practical Approach. **2nd ed. Singapore: McGraw-Hill International Edition.**
- Feng Y., Xiugan Y. and Guiping L. 2003. Waste Heat Recovery using heat pipe Heat Exchanger for heating automobile using exhaust gas. **Applied Thermal Engineering 2003. 23, 367-37.**
- Hanning L., Qun C., Xiaohui Z., Karen F., Vida S. and Jim S. 2015. Evaporation of a Biomass Drying Process Using Waste Heat From Process Industries: A Case Study. **Department of Chemical and Biological Engineering, University of Sheffield.**
- Hussam J., Navid K., Sulaiman A., Bertrand D., Amisha C. and Savvas A. 2018. Waste Heat Recovery technologies and application. **Thermal science and engineering progress 2018.6, 268-289.**
- Irfan A, Vohra K, Azim A and Saxena B. 2013. Modern Heat Exchanger-A review. **International journal of engineering research and technology. 2278-0181.**
- Kwanchai K. and Atipong N. 2005. Application of Cross Flow Heat Exchanger Modified from Automobile Air-conditioning Condenser : A Case Study of Waste Heat Recovery from Hot Water for Air Preheating. **Naresuan University Journal 2005.**
- Lianzheng X., Guoyuan M., Feng Z. and Lei W. 2019. Operation characteristics of air-air heat pipe inserted plate Heat Exchanger for heat recovery. **Energy and Buildings 2019. 185, 66-75.**
- M.S. SoÈ ylemez. 2000. On the optimum heat exchanger sizing for heat recovery. **Energy Conversion & Management 41 (2000) 1419-1427.**

- NizoNizovtsev M., Borodulin V., Letushko V. and Zakharov A. 2016. Analysis of the efficiency of air-to-air Heat Exchanger with a periodic change in the flow direction. **Applied Thermal Engineering** 2016. **93**, 113-121.
- Noie-Baghbani H. and Majideian R. 2000. Waste Heat Recovery using heat pipe Heat Exchanger (HPHE) for surgery rooms in hospitals. **Applied Thermal Engineering**. 2000. **20**, 1271-1282.
- Qifei J. and Lizhong L. 2018. The improvement on efficiency and drying performance of a domestic venting tumble clothes dryer by using a heat pipe recovery Heat Exchanger. **Applied Thermal Engineering**. **136 (2018) 560-567**. **13 (1)**, 13-23.
- Su-Sheng M., Ching-Yi T., You-Ren J., Tai-Her Y. and Sih-Li C. 2018. Utilization of waste heat of energy conservation in domestic dryers. **Energy**. 2018. **138**, 668-674.
- Wang J., Brown C. and Cleland D. 2018. Heat pump Heat Recovery options for food industry dryers. **International Journal of Refrigeration** 2018. **86**, 48-55.
- Whalley R. and Ebrahimi K. 2018. Heat Exchanger dynamic analysis. **Applied Mathematical Modelling** 2018. **62**, 38-50.
- Xiaoqu H., Ming L., Jinshi W., Junjie Y., Jiping L. and Feng X. 2014. Simulation study on lignite-fired power system integrated with flue gas drying and waste heat recovery – performances under variable power loads coupled with off-design parameters. **Energy** 2014. **76**, 406-418.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2561. คู่มือผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (โรงงาน, การอนุรักษ์พลังงานโดยนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่) บทที่ 4 หน้า 2-6.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2004. การอนุรักษ์พลังงานในระบบอื่น ๆ. ตำราฝึกอบรมผู้รับผิดชอบด้านพลังงานอาวุโส (ผอส.) ด้านความร้อน กระทรวงพลังงาน. 2562. การใช้พลังงานไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทย พ.ศ. 2556-2561.
- กลุ่มวิจัยเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี. 2560. คู่มือการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่. หน้า 1-9.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2561. รายงานปริมาณการผลิตไฟฟ้าและปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในประเทศไทย 2561.
- การอบแห้ง. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก <https://ienergyguru.com> (15 พฤษภาคม 2562).

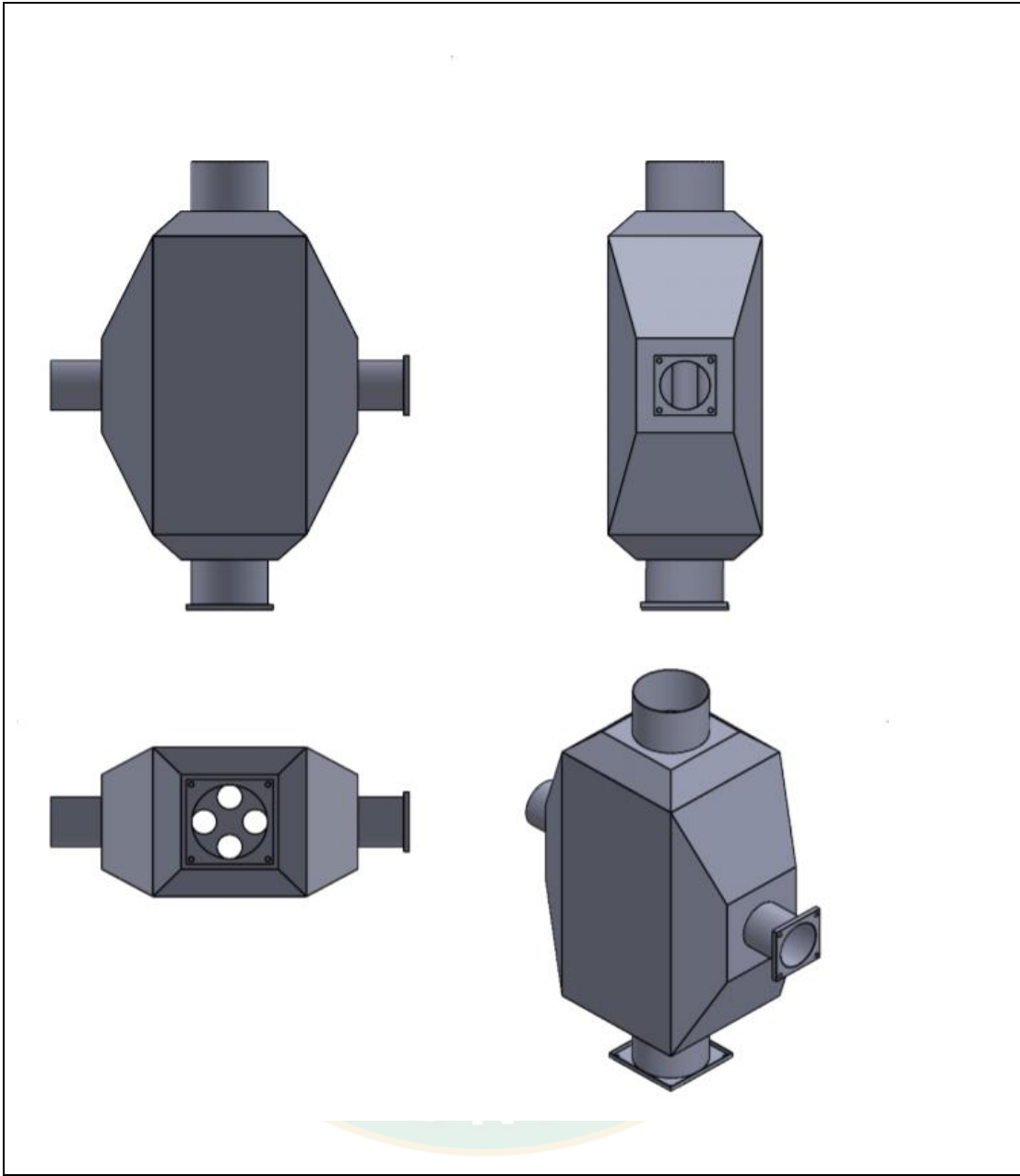
- กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์. 2553. การอบแห้งสมุนไพรด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดไกล. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก.วิทยานิพนธ์ 2554-07-22.
- ข้อมูลเฉพาะของเทอร์โมคัปเปิลชนิด K. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก <http://www.pspstech.co.th/thermocouple-16698.page>. (2 มีนาคม 2563).
- ข้อมูลเฉพาะเครื่องวัดความเร็วลม ใบพัดแยก รุ่น WM-04. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก <https://www.richmoto.net/product/wm04-anemometer>. (20 มีนาคม 2563).
- จตุพร กุลละวณิชวัฒน์. 2544. การออกแบบโครงสร้างการควบคุมของช่างงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน. [งานวิจัย]. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เจนจิรา เปี่ยมดี. 2545. การออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ในกระบวนการอบแห้งขนม. วิทยานิพนธ์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ใจทิพย์ วานิชชัง. 2550. การศึกษาการเพิ่มศักยภาพการทำงานของเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบไหลผสม. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก.
- นัฐพร ไชยญาติ. 2560. การออกแบบระบบพลังงานทดแทน (Renewable Energy System Design). วิทยาลัยพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 386 หน้า. พิมพ์ครั้งที่ 3 มิถุนายน พ.ศ. 2560.
- บัณฑิต กฤตาคม. 2556. แบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อน. คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.
- ผดุงศักดิ์ วานิชชัง. 2551. การศึกษาการวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชสำหรับเกษตรกร. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก.
- ยงยุทธ เครือวงษา. 2551. การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดกะทัดรัดเพื่อนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง. [งานวิจัย]. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- ยงยุทธ เครือวงษา. 2551. การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดกะทัดรัดเพื่อนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง. [งานวิจัย]. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- ยรรยง ศรีสม. 2549. การอบแห้งธัญพืช. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2549-05-15.
- วรวิมล มั่นสกุล. 2544. การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์อุ่นอากาศด้วยไอเสีย สำหรับเตาเผาอุตสาหกรรม. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย:กรุงเทพฯ. ISBN 974-03-1384-1.


- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก <https://th.wikipedia.org/wiki/>. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน. (1 มิถุนายน 2562).
- วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล. 2550. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรม ฉบับปรับปรุงใหม่. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักงานนโยบายและแผนพัฒนาพลังงาน. 2562. คู่มือแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย (Power Development Plan : PDP).
- หลักการทํางานของเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple). [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก <https://www.primusthai.com/primus/Knowledge/info?ID=131>. (2 มีนาคม 2563).
- หลักการทํางานของระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ IPD. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก <https://www.primusthai.com/primus/Knowledge/info?ID=142>. (23 มีนาคม 2563).
- อนุสรณ์ สุขเกษม. 2550. การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของคลิบแท่งกระบอก. วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล.
- อุทัย ผ่องรัศมี, เสนีย์ ศิริไชย และสำรวจ อินแบน. 2556. การนำความร้อนที่งกลับมาใช้ประโยชน์สำหรับหม้อน้ำขนาดเล็ก. มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรีและมหาวิทยาลัยนครพนม.วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา.18 (2556) 2 : 203-214.



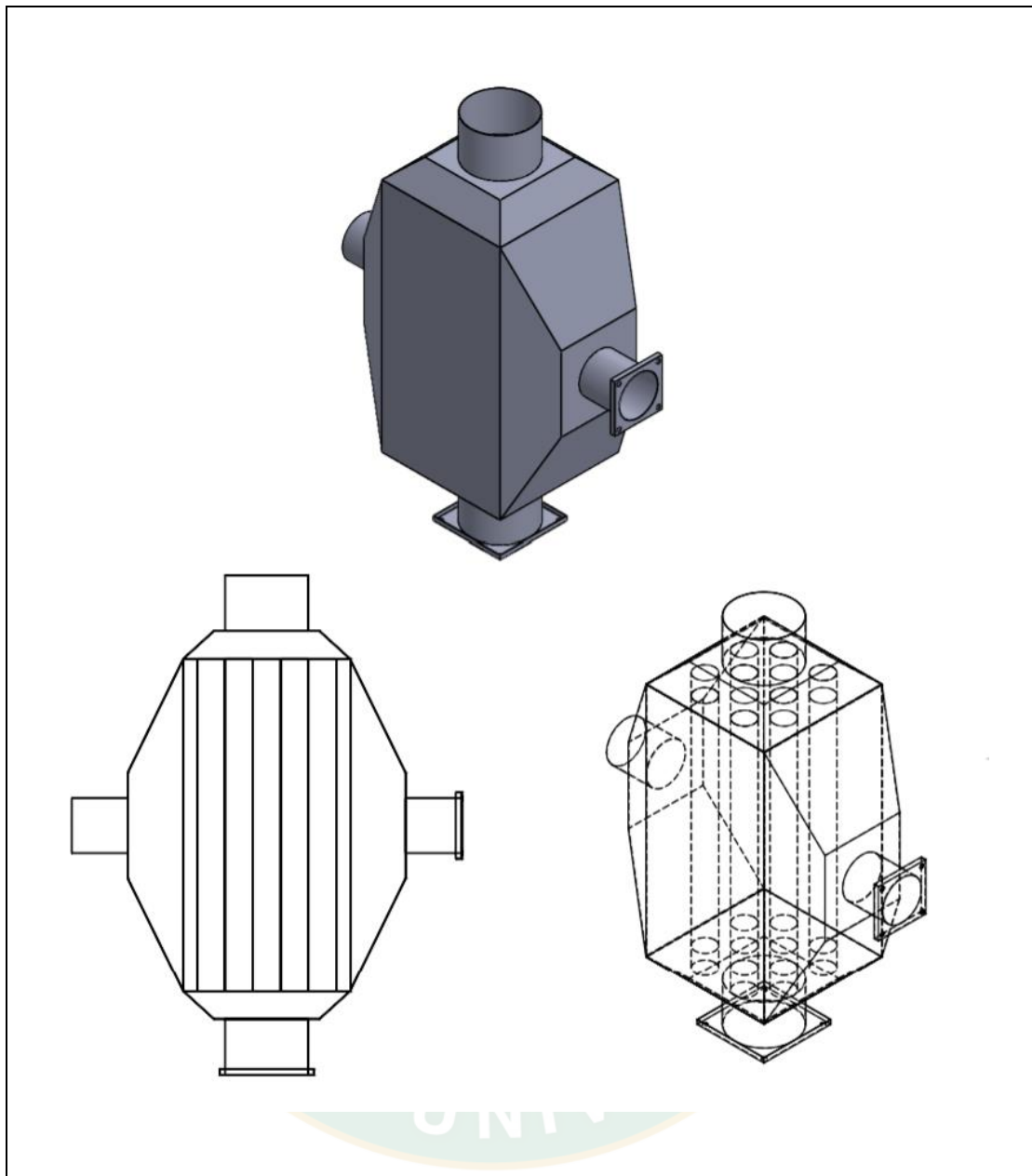


ภาคผนวก ก
แบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



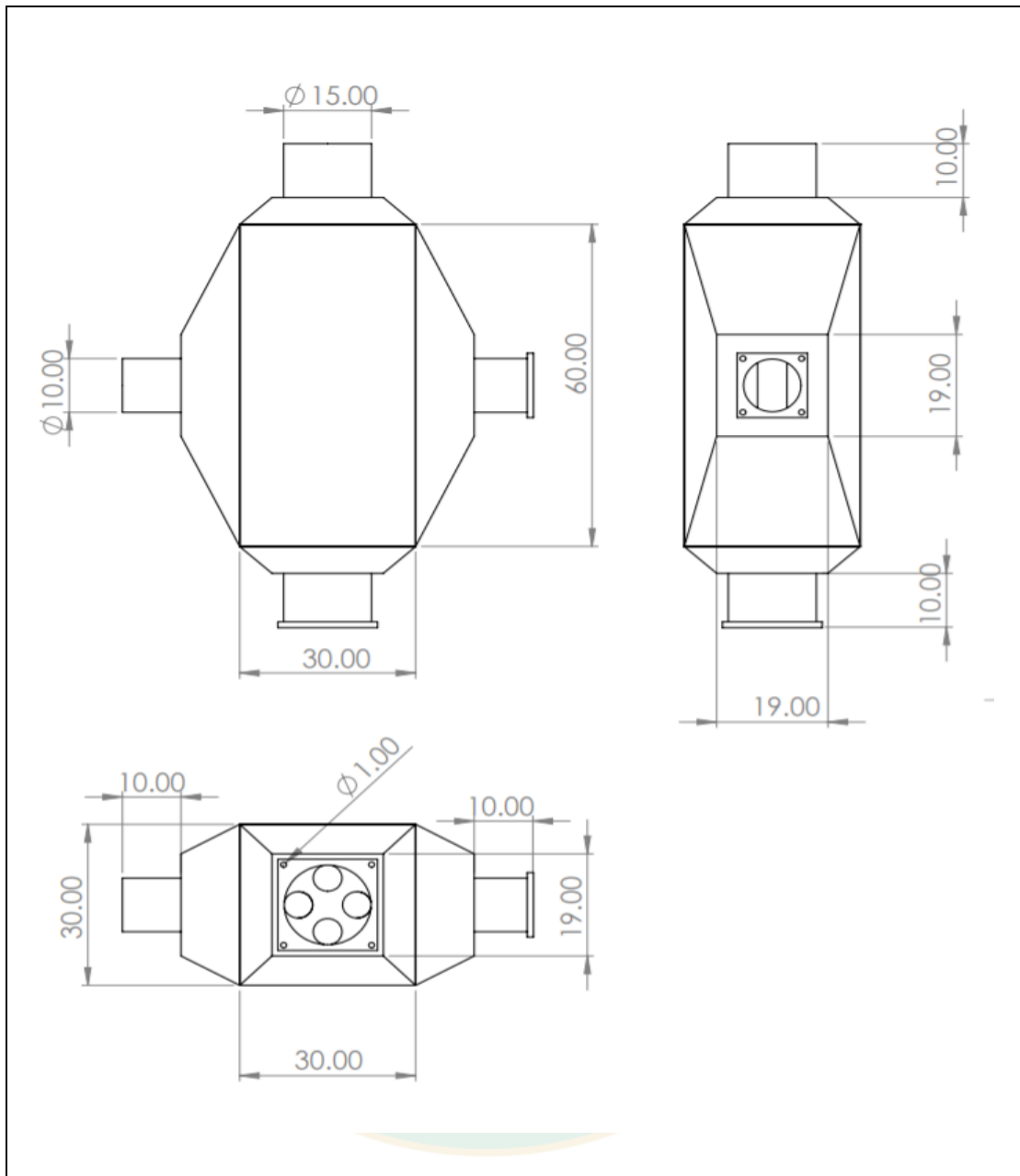
20/10/62	วัสดุ สแตนเลส	ขนาด A4	หน่วย cm
ผู้เขียนแบบ	นาย ยงยุทธ ใต้เงาสน		วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ตรวจแบบ	ผศ.ดร.ปริญ คงกระพันธ์		
ผู้ออกแบบ	นาย ยงยุทธ ใต้เงาสน		
ชื่อชิ้นงาน	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง แบบไหลขวาง	มาตราส่วน 1:10	หมายเลขแบบ 1/11

ภาพผนวกที่ 1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง



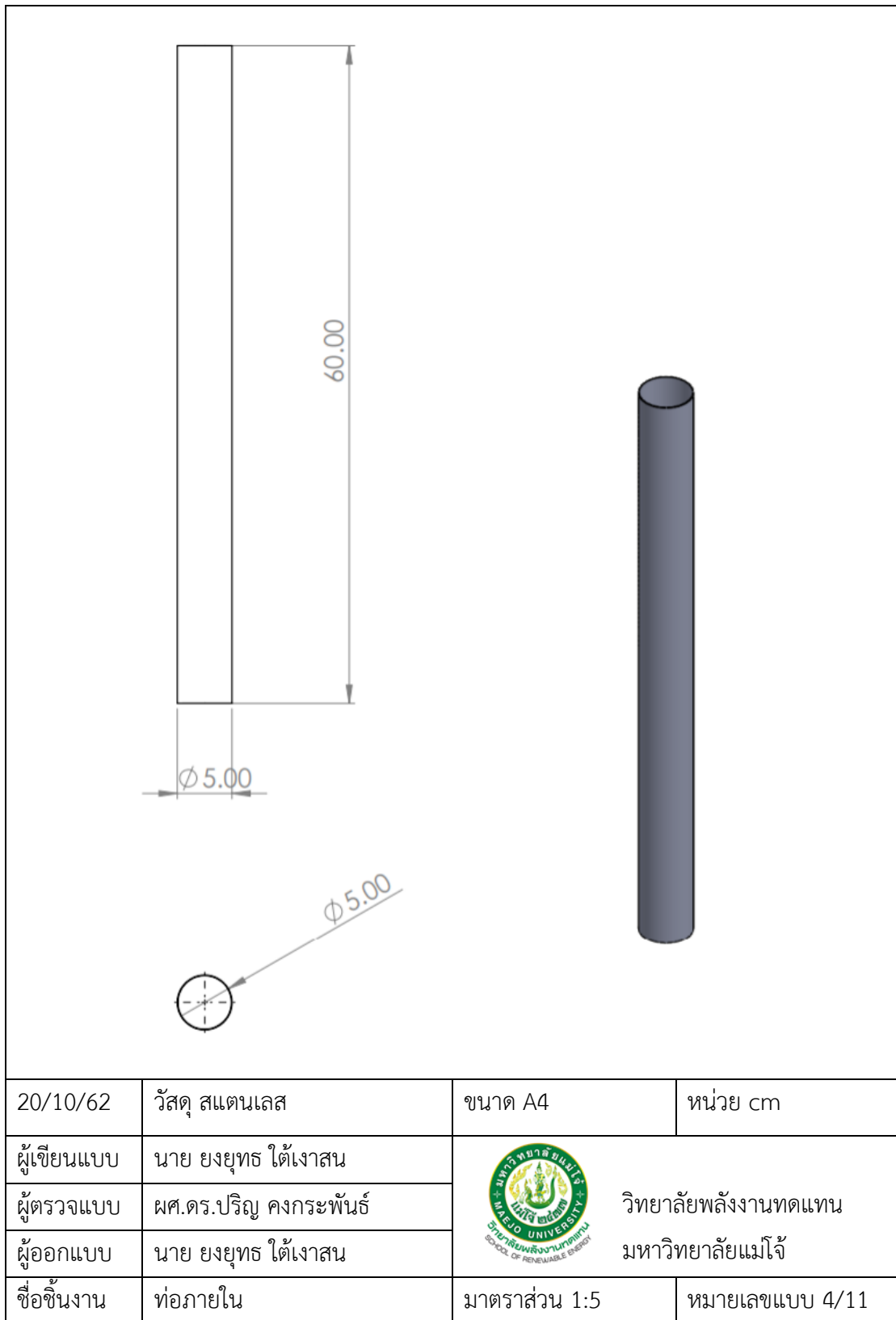
20/10/62	วัสดุ สแตนเลส	ขนาด A4	หน่วย cm
ผู้เขียนแบบ	นาย ยงยุทธ ได้เงาสน	 วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	
ผู้ตรวจแบบ	ผศ.ดร.ปริญ คงกระพันธ์		
ผู้ออกแบบ	นาย ยงยุทธ ได้เงาสน		
ชื่อชิ้นงาน	ลักษณะภาพฉายภายในเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อน	มาตราส่วน 1:10	หมายเลขแบบ 2/11

ภาพผนวกที่ 2 ลักษณะภาพฉายภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

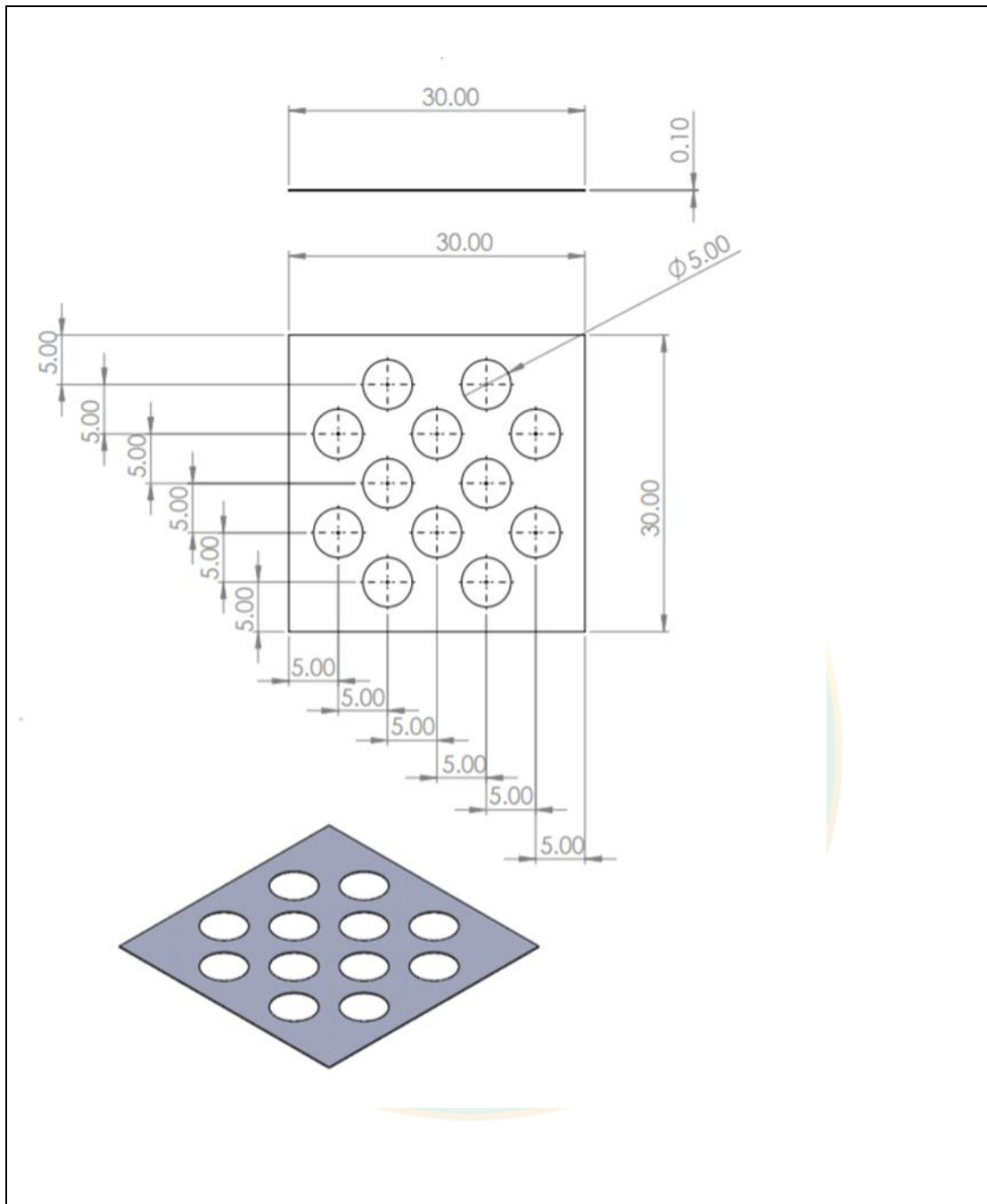


20/10/62	วัสดุ สแตนเลส	ขนาด A4	หน่วย cm
ผู้เขียนแบบ	นาย ยงยุทธ ไต้เงาสน	 วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	
ผู้ตรวจแบบ	ผศ.ดร.ปริญ คงกระพันธ์		
ผู้ออกแบบ	นาย ยงยุทธ ไต้เงาสน		
ชื่อชิ้นงาน	แบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง	มาตราส่วน 1:10	หมายเลขแบบ 3/11

ภาพผนวกที่ 3 แบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง

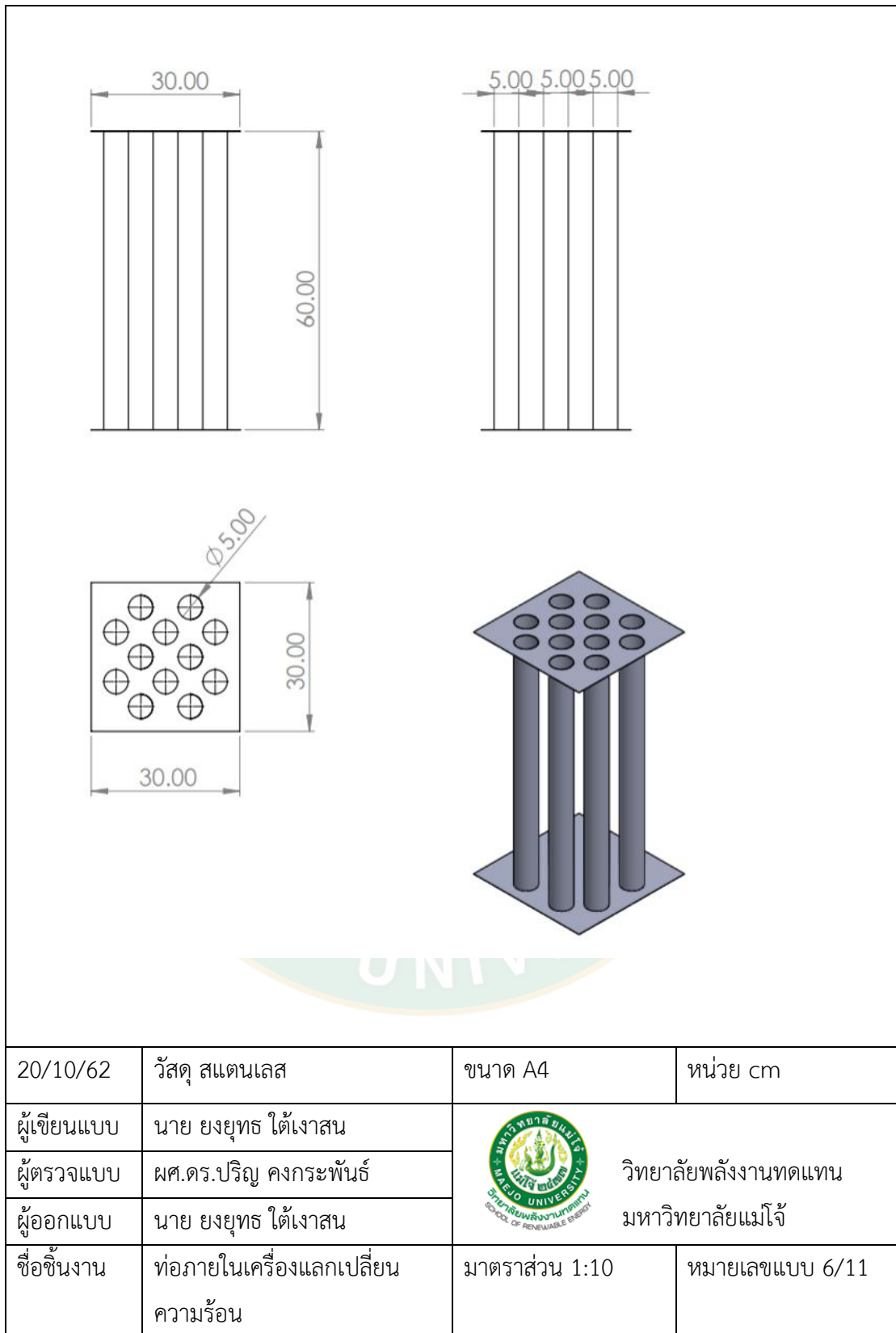


ภาพผนวกที่ 4 ท่อภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง

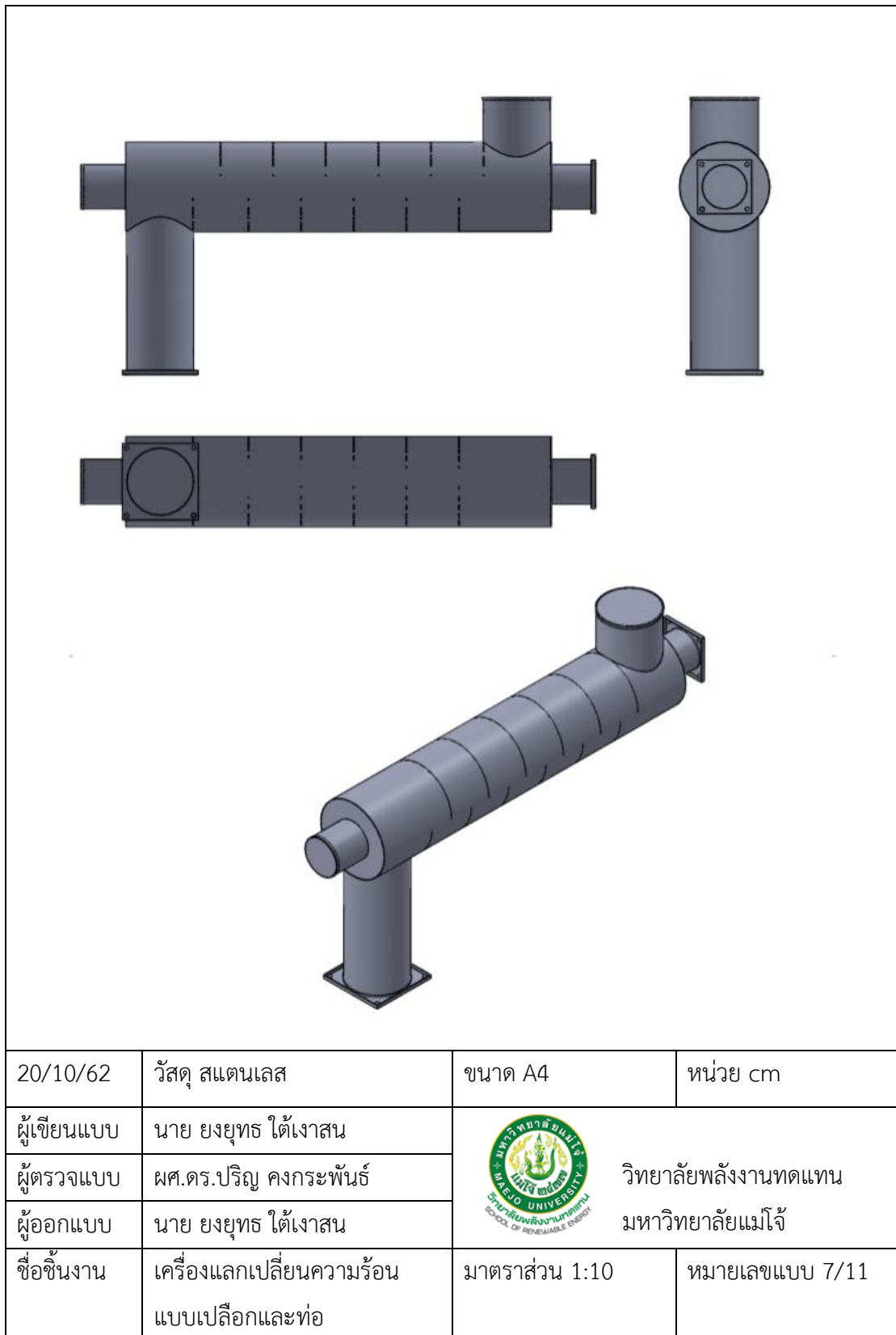


20/10/62	วัสดุ สแตนเลส	ขนาด A4	หน่วย cm
ผู้เขียนแบบ	นาย ยงยุทธ ได้เงาสน	 วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	
ผู้ตรวจแบบ	ผศ.ดร.ปริญ คงกระพันธ์		
ผู้ออกแบบ	นาย ยงยุทธ ได้เงาสน		
ชื่อชิ้นงาน	ฝาท่อ	มาตราส่วน 1:5	หมายเลขแบบ 5/11

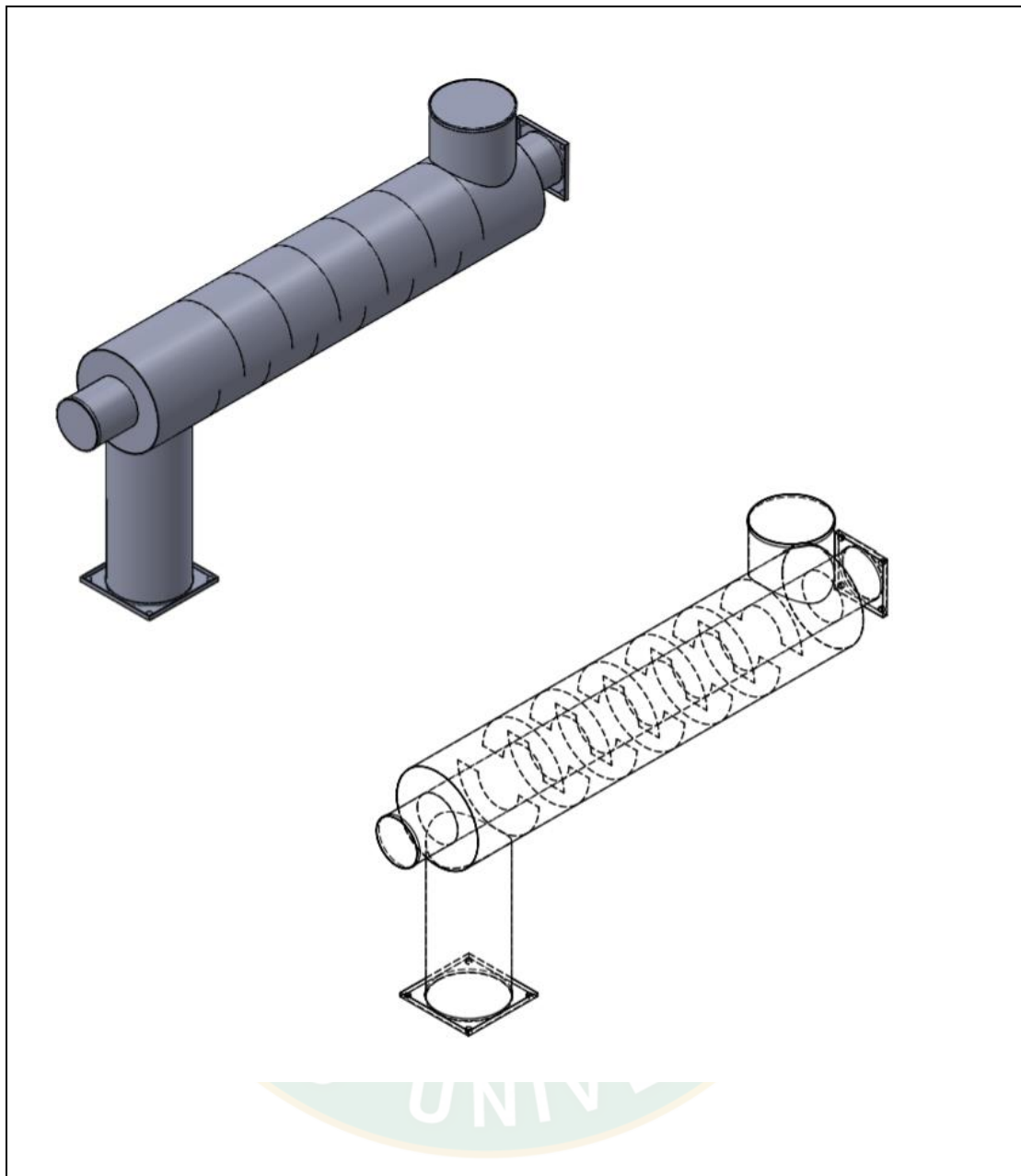
ภาพผนวกที่ 5 ฝาท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง



ภาพผนวกที่ 6 ท่อภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง

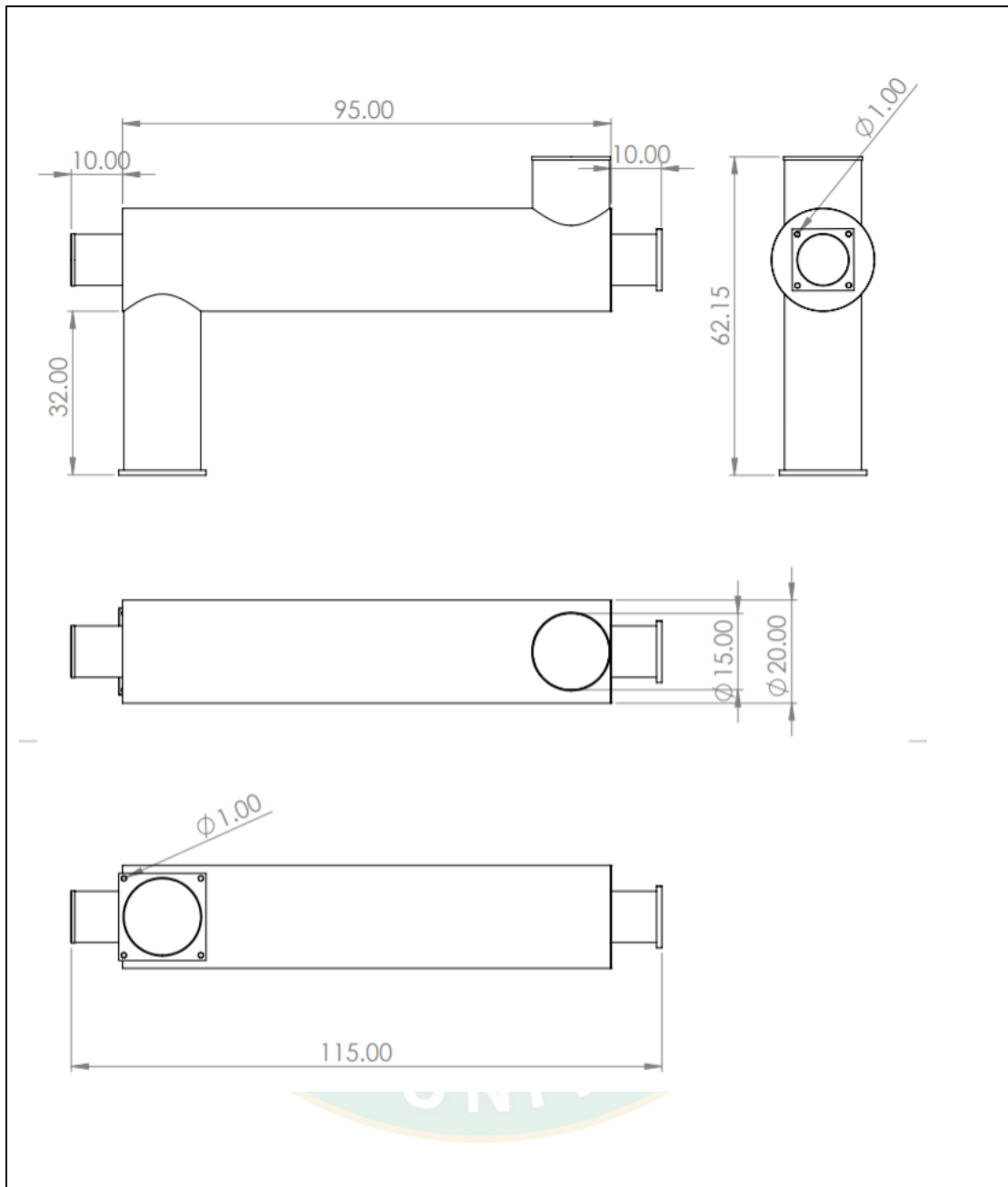


ภาพผนวกที่ 7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ



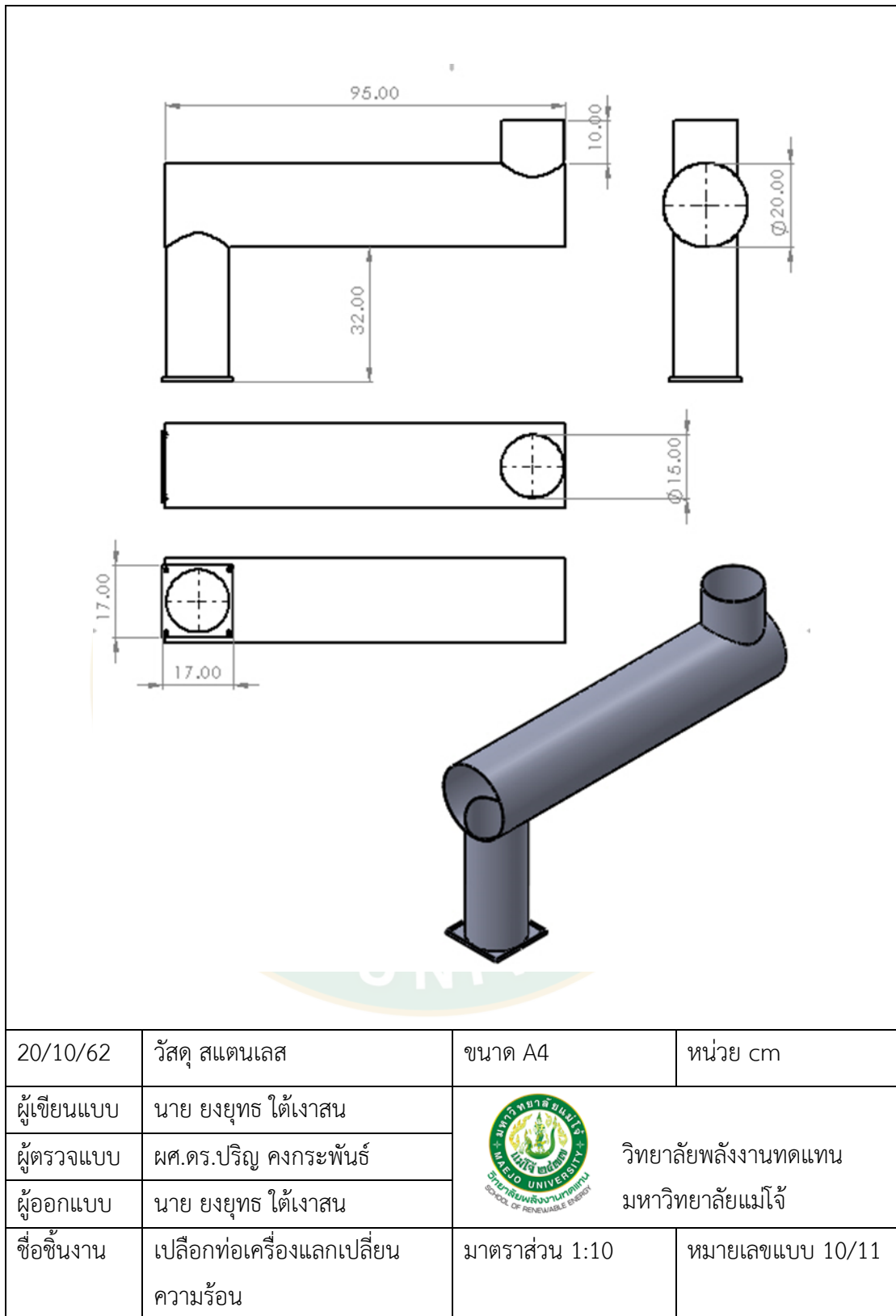
20/10/62	วัสดุ สแตนเลส	ขนาด A4	หน่วย cm
ผู้เขียนแบบ	นาย ยงยุทธ ไต้เงาสน	 วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	
ผู้ตรวจแบบ	ผศ.ดร.ปริญ คงกระพันธ์		
ผู้ออกแบบ	นาย ยงยุทธ ไต้เงาสน		
ชื่อชิ้นงาน	ลักษณะภาพฉายภายในเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อน	มาตราส่วน 1:10	หมายเลขแบบ 8/11

ภาพผนวกที่ 8 ลักษณะภาพฉายภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

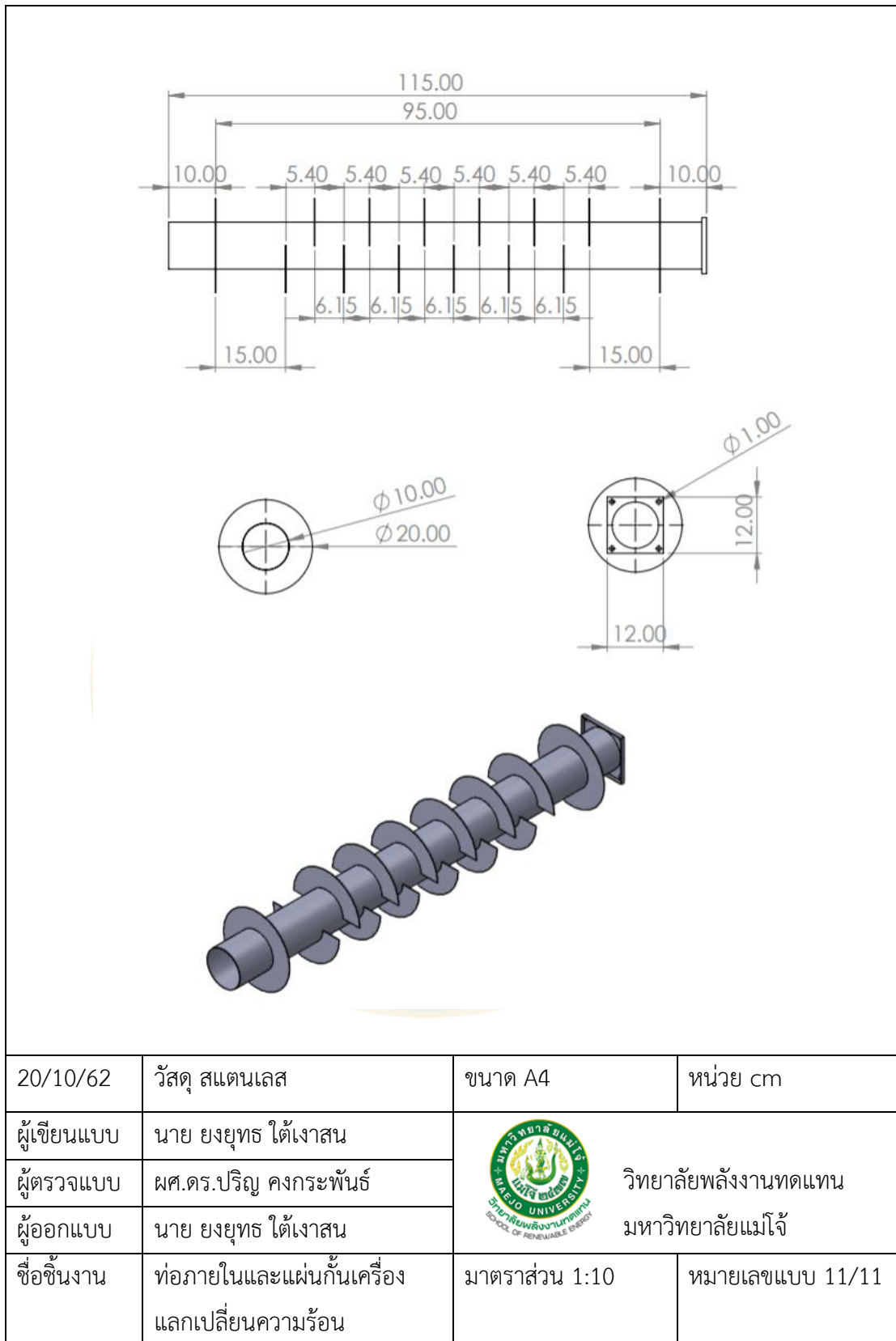


20/10/62	วัสดุ สแตนเลส	ขนาด A4	หน่วย cm
ผู้เขียนแบบ	นาย ยงยุทธ ไต้เงาสน	 วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	
ผู้ตรวจแบบ	ผศ.ดร.ปรีญา คงกระพันธ์		
ผู้ออกแบบ	นาย ยงยุทธ ไต้เงาสน		
ชื่อชิ้นงาน	แบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ	มาตราส่วน 1:50	หมายเลขแบบ 9/11

ภาพผนวกที่ 9 แบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ



ภาพผนวกที่ 10 เปลือกท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ



ภาพผนวกที่ 11 ท่อภายในและแผ่นกั้นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ



1) ตัวอย่างการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกรณีอบแห้งใบมะกรูด

1.1) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง (Cross flow heat exchanger)

อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน $T_{h,i} = 54.30\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิร้อนขาออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน $T_{h,o} = 46.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิอากาศเย็นขาเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน $T_{c,i} = 35.30\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิอากาศเย็นขาออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน $T_{c,o} = 41.30\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะสามารถคำนวณค่าประสิทธิผลและค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดังนี้

- ค่าประสิทธิผล (Effectiveness) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$\varepsilon = \frac{(T_{c,o} - T_{c,i})}{(T_{h,i} - T_{c,i})} \times 100\%$$

$$\varepsilon = \frac{41.30\text{ }^{\circ}\text{C} - 35.30\text{ }^{\circ}\text{C}}{54.30\text{ }^{\circ}\text{C} - 35.30\text{ }^{\circ}\text{C}} \times 100\% = 31.58\%$$

- ค่าประสิทธิภาพ (Efficiency) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$\eta = \frac{(T_{c,o} - T_{c,i})}{(T_{h,i} - T_{h,o})}$$

$$\eta = \frac{41.30\text{ }^{\circ}\text{C} - 35.30\text{ }^{\circ}\text{C}}{54.30\text{ }^{\circ}\text{C} - 46.32\text{ }^{\circ}\text{C}} \times 100\% = 75.19\%$$

1.2) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and tube heat exchanger)

อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน $T_{h,i} = 54.57\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิร้อนขาออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน $T_{h,o} = 49.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิอากาศเย็นขาเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน $T_{c,i} = 36.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิอากาศเย็นขาออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน $T_{c,o} = 39.22\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะสามารถคำนวณค่าประสิทธิผลและค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดังนี้

- ค่าประสิทธิผล (Effectiveness) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$\varepsilon = \frac{39.22\text{ }^{\circ}\text{C} - 36.15\text{ }^{\circ}\text{C}}{54.57\text{ }^{\circ}\text{C} - 36.15\text{ }^{\circ}\text{C}} \times 100\% = 16.67\%$$

- ค่าประสิทธิภาพ (Efficiency) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$\eta = \frac{39.22^{\circ}\text{C} - 36.15^{\circ}\text{C}}{54.57^{\circ}\text{C} - 49.32^{\circ}\text{C}} \times 100 \% = 58.48 \%$$

2) ตัวอย่างการคำนวณที่เกี่ยวกับการทดลองอบแห้งใบมะกรูด
กรณีใช้เครื่องอบแห้งที่ไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

2.1) อัตราการอบแห้ง (Drying rate)

การอบแห้งใบมะกรูดที่มีน้ำหนักเริ่มต้นเท่ากับ 4 kg จนเหลือน้ำหนักสุดท้ายเท่ากับ 1.53 kg ใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 6 h ดังนั้นอัตราการอบแห้งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Drying rate} &= m_w / t \\ &= (4 \text{ kg} - 1.53 \text{ kg}) / 6 \text{ h} \\ &= (2.47 \text{ kg}) / 6 \text{ h} \\ &= 0.412 \text{ kg}_{\text{Water}}/\text{h} \end{aligned}$$

2.2) พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง

การอบแห้งใบมะกรูดใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 4.00 kWh ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Electrical Energy} &= 4.00 \text{ kWh} \times 3600 \text{ s} \\ &= 14,400 \text{ kJ} \end{aligned}$$

2.3) อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

$$\begin{aligned} \text{SEC} &= \frac{\text{ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง}}{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง}} \\ &= 14,400 \text{ kJ} / 2.47 \text{ kg} \\ &= 5,829.96 \text{ kJ/kg}_{\text{Water}} \end{aligned}$$

2.4) อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific Moisture Extraction rate, SMER)

$$\begin{aligned} \text{SMER} &= \frac{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง}}{\text{ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง}} \\ &= 2.47 \text{ kg}_{\text{Water}} / 4.00 \text{ kWh} \\ &= 0.62 \text{ kg}_{\text{Water}} / \text{kWh} \end{aligned}$$

2.5) ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง (η_{dryer})

ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งนั้นสามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์และพลังงานที่จ่ายให้กับเครื่องอบแห้ง โดยค่าประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \eta_{\text{dryer}} &= \frac{Q_{\text{output}}}{Q_{\text{input}}} \times 100\% \\ \eta_{\text{dryer}} &= \frac{M_{\text{water}} h_{fg}}{Q_{\text{input}}} \times 100\% \end{aligned}$$

2.5.1) พลังงานที่จ่ายให้กับเครื่องอบแห้ง

ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเครื่องอบแห้งที่ไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการอบแห้งใบมะกรูดมีค่าเท่ากับ 4.00 kWh พลังงานที่จ่ายให้กับเครื่องอบแห้ง (Q_{input}) คำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Q_{\text{input}} &= 4.00 \text{ kWh} \times 3,600 \text{ s/h} \\ &= 14,400 \text{ kJ} \end{aligned}$$

2.5.2) พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์

การอบแห้งใบมะกรูดที่มีน้ำหนักเริ่มต้นเท่ากับ 4 kg จนเหลือน้ำหนักสุดท้ายเท่ากับ 1.53 kg โดยที่ใช้อุณหภูมิ 55 °C ซึ่งมีความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (h_{fg}) ณ อุณหภูมิดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 2,369.80 kJ/kg ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{output}} &= M_{\text{water}} \times h_{fg} \\
 &= 2.47 \text{ kg} \times 2,369.80 \text{ kJ/kg} \\
 &= 5,853.41 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

2.5.3) ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งทที่ไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$\begin{aligned}
 \eta_{\text{dryer}} &= (5,853.41 \text{ kJ}/14,400 \text{ kJ}) \times 100\% \\
 &= 40.64 \%
 \end{aligned}$$

2.6) การคำนวณค่าสีของผลิตภัณฑ์

ตัวอย่างจากการตรวจวัด พบว่าเห็ดหูหนูดำอบแห้งแล้ว มีค่า $L_1^* = 46.06$, $a_1^* = 5.49$ และ $b_1^* = 9.96$ โดยที่เห็ดหูหนูดำสด มีค่า $L_2^* = 49.36$, $a_2^* = 5.53$ และ $b_2^* = 9.39$ สามารถคำนวณหาผลต่างของสีโบบะกรูด ดังนี้

เมื่อ

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

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

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

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

$$\Delta E = 3.35$$

3) การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์

3.1) ต้นทุนทางด้านพลังงานและผลประหยัด

การคำนวณหาต้นทุนทางไฟฟ้าเพื่อนำมาเปรียบเทียบในการอบแห้งแต่ละครั้ง โดยในการคำนวณจะกำหนดต้นทุนค่าไฟฟ้าอยู่ที่ 5 Baht/kWh สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{ค่าไฟฟ้า} = \text{จำนวนพลังงานไฟฟ้า} \times \text{ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย}$$

ตัวอย่าง การคำนวณเมื่ออบแห้งแบบไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้พลังงานไฟฟ้าไป 4.00 kWh

$$\begin{aligned}\text{ค่าไฟฟ้า} &= 4.00 \text{ kWh} \times 5 \text{ Baht/kWh.time} \times 2 \text{ time/day} \\ &= 40.0 \text{ Baht/day}\end{aligned}$$

ตัวอย่าง การคำนวณเมื่ออบแห้งแบบติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง โดยใช้พลังงานไฟฟ้าไป 3.72 kWh

$$\begin{aligned}\text{ค่าไฟฟ้า} &= 3.72 \text{ kWh} \times 5 \text{ Baht/kWh.time} \times 2 \text{ time/day} \\ &= 37.2 \text{ Baht/day}\end{aligned}$$

ดังนั้นการคำนวณหาผลประโยชน์ของการใช้พลังงานจะสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{ผลประโยชน์} &= \text{ค่าใช้จ่ายก่อน} - \text{ค่าใช้จ่ายหลัง} \\ &= 40.0 \text{ Baht/day} - 37.2 \text{ Baht/day} \\ &= 2.8 \text{ Baht/day}\end{aligned}$$

3.2) ระยะเวลาคืนทุน

การสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางใช้เงินลงทุนประมาณ 6,000 บาท ดังนั้น ระยะเวลาคืนทุนของการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{เมื่อ} \quad \text{ระยะเวลาคืนทุน} &= \text{เงินลงทุน} / \text{ผลประโยชน์รายปี} \\ &= 6,000 \text{ Baht} / (2.8 \text{ Baht/day} \times 365 \text{ day/year}) \\ &= 5.87 \text{ year}\end{aligned}$$

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นาย ยงยุทธ ใต้เงาสน
เกิดเมื่อ	9 พฤษภาคม 2538
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนบ้านยางครก สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลาย โรงเรียนบ้านอมก๋อยวิทยาคม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วท.บ. (สาขาพลังงานทดแทน) มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ประวัติการทำงาน	-

