การควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกด้วยท่อความร้อนแบบชั้นวงรอบปิด

Temperature Controller of Paddy Rice with Closed-Loop Pulsating Heat Pipes

นายคเณศ มูลเทพ

นายณัฐพล รัตนะ

นายเอกชัย อักษรผดุงกุล

15506645

ส.

ค245ป

2553

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2553

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 20 มิ.ย. 2554
เลขทะเบียน 15506645
เลขเรียกหนังสือ ส.
มหาวิทยาลัยนเรศวร ค245ป 2553

ใบรับรองโครงงาน

หัวข้อโครงงาน : การควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ
(Temperature Controller of Paddy Rice with Closed-Loop Pulsating Heat Pipes)

ผู้ดำเนินโครงงาน : นายคเณศ มูลเทพ รหัส 50364010
นายณัฐพล รัตนะ รหัส 50364065
นายเอกชัยอักษร ผดุงกุล รหัส 50364409

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา : 2553

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการการสอบโครงงาน

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมศก วิไลพล)

..... กรรมการ
(อาจารย์นพรัตน์ สีหะวงษ์)

หัวข้อโครงงาน	:	การควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	
ผู้ดำเนินโครงงาน	:	นายคเณศ มูลเทพ	รหัส 50364010
		นายณัฐพล รัตนะ	รหัส 50364065
	:	นายเอกชัย อักษรผดุงกุล	รหัส 50364409
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน	:	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์	
ภาควิชา	:	วิศวกรรมเครื่องกล	
ปีการศึกษา	:	2553	

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างระบบระบายความร้อนของข้าวเปลือกขนาด 500 กิโลกรัม ที่บรรจุอยู่ในถังทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.5 เมตร และมีความสูง 1 เมตร โดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบเป็นตัวระบายความร้อน โดยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ใช้ทำจากท่อคาปิลลารี่ทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลายภายในเท่ากับ 1.4 มิลลิเมตร มีส่วนทำระเหยยาวเท่ากับ 0.5 เมตร มีส่วนควบแน่นยาวเท่ากับ 1 เมตร และมี R-134a เป็นสารทำงาน โดยมีอัตราส่วนการเติมที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรภายในท่อทั้งหมด โดยมีการเปรียบเทียบอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่มีการติดตั้งระบบระบายความร้อนกับข้าวเปลือกที่ไม่มีการระบายความร้อน จากการศึกษาพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ไม่มีระบบระบายความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไป 60 ชั่วโมง ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 48 องศาเซลเซียส และมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นอยู่ที่ 21 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ซึ่งอุณหภูมิที่สูงขึ้นนั้นจะทำให้ข้าวเปลือกเกิดการเสื่อมคุณภาพอย่างรวดเร็ว ขณะที่ข้าวเปลือกที่มีระบบระบายความร้อนโดยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบเมื่อเริ่มการเก็บอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเมื่อเวลาการเก็บผ่านไป 48 ชั่วโมง อุณหภูมิจะเริ่มคงที่และเริ่มลดลงเล็กน้อย และเมื่อเวลาผ่านไป 126 ชั่วโมง ข้าวเปลือกจะมีอุณหภูมิเท่ากับ 44 องศาเซลเซียสและมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นอยู่ที่ 16 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ซึ่งสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 59 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบสามารถระบายความร้อนที่เกิดขึ้นในข้าวเปลือกได้ แต่เนื่องจากโดยทั่วไปการเก็บรักษาข้าวเปลือกจะต้องมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 28-29 องศาเซลเซียส จึงจะสามารถรักษาคุณภาพของข้าวเปลือกไว้ได้ ดังนั้นจึงจะต้องมีการพัฒนาและศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบต่อไป

Project Title	:	Temperature Controller of Paddy Rice with Closed-Loop Pulsating Heat Pipes		
Name	:	Mr. Kanate Moonthep	Code	50364010
		Mr. Nuttapol Rattana	Code	50364065
	:	Mr. Aekchai Auksornphadungkul	Code	50364409
Project Adviser	:	Asst. Prof. Dr. Piyanun Charoensawan		
Department	:	Mechanical Engineering		
Academic Year	:	2010		

Abstract

This project aims to construct the cooling system of 500 kg paddy rice that was contained in the cylindrical bin with 1.5 m diameter and 1 m high by using the close loop pulsating heat pipes (CLPHP). CLPHP was made of a copper capillary tube with 1.4 mm inside diameter, 0.5 m evaporator length and 1 m condenser length and the used working fluid was R-134a with 50% filling ratio of total internal tube volume. The temperature distribution of paddy cooled by CLPHP was compared to that without cooling system. The temperature of paddy rice without cooling clearly increased along the time and at 60 hrs the paddy rice temperature was about 48°C and its moisture content was 21% wet basis. At this high temperature, the paddy rice was devalued dramatically. For paddy with cooled by CLPHP, the temperature of paddy was continuously higher until 48 hrs and after that it was stabled and became lower. At 126 hrs the paddy rice temperature with cooling system was about 44°C and its moisture content was 16% wet basis. The thermal efficiency of cooling system was 59%. In order to avoid the paddy damage, the proper temperature of paddy rice storage is usually about 28 – 29°C. It is seen that the cooling system of CLPHP constructed in this project can fairly remove the heat generated in paddy buck. Therefore the important factors that affected on paddy buck storage with CLPHP cooling should be continually studied.

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานเรื่องการควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ซึ่งจะสำเร็จไม่ได้ ถ้าปราศจากบุคคลที่มีความสำคัญดังต่อไปนี้ ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน ผู้ซึ่งให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา และให้แนวทางการแก้ปัญหาตลอดจนให้ความไว้วางใจในการทำงานเป็นอย่างดี ขอขอบพระคุณครูช่างภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้ความกรุณาให้คำแนะนำในเรื่องวิธีการใช้เครื่องมือต่างๆและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณ ห้องวิจัยท่อความร้อนและระบบความร้อน ภาควิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่งเป็นสถานที่ในการจัดทำโครงงานจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ เอาใจใส่ดูแลและสนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่างด้วยดี โดยเฉพาะการให้การศึกษาที่ดีแก่ผู้จัดทำตลอดมา

คณะผู้จัดทำโครงงาน

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงงาน	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูปภาพ	ฉ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	2
1.3 ขอบเขต	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 งบประมาณที่ใช้	3
1.7 แผนการดำเนินโครงงาน	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับความชื้นและสมดุลความชื้นในเมล็ด	5
2.2 การเสื่อมคุณภาพของข้าวเปลือก	7
2.3 การเก็บรักษาข้าวเปลือก	8
2.4 การหายใจของข้าวเปลือก	9
2.5 ชนิดและหลักการทำงานท่อความร้อนแบบสั่น	9
2.6 ผลกระทบต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	12
2.7 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	13
2.8 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.1 การสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูล 19

3.2 ตัวแปรในการทดสอบ 19

3.3 หลักการทำงานของระบบระบายความร้อนด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 20

3.4 ขั้นตอนการสร้างและติดตั้งท่อความร้อน 21

3.5 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด 24

3.6 ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพ 26

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองเก็บข้าวเปลือกในถังที่ไม่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 28

4.2 ผลการทดลองเก็บข้าวเปลือกในถังที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 30

4.3 การเปรียบเทียบอุณหภูมิในถังข้าวเปลือกที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบและไม่ติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 35

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง 38

5.2 ข้อเสนอแนะ 39

เอกสารอ้างอิง 40

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ 42

ภาคผนวก ข ตารางแสดงคุณสมบัติ 47

ประวัติผู้จัดทำโครงงาน 50

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	10
รูปที่ 2.2 ระบบการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	11
รูปที่ 3.1 ถังเก็บข้าวเปลือกที่ระบายความร้อนด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	20
รูปที่ 3.2 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	21
รูปที่ 3.3 แสดงจุดที่ติดเทอร์โมคัปเปิลบนผิวท่อ	21
รูปที่ 3.4 แสดงรูปแบบการติดตั้งท่อ	22
รูปที่ 3.5 แสดงรูปการต่อสายเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ	23
รูปที่ 3.6 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger)	24
รูปที่ 3.7 เทอร์โมคัปเปิล	24
รูปที่ 3.8 ชุดเติมสารทำงาน	25
รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความชื้น	25
รูปที่ 3.10 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์	25
รูปที่ 3.11 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด	26
รูปที่ 4.1 แสดงจุดที่มีการวัดอุณหภูมิในข้าวเปลือก	27
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือกในถังเก็บที่ไม่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	28
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือกที่เก็บรักษาโดยไม่มีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	29
รูปที่ 4.4 แสดงอุณหภูมิส่วนทำระเหย ที่ผิวท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	30
รูปที่ 4.5 แสดงอุณหภูมิส่วนควบแน่น ที่ผิวท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	30
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือกในถังเก็บที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	31
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือกที่เก็บรักษาโดยมีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	32
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อ	33
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความร้อนที่เกิดจากข้าวเปลือก	34

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 แสดงอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บข้าวเปลือกแบบติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบกับไม่ได้ติดตั้งในแนวรัศมี(วงชั้นนอกและวงชั้นใน)และอุณหภูมิอากาศ	35
รูปที่ 4.11 แสดงจุดวัดอุณหภูมิ ประกอบรูปที่ 4.12,4.13	36
รูปที่ 4.12 แสดงอุณหภูมิข้าวเฉลี่ย ณ จุดวัดอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บข้าวเปลือกที่ไม่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	37
รูปที่ 4.13 แสดงอุณหภูมิข้าวเฉลี่ย ณ จุดวัดอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บข้าวเปลือกที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	37

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
F	อัตราการเติมสาร	-
DML	การสูญเสียมวลแห้ง,เศษส่วน	-
t	เวลา	h
T_b	อุณหภูมิข้าวเปลือก	$^{\circ}C$
M_w	ความชื้นข้าวเปลือก	% wet basis.
Q_{Paddy}	ค่าความร้อนของข้าวเปลือก	W
m	คือ มวลของข้าวเปลือกในปริมาตรควบคุม	kg
$D_{i,\max}$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสูงสุด	-
σ	แรงตึงผิวของของเหลว,	N/m
ρ_l	ความหนาแน่นของของเหลว	kg/m^3
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง	m/s^2
L_e	ส่วนทำระเหย	m
L_c	ส่วนควบแน่น	m
n	จำนวนโค้งเลี้ยว	-
D_i	เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน	mm
D_o	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	mm
r	รัศมีของโค้งเลี้ยว	mm
$\dot{Q}_{loss}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ออกจากท่อ	W
A	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน	m^2
T_c	อุณหภูมิพื้นผิวของท่อที่ส่วนควบแน่น	K
T_a	อุณหภูมิอากาศ	K
h_m	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาที่พื้นผิวของส่วนควบแน่น	W/m^2K
Gr_L	Grashof Number	-
β	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร	K^{-1}

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
ν	Kinematic Viscosity	m^2/s
k	อักษรย่อและสัญลักษณ์ค่าการนำความร้อนของอากาศ	W/m.K
Pr	Prandtl Number	-
Nu_m	Nusselt Number	-
C_p	ค่าความจุความร้อนของข้าวเปลือก	kJ/kg.K

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

ประเทศไทยมีสังคมและเศรษฐกิจอยู่บนพื้นฐานของภาคเกษตรกรรมเป็นหลัก ข้าว เป็นอาหารหลักประจำชาติและเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญยิ่งของไทย ซึ่งเป็นรายได้หลักของประชากรระดับรากหญ้าอีกทั้งยังเป็นสินค้าส่งออกที่สามารถสร้างรายได้และนำเงินตราเข้าสู่ประเทศ ดังนั้นปัจจุบันการผลิตข้าวในประเทศไทยได้มีการนำเอาเทคโนโลยีสมัยใหม่รวมถึงการนำเครื่องจักรกลการเกษตรเข้ามาแทนที่การใช้กำลังคนเหมือนในอดีตที่ผ่านมาเนื่องจาก สะดวก รวดเร็ว มากกว่า สำหรับการเก็บเกี่ยวที่ใช้เครื่องนวดจะทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นสูง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการลดความชื้นให้กับข้าวเปลือก มิเช่นนั้นจะเกิดการเสื่อมคุณภาพของข้าวเปลือกเนื่องจากยีสต์และเชื้อรา และเกิดจากการหายใจของเมล็ดข้าว ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจากขบวนการหายใจของเมล็ดข้าวจำนวนมหาศาลที่อยู่ภายใต้กองข้าวนั้น จะถูกสะสมไว้จนอุณหภูมิภายในกองข้าวเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนอาจสูงถึง 45-50 องศาเซลเซียส ซึ่งความร้อนนี้ทำให้เมล็ดข้าวเปลี่ยนไป เช่น เมล็ดข้าวเปลี่ยนจากสีขาวนวลเป็นสีเหลือง เมื่อนำไปสีเป็นข้าวสารจะได้ข้าวหักสูงขึ้น ฯลฯ ซึ่งปัญหาเหล่านั้นอันหมายถึงความขาดทุนของภาคเอกชน หรือภาครัฐ ที่เป็นผู้เก็บข้าวกองนั้นไว้ ซึ่งโดยทั่วไปความชื้นที่ใช้ในการเก็บข้าวเปลือกจะอยู่ที่ 12-14% และอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 29 อาศาเซลเซียส [3] เป้าหมายหลักของการเก็บรักษาข้าว คือต้องมีการสูญเสียของข้าวในขณะเก็บรักษาน้อยที่สุดทั้งด้านปริมาณและคุณภาพ หลักการเก็บรักษาโดยทั่วไปคือ ควรเก็บรักษาข้าวไว้ในสภาพหรือโรงเก็บที่มีความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศต่ำ (ในที่แห้งและเย็น)

ปัจจุบันได้มีการนำเอาเทคโนโลยีใหม่ในการระบายความร้อนสะสมในถังข้าวเปลือก โดยการใช้ท่อเทอร์โมไซฟอน ซึ่งนำเสนอครั้งแรกโดย Dussadee and Kiatsiriroat [2] การทำงานจะใช้ท่อส่วนทำระเหยฝังอยู่ในถังข้าวเปลือก และส่วนควบแน่นระบายความร้อนสู่อากาศจาการศึกษาระบบดังกล่าวสามารถควบคุมอุณหภูมิความชื้นข้าวเปลือก 26.9 %, มาตรฐานเปียกอยู่ที่ 37-38 องศาเซลเซียส ในขณะที่ระบบที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกอุณหภูมิสูงถึง 65

องศาเซลเซียส สามารถชะลอความเสียหายของเข้าเปลือกภายหลังการเก็บเกี่ยว สำหรับการทดสอบการเก็บรักษากับข้าวเปลือก ที่ความชื้นระดับต่ำ 13.5 % มาตรฐานเปียก ท่อความร้อนสามารถควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 28-29 องศาเซลเซียส ในขณะที่ระบบที่ไม่มีการควบคุมใดๆ อุณหภูมิข้าวเปลือกอยู่ที่ 31-32 องศาเซลเซียส เนื่องจากการใช้ท่อความร้อนดังกล่าวจำเป็นที่จะต้องใช้พื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนสูง รวมถึงรูปแบบการติดตั้งเทอร์โมไซฟอนมีรูปแบบที่ยุ่งยาก ท่อมีขนาดใหญ่ ทำให้ต้องเสียค่าติดตั้งสูง การดูแลรักษาทำได้ยากอีกด้วย

ดังนั้น กลุ่มผู้จัดทำจึงมีแนวคิดที่เก็บรักษาข้าวเปลือก โดยใช้วิธีควบคุมอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว โดยการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในระหว่างเก็บข้าวได้ ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบเป็นท่อความร้อนชนิดใหม่ที่มีการส่งถ่ายความร้อนแตกต่างจากท่อความร้อนแบบธรรมดา คือ การเกิดแห่งของเหลวและก้อนไอในท่อจะช่วยเพิ่มการเคลื่อนที่แบบสั่นของของไหลทำงานซึ่งเกิดขึ้นด้วยตัวมันเอง โดยเกิดจากแรงขับของแรงดันที่ไม่คงที่อย่างรุนแรง สาเหตุมาจากการเดือดแบบฟองและการควบแน่นของสารทำงานภายในท่อ มีคุณสมบัติที่สำคัญคือ สามารถส่งถ่ายความร้อนได้อย่างรวดเร็ว และมีข้อดีคือ ไม่ต้องใช้พลังงานเสริมในการใช้งาน ปัญหาในการใช้งาน และการดูแลรักษาน้อย เพราะไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหว เป็นท่อที่มีขนาดเล็ก สามารถขดเลี้ยวได้ง่ายทำให้มีรูปแบบการติดตั้งที่หลากหลายมากกว่า ค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน มีค่าสูงกว่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนของโลหะมาก อุณหภูมิในการใช้งานมีช่วงกว้างและสามารถทำงานได้ แม้อุณหภูมิระหว่างแหล่งให้ความร้อนกับแหล่งรับความร้อนต่างกันไม่มาก

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาและสร้างถังเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ระบายความร้อนด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

1.2.2 วิเคราะห์สมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนของระบบที่สร้างขึ้น

1.3 ขอบเขต

1.3.1 ข้าวเปลือกพันธุ์สุพรรณ 4

1.3.2 ถังเก็บข้าวเปลือกขนาด 500 กิโลกรัม

1.3.3 ท่อคาปิลลารี่ทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.4 มิลลิเมตร มีความยาวส่วนทำระเหย 50 เซนติเมตร มีจำนวนโค้งเลี้ยว 20 โค้งเลี้ยว และใช้ R-134a เป็นสารทำงาน

1.3.4 อัตราส่วนการเติมสารทำงานที่ 50% ของปริมาตรท่อทั้งหมด

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 รวบรวมและศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ (Closed-loop pulsating heat pipe)

1.4.2 ศึกษาและเก็บข้อมูลเกี่ยวกับข้าวเปลือก และการเก็บรักษาข้าวเปลือกชนิดต่างๆ

1.4.3 ทำการเลือกชนิดของข้าวเปลือกที่จะนำมาทำการทดลอง

1.4.4 ออกแบบถังเก็บข้าวเปลือกขนาดบรรจุข้าวเปลือก 500 กิโลกรัม

1.4.5 ออกแบบการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบลงในถังเก็บข้าวเปลือก

1.4.6 ทำการทดสอบสมรรถนะของการระบายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

1.4.7 เปรียบเทียบสมรรถนะของการระบายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบกับระบบที่ไม่มีการระบายความร้อน

1.4.8 สรุปผลการทดลอง วิเคราะห์ผลการทดลอง

1.4.9 จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ถังเก็บรักษาข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อนด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

1.5.2 ได้ระบบระบายความร้อนในข้าวเปลือกโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

1.6 งบประมาณ

ค่าถ่ายเอกสาร	ราคา	1,000	บาท
ค่าปริ้นส์งาน	ราคา	800	บาท
ค่าจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์	ราคา	1,200	บาท
	รวม	3,000	บาท

1.7 ระยะเวลาและแผนการปฏิบัติงาน

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาและแผนการปฏิบัติงาน

งาน/ระยะเวลา	2553							2554	
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ CLPHPs	←	—	—	→					
ศึกษาและเก็บข้อมูลของข้าวเปลือก			←	→					
ออกแบบถังเก็บข้าวเปลือก					←	→			
ทดสอบประสิทธิภาพ							←	→	
สรุป วิเคราะห์และเปรียบเทียบ								↔	
จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์								←	→

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับความชื้นและสมดุลความชื้นในเมล็ด

ในการเก็บรักษาข้าวเปลือกให้คงสภาพอยู่ได้นานมากน้อยเพียงใดนั้น สามารถกล่าวได้ว่ามีความชื้นเป็นตัวกำหนดที่สำคัญมากตัวหนึ่ง เพราะปฏิกิริยาทางชีววิทยาจะเกิดขึ้นกับผลผลิตได้ก็ต่อเมื่อมีความชื้นที่เอื้ออำนวย ซึ่งจะมีผลแตกต่างกันออกไปตามระดับความชื้นที่มีอยู่ อาทิ ที่ระดับความชื้นสูงก็อาจเกิดการงอกของเมล็ดได้ หรือรองลงมา ก็เป็นสาเหตุให้เกิดเชื้อราหรือแบคทีเรีย ตลอดจนการเจริญเติบโตของแมลงที่กัดกินต่างๆ อีกด้วย

2.1.1 ความชื้นและสมดุลของความชื้น

ความชื้นที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวนั้น แยกเป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือ ชนิดที่เป็นน้ำอยู่ภายในของเมล็ด ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์เมล็ดพืช และอีกส่วนหนึ่งคือ น้ำที่อยู่ผิวนอกของเมล็ดซึ่งถูกดูดซับไว้ที่ผิวของเมล็ด ความชื้นประเภทหลังนี้มีความสำคัญที่ทำให้คุณภาพและระยะเวลาในการเก็บรักษาเมล็ดถูกกำหนดในขอบเขตจำกัด

เมล็ดข้าวเปลือกมีสมบัติอย่างหนึ่งที่แสดงความสมดุลระหว่างความชื้นภายในเมล็ดกับไอน้ำในบรรยากาศรอบข้าง สมบัตินี้เรียกว่า ความสมดุลของปริมาณความชื้นและความชื้นสัมพัทธ์ ดังนั้นเมล็ดพืชที่มีความชื้นมาก มาสัมผัสกับอากาศ ความชื้นจะถูกถ่ายเท โดยเคลื่อนที่จากเมล็ดสู่อากาศจนกระทั่งเกิดความสมดุลของความชื้น และจากการที่ได้มีการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงความชื้นนั้นขึ้นกับอุณหภูมิด้วย ปริมาณจะเกิดมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับชนิดของเมล็ด ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิในขณะนั้น

การที่เมล็ดข้าวเปลือกจะเข้าสู่สมดุลของความชื้นได้นั้นขึ้นกับสภาวการณ์หลายอย่าง เช่น ถ้าหากเมล็ดถูกเก็บในที่ไม่มีอากาศไหลผ่าน อากาศส่วนที่สัมผัสอยู่กับเมล็ดข้าวเปลือกจะเข้าสู่สมดุลทางความชื้นโดยขึ้นอยู่กับความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกเพียงอย่างเดียว แต่ถ้าหากว่ามีอากาศไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกนั้น ปริมาณความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกจะถูกกำหนดโดยความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลผ่าน และเนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ถูกกำหนดไว้ด้วยอุณหภูมิและความชื้นในอากาศดังนั้นถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นขณะที่ความชื้นถูกรักษาให้คงที่ จะพบว่าความชื้นสัมพัทธ์จะลดลง ดังนั้นการนำเอาอากาศที่มีความชื้นต่ำมาใช้จะได้ผลดีที่สุดในการเก็บรักษาระดับความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือก

2.1.2 ระดับปริมาณความชื้นสำหรับการเก็บเมล็ดพืช

โดยทั่วไปแล้ว การเก็บเมล็ดพืชมีเป้าหมายที่แตกต่างกันออกไป ในกรณีของข้าวเปลือก สามารถแบ่งออกได้ 3 ประเด็น คือ

1. เก็บไว้เพื่อรอการขาย ในกรณีนี้ เกรดของข้าวเปลือกเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้ราคาขายสูงหรือต่ำ เกรดของข้าวเปลือกอาจตกลงได้ในระหว่างการเก็บ เนื่องจากความชื้นที่ระดับต่างๆกัน ถ้าข้าวเปลือกมีความชื้นสูงกว่า 24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกและอุณหภูมิสูงกว่า 10 องศาเซลเซียสขึ้นไปเมื่อเก็บไว้ 1 วัน เกรดคุณภาพของข้าวจะตกลง จึงควรมีการอบหรือตากให้แห้งภายใน 24 ชั่วโมง ถ้าข้าวเปลือกมีความชื้น 21-24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก อุณหภูมิเก็บรักษาตั้งแต่ 10 องศาเซลเซียส ขึ้นไปจะเก็บไว้ได้เพียง 3 วัน เกรดก็จะตกลง หรือที่ความชื้น 15-21 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก อุณหภูมิเก็บรักษาสูงกว่า 10 องศาเซลเซียส จะเก็บได้เพียง 5 วัน หลังจากนั้นควรมีการอบหรือตาก

2. เก็บไว้เพื่อนำไปทำพันธุ์ ในกรณีนี้ร้อยละความงอกเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง ข้าวเปลือกที่มีความชื้นตั้งแต่ 15 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก และอุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส ความงอกของเมล็ดจะลดลงภายใน 5 วัน จึงควรทำการอบหรือตากโดยเร็ว ถ้ามีความชื้นตั้งแต่ 21 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ขึ้นไป และที่ 25 องศาเซลเซียส ขึ้นไปความงอกจะลดลงในวันที่ 3 หรือที่ความชื้น15-21 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ความงอกจะลดลงหลังจากเก็บได้ 1 สัปดาห์

3. เก็บไว้เพื่อรอการแปรรูป ถ้าต้องการเก็บข้าวเปลือกไว้สีเป็นข้าวสาร สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวหรือข้าวเต็มเมล็ด (Head Rice) ข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงกว่า 24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก จะให้ข้าวเต็มเมล็ดลดลงอย่างรวดเร็วในระยะเวลา 1 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิในการเก็บตั้งแต่ 10 องศาเซลเซียสขึ้นไป ข้าวเปลือกที่ความชื้น 21-24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก อุณหภูมิ 25องศาเซลเซียส จะให้ข้าวเต็มเมล็ดลดลงภายใน 3 สัปดาห์และข้าวเปลือกที่ความชื้น 15-21 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ที่ 25 องศาเซลเซียสขึ้นไป จะให้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดลดลงเล็กน้อย แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส ที่ความชื้น 15-21เปอร์เซ็นต์มาตรฐาน จะให้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสม่ำเสมอในช่วงระยะเวลา 3 เดือน

ในการเก็บรักษาเมล็ดข้าวเปลือกในที่เก็บใดๆนั้น จำเป็นต้องทราบถึงปริมาณความชื้นที่เมล็ดมีอยู่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของเมล็ดในทางที่เสื่อมคุณภาพลงนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบความชื้นในเมล็ดเป็นสำคัญ

2.2 การเสื่อมคุณภาพของข้าวเปลือก

การเสื่อมคุณภาพของข้าวเปลือกเป็นการสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งทางด้านปริมาณและคุณภาพ ซึ่งความสูญเสียด้านปริมาณได้แก่ความเสียหายด้านจำนวนหรือน้ำหนัก ส่วนความสูญเสียทางคุณภาพได้แก่ ความสูญเสียทางด้านกลิ่น สี รส หรือมีเชื้อราทำลายจนบริโภคไม่ได้

2.2.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสื่อมคุณภาพของข้าวเปลือกในการเก็บรักษา มี 3 ปัจจัย คือ

1. ความชื้นของข้าวเปลือกที่นำมาเก็บรักษา
2. อุณหภูมิที่เก็บรักษา
3. ระยะเวลาในการเก็บรักษา

โดยความชื้นของข้าวเปลือกทำให้ข้าวเปลือกเสื่อมคุณภาพได้ 2 ลักษณะ คือ

1. ความชื้นสูงกระตุ้นให้ข้าวเปลือกหายใจมากขึ้น การหายใจเป็นกระบวนการสันดาปของคาร์โบไฮเดรทจากเมล็ดข้าวกับออกซิเจนในอากาศ ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงานความร้อนออกมา ความชื้นที่สูงภายในเมล็ดจะทำให้อัตราการหายใจสูงตามไปด้วย การหายใจของเมล็ดทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในกองข้าว ทำให้กองข้าวมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความร้อนสะสมจะยิ่งสูงขึ้นเมื่อระยะการเก็บรักษานานขึ้น ซึ่งจะทำให้ข้าวเปลือกมีคุณภาพลดลงในลักษณะการเกิดเมล็ดข้าวเหลือง

2. ความชื้นภายในกองข้าวเปลือกทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโต และแพร่พันธุ์ขึ้นมา ซึ่งจะทำให้ข้าวเปลือกเสื่อมคุณภาพในลักษณะต่างๆ เช่น ข้าวฟันหนู ซึ่งเกิดจากเชื้อบักเตรีพวก Actinomycis ที่มีอยู่ในดินและติดมากับเมล็ด เชื้อนี้ทำให้เกิดสารพวก Citrinin เป็นอันตรายแก่คนและสัตว์ได้หากบริโภคข้าวที่มีเชื้อนี้

2.2.2 วิธีการป้องกันการเสื่อมคุณภาพของข้าวเปลือก

การป้องกันการเสื่อมคุณภาพของข้าวเปลือกได้มีการพัฒนาเทคนิคในการเก็บรักษา อาจทำได้หลายวิธีดังนี้

1. นำออกซิเจนที่มีอยู่ระหว่างเมล็ดข้าวเปลือกที่เก็บรักษาออก
2. เพิ่มความเป็นกรดให้กับเมล็ดข้าวเปลือกโดยใช้จุลินทรีย์ (Lactobacillus)
3. ใช้กระบวนการทางเคมีเพิ่มหรือลดความเป็นกรด-ด่าง เพื่อควบคุมจุลินทรีย์
4. ลดความชื้น
5. ลดอุณหภูมิในการเก็บรักษาให้เย็นลง

2.3 การเก็บรักษาข้าวเปลือก

เป้าหมายหลักของการเก็บรักษาข้าว คือต้องมีการสูญเสียของข้าวในขณะเก็บรักษาน้อยที่สุดทั้งด้านปริมาณและคุณภาพ หลักการเก็บรักษาโดยทั่วไปคือ ควรเก็บรักษาข้าวไว้ในสภาพหรือโรงเก็บที่มีความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศต่ำ (ในที่แห้งและเย็น)

2.3.1 วิธีการเก็บรักษาข้าวเปลือก

การเก็บรักษาข้าวเปลือกโดย ทั่วๆไป แบ่งออกได้เป็น 4 วิธี ได้แก่

1. การเก็บในสภาพปกติ ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ หมายถึง การเก็บข้าวไว้ในโรงเก็บปกติที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเก็บ เป็นวิธีที่นิยมใช้อยู่เป็นส่วนใหญ่ เพราะมีการลงทุนน้อย และเสียค่าใช้จ่ายต่ำ แต่โอกาสที่จะเกิดความเสียหายในระหว่างการเก็บรักษามีสูง เช่น การเก็บในโรงเก็บหรือยุ้งฉางของเกษตรกร โรงสีหรือโกดังส่งออกข้าวขนาดใหญ่ๆ

2. การเก็บในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว เช่น การเก็บข้าวไว้ในตู้แช่ ตู้เย็น หรือในไซโลเก็บข้าวที่มีการเป่าลมเย็น เป็นต้น

3. การเก็บในสภาพที่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ได้แก่ การเก็บข้าวไว้ในภาชนะเก็บที่มิดชิด สามารถป้องกันการเคลื่อนที่ผ่านเข้าออกของอากาศได้ เช่น การเก็บเมล็ดพันธุ์ไว้ในปีปสังกะสี หรือ polyethylene bags เป็นต้น การเก็บข้าวในสภาพปิดเช่นนี้ ความชื้นของข้าวจะเป็นตัวกำหนดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในภาชนะที่เก็บ ถ้าความชื้นของข้าวต่ำ ความชื้นสัมพัทธ์ภายในภาชนะบรรจุก็จะต่ำ ข้าวที่เก็บจะเกิดความเสียหายน้อย ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ของข้าวสูง ความชื้นสัมพัทธ์ภายในภาชนะบรรจุก็จะสูง ข้าวที่เก็บจะเกิดความเสียหายสูง ดังนั้น การเก็บรักษาข้าวด้วยวิธีนี้ ข้าวควรมีความชื้นก่อนเก็บต่ำ ทั้งนี้ขึ้นกับระยะเวลาที่ต้องการเก็บรักษา อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปความชื้นไม่ควรเกิน 10% วิธีนี้เป็นวิธีที่ได้ผลดี และมีค่าใช้จ่ายต่ำ

4. การเก็บในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ วิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด สามารถป้องกันและลดความเสียหายของข้าวได้ดี เก็บรักษาข้าวให้คงคุณภาพดี ได้เป็นเวลานาน แต่มีการลงทุนและเสียค่าใช้จ่ายในการดูแลสูง เช่นการเก็บอนุรักษ์เชื้อพันธุ์ข้าวในธนาคารเชื้อพันธุ์

จากวิธีการเก็บรักษาข้าวเปลือกทั้ง 4 วิธีข้างต้นพบว่าการเก็บรักษาข้าวเปลือกด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ จะจัดอยู่ในวิธีที่ 2 คือ การเก็บในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว โดยจะรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกไว้ประมาณ 28-29 องศาเซลเซียส

2.4 การหายใจของข้าวเปลือก

ความร้อนที่เกิดจากการหายใจของข้าวเปลือกสามารถหาได้จากปฏิกิริยาเคมี ดังนี้

$$C_{16}H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 2.831(MJ) \qquad (2.1)$$

ในการหายใจ เมื่อข้าวเปลือกหายใจจะใช้แป้งและก๊าซออกซิเจนถ้าในการหายใจ 1 กิโลกรัม จะต้องใช้ก๊าซออกซิเจน 1.07 กิโลกรัม จะให้คาร์บอนไดออกไซด์ *1.47* กิโลกรัม น้ำ *0.6* กิโลกรัมและปลดปล่อยความร้อนออกมาก *15.778 MJ*

ความร้อนของข้าวเปลือก (Q_{Paddy}) มีความสัมพันธ์กับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิหาได้จาก

$$\dot{E}_g = Q_{Paddy} = (mC_p\Delta T)/\Delta t \qquad (2.2)$$

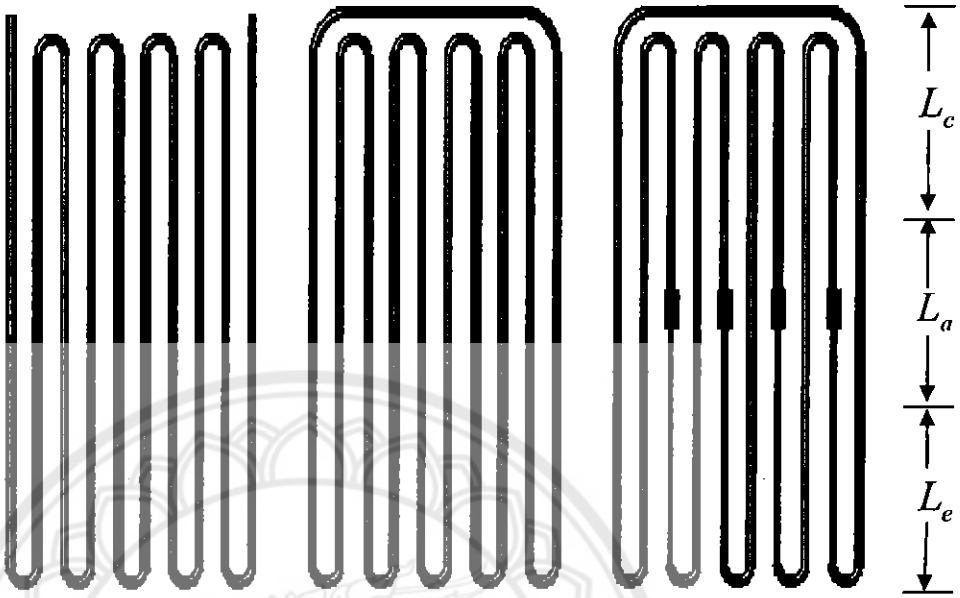
โดยที่ Q_{Paddy} คือ ค่าความร้อนของข้าวเปลือก, kW

M คือ มวลของข้าวเปลือกในปริมาตรควบคุม, kg

Δt คือ เวลาในการเกิดความร้อน, วินาที

2.5 ชนิดและหลักการทำงานท่อความร้อนแบบสั่น (Oscillating or pulsating heat pipe)

ท่อความร้อนแบบสั่นจัดเป็นอุปกรณ์ที่สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้ โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอกเช่นเดียวกับท่อความร้อนแบบปรกติ และท่อความร้อนแบบสั่นจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนทำระเหย (L_e) ส่วนกันความร้อน (L_a) และส่วนควบแน่น (L_c) ลักษณะของท่อความร้อนแบบสั่นแต่ละชนิด สามารถแสดงได้ดังรูป 2.1



(a) (b) (c)

รูปที่ 2.1 (a) ท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด (b) ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ
(c) ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีวาล์วกันกลับ [4]

เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ดีในงานวิจัยที่จะทำการศึกษานี้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องอธิบายเกี่ยวกับท่อความร้อนแบบสั่นโดยสังเขปถึง ชนิดของท่อความร้อนแบบสั่น หลักการทำงาน และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.1 ชนิดของท่อความร้อนแบบสั่น

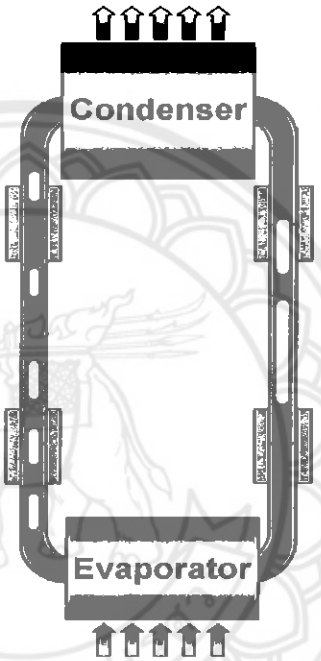
ท่อความร้อนแบบสั่นจะมีด้วยกัน 3 แบบ (Maezawa et. al., 2000) ดังรูปที่ 2.1 คือ

- ท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด (Closed-end oscillating heat pipe) ทำจากท่อคาปิลลารี่ที่ยาวโดยไม่มีการต่อปลายท่อทั้งสองข้างเข้าด้วยกัน กรณีนี้การส่งถ่ายความร้อนจะเกิดขึ้นจากการสั่นที่ถูกขับโดยคลื่นความดันที่แกว่งอย่างเร็วซึ่งเกิดจากการเดือดแบบฟอง (Nucleate boiling) ในของไหลทำงาน แสดงในรูปที่ 2.1(a)

- ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ (Closed - loop oscillating heat pipe) ทำจากท่อคาปิลลารี่ที่ยาวมาก และมีการต่อปลายท่อทั้งสองด้านเข้าด้วยกันเป็นวงรอบ ดังนั้นในกรณีนี้การส่งถ่ายความร้อนจะเกิดขึ้นจากการสั่นของของไหลทำงานในแนวแกนของท่อจึงเป็นสาเหตุให้เกิดการไหลเวียนที่ซ้ำลงในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง แสดงในรูปที่ 2.1(b)

- ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีวาล์วกันกลับ (Closed - loop oscillating heat pipe withcheck valves) ทำจากท่อคาปิลลารี่ที่มีความยาวมากๆ และมีการต่อปลายท่อทั้งสองเข้าด้วยกันเป็นวงรอบโดยมีการติดวาล์วกันกลับไว้ในวงจรตั้งแต่ 1 ตัวขึ้นไป เพื่อให้ของไหลทำงานนำความร้อนไหลเวียนไปในทิศทางที่กำหนดได้อย่างรวดเร็ว แสดงในรูปที่ 2.1(c)

2.5.2 หลักการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่น



รูปที่ 2.2 ระบบการทำงานของ CLPHP [4]

ท่อความร้อนแบบสั่นเป็นเทคโนโลยีใหม่ของท่อความร้อน มีหลักการทำงานที่ซับซ้อน ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องเข้าใจถึงหลักการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นอย่างแท้จริง ด้วยเหตุนี้จึงได้ทำการศึกษาคุณลักษณะที่สำคัญและการนำไปใช้งานของท่อความร้อนแบบสั่น Akachi et al.(1996) พบว่ากลไกพื้นฐานในการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นคือการผลิตท่อความร้อนจากคาปิลลารีที่ภายในเป็นสุญญากาศ แล้วเติมสารทำงานจำนวนที่พอเหมาะภายในท่อจะเกิดมีฟองไอ(Vapor bubbles) และแท่งของเหลว (Liquid plugs) รวมตัวกันอยู่ภายในท่อตามแนวยาว เมื่อด้านใดด้านหนึ่งของท่อได้รับความร้อน (ส่วนทำระเหย) ฟองไอจะเกิดการขยายตัวทำให้เกิดแรงดันขึ้นเมื่อเพิ่มความร้อนมากขึ้นแรงดันก็จะสูงขึ้นและจะเกิดแรงขับ (Driving force) ผลักเอาแท่งของเหลวให้เคลื่อนที่ต่อไปยังส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำ (ส่วนควบแน่น) และเนื่องจากท่อมีความยาวที่ต่อกันจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของฟองไอและแท่งของเหลวในท่อนั้น

และความร้อนจะถูกส่งถ่ายออกและฟองไอจะเกิดการกลั่นตัวที่ส่วนนี้ หลังจากนี้ฟองไอก็จะยุบตัวลงแล้วแรงดันก็จะลดลงซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันที่แตกต่างกันระหว่างด้านทั้งสอง ในขณะเดียวกันเมื่อแรงดันในส่วนที่อุณหภูมิต่ำลดลง ทำให้ไอเกิดการเคลื่อนที่ไปผลักเอาแท่งของเหลวให้ไหลกลับไปยังส่วนที่อุณหภูมิสูงเมื่อแรงดันในส่วนอุณหภูมิต่ำลดลงอีกครั้ง ก็จะเกิดแรงขับไปผลักแท่งของเหลวให้เคลื่อนที่ต่อไปยังส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำอีกจะเรียกว่าแรงย้อนกลับ (Restoring force) การทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นจะต่อเนื่องกันเป็นวัฏจักรซึ่งการเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากแรงขับและแรงย้อนกลับ จะทำให้ฟองไอและแท่งของเหลวเกิดการสั่นขึ้นในทิศทางตามแนวแกน

2.6 ผลกระทบต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

2.6.1 ผลของความยาวส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

ความยาวส่วนทำระเหยมีผลต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ คือเมื่อความยาวส่วนทำระเหยมากขึ้น รูปแบบการไหลภายในยังคงเป็นเป็นแบบ Slug flowผสมกับแบบ Bubble flow อย่างเล็กน้อย แต่จะมีอัตราการเกิดการไหลแบบ Annular flow ลดลง ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นความร้อนที่ถ่ายเทได้ลดลงด้วย ดังเช่นในท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ใช้สารทำงานเดียวกัน พบว่าหากเพิ่มความยาวส่วนทำระเหยจาก 50 mm ไปเป็น 150 mm รูปแบบการไหลจะสอดคล้องกับที่กล่าวมาข้างต้น และยังพบอีกว่า อัตราการหายไปของฟอง (Collapsing ratio) ลดลง ความยาวฟองไอเพิ่มขึ้น ความเร็วฟองไอเพิ่มขึ้น แอมปลิจูดของการสั่นของอุณหภูมิภายในท่อความร้อนเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความถี่ของการสั่น ของอุณหภูมิภายในท่อความร้อนแทบจะคงที่ และค่าความหนาแน่นความร้อนลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อความยาวส่วนทำระเหยลดลง ฟองไอสามารถเคลื่อนที่ไปยังส่วนควบแน่นได้ง่ายขึ้น อีกทั้งยังมีเวลาเพียงพอในการส่งถ่ายความร้อนอีกด้วย (Charoensawan et al., 2003)

2.6.2 ผลของจำนวนโค้งเลี้ยวของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

จำนวนโค้งเลี้ยวมีผลต่อรูปแบบการไหลภายใน ของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ คือเมื่อจำนวนโค้งเลี้ยวมากขึ้น รูปแบบการไหลภายในยังคงเป็นเป็นแบบ Slug flow ผสมกับแบบ Bubble flow อย่างเล็กน้อย แต่จะมีอัตราการเกิดการไหลแบบ Annular flow ลดลง ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นความร้อนที่ถ่ายเทได้ลดลงด้วย ดังเช่นในท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ใช้สารทำงานเดียวกัน พบว่าหากเพิ่มจำนวนโค้งเลี้ยวจาก 10 โค้งเลี้ยว ไปเป็น 28 โค้งเลี้ยว รูปแบบการไหลจะสอดคล้องกับที่กล่าวมาข้างต้น และยังพบอีกว่า อัตราการหายไปของฟอง (Collapsingratio) ลดลง ความยาวฟองไอเพิ่มขึ้น ความเร็วฟองไอเพิ่มขึ้น แอมปลิจูดของการสั่นของอุณหภูมิภายในท่อความร้อนเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความถี่ของการสั่นของอุณหภูมิภายในท่อความ

ร้อนแทบจะคงที่ และค่าความหนาแน่นความร้อนลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อจำนวนโค้งเลี้ยวลดลง ฟองไอสามารถเคลื่อนที่ไปยังส่วนควบแน่นได้ง่ายขึ้น อีกทั้งยังมีเวลาเพียงพอในการส่งถ่ายความร้อนอีกด้วย (Charoensawan et al., 2003)

2.6.3 ผลของอัตราส่วนการเติมสารทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

อัตราส่วนการเติมสารทำงานมีผลต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ คือเมื่ออัตราส่วนการเติมอยู่ในช่วง 40% ถึง 60% พบว่าการสั่นของสารทำงานภายในมีความรวดเร็วที่สุด ซึ่งหมายถึงท่อความร้อนสามารถส่งถ่ายความร้อนได้ดีที่สุดที่อัตราการเติมสารทำงานในช่วงดังกล่าว (Lee et al., 1999)

2.6.4 ผลของชนิดสารทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

ชนิดสารทำงานมีผลต่อรูปแบบการไหลภายใน ของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบคือเมื่อเปลี่ยนสารทำงานจาก R123 ไปเป็น R141b ซึ่งเสมือนกับการเพิ่มค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ รูปแบบการไหลภายในยังคงเป็นเป็นแบบ Slug flow ผสมกับแบบ Bubble flow อย่างเล็กน้อย แต่จะมีอัตราการเกิดการไหลแบบ Annular flow ลดลงซึ่งจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นความร้อนที่ถ่ายเทได้ลดลงด้วย ดังเช่นในท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีมิติขนาดเดียวกัน พบว่าหากเพิ่มค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอจาก 161 kJ/kg ไปเป็น 214 kJ/kg รูปแบบการไหลจะสอดคล้องกับที่กล่าวมาข้างต้น และยังพบอีกว่าอัตราการหายไปของฟอง (Collapsing ratio) ลดลงเล็กน้อย ความยาวฟองไอเพิ่มขึ้น ความเร็วฟองไอเพิ่มขึ้น แอมปลิจูดของการสั่นของอุณหภูมิภายในท่อความร้อนเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความถี่ของการสั่นของอุณหภูมิภายในท่อความร้อนแทบจะคงที่และค่าความหนาแน่นความร้อนลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอลดลง ฟองไอสามารถเคลื่อนที่ไปยังส่วนควบ แน่นได้ง่ายขึ้น อีกทั้งยังมีเวลาเพียงพอในการส่งถ่ายความร้อนอีกด้วย (Charoensawan et al., 2003)

2.7 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

2.7.1 เส้นผ่านศูนย์กลางภายในสูงสุด

ท่อความร้อนแบบสั่นจะสามารถทำงานได้โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของก้อนของเหลวและฟองไอภายในท่อ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้นั้นสารทำงานจะต้องมีการจัดตัวอยู่ในรูปฟองไอและก้อนของเหลวสลับกันไปและการที่สารทำงานจะสามารถจัดตัวให้อยู่ในรูปก้อนของเหลวและฟองไอได้นั้นจะพิจารณาถึง แรงตึงผิว ความหนาแน่น ของสารทำงานที่อุณหภูมิทำงาน ดังสมการ

$$D_{i,max} = 2\sqrt{\frac{\sigma}{\rho_l g}} \tag{2.3}$$

โดยที่ $D_{i,max}$ = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสูงสุด

σ = แรงตึงผิวของของเหลว, N/m

ρ_l = ความหนาแน่นของของเหลว, kg/m^3

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s^2

2.7.2 อัตราส่วนการเติมสารทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

อัตราส่วนการเติมสารทำงาน มีผลต่อคุณลักษณะการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ โดยพบว่าที่ช่วงอัตราการเติมสาร 30% ถึง 50% เมื่อเพิ่มอัตราการเติมสารค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อนจะเพิ่มขึ้น ช่วงอัตราการเติมสาร 50% ถึง 70% เป็นช่วงที่ทำให้เกิดค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อนสูงสุดของทุกมุมเอียงการทำงาน และช่วงอัตราการเติมสารมากกว่า 70% ค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อนจะลดลงอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องมาจากฟองไอและก้อนของเหลวมีขนาดเล็กเพียงพอที่จะเคลื่อนที่ได้ง่าย และมีปริมาณมากพอที่จะใช้ในการส่งถ่ายความร้อน

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของท่อร่วมด้วยนั่นคือความยาวส่วนทำระเหยพบว่าความยาวส่วนทำระเหย 150 มิลลิเมตร อัตราส่วนการเติมที่เหมาะสมคือ 30% และที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร อัตราส่วนการเติมที่เหมาะสมคือ 30% ถึง 50 %

คำนวณปริมาณการเติมสารทำงานได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ปริมาณการเติมสุทธิ} = V_{total} \times \textit{Filling ratio} \tag{2.4}$$

$$V_{total} = \frac{\pi D_2^i}{4}(L_t) \tag{2.5}$$

$$Lt = \left(n \times 2\left(L_e + L_a + L_c\right)\right) + \left(n \times \left(2\pi r\right)\right) \tag{2.6}$$

โดยที่ L_e = ส่วนทำระเหย ,m

L_a = ส่วนกันความร้อน ,m

L_c = ส่วนควบแน่น ,m

n = จำนวนโค้งเลี้ยว

D_i = เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน ,mm

r = รัศมีของโค้งเลี้ยว ,mm

Filling ratio = อัตราส่วนการเติมสารทำงาน (50%)

2.7.3 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

2.7.3.1 การพาความร้อน

การพาความร้อนหมายถึงการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของแข็งกับของไหล โดยที่ทั้งสองมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ผลการเคลื่อนไหวของของไหลส่งผลให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัม ซึ่งมีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวของแข็งนั้น พลังงานความร้อนถูกโอนถ่ายเป็นผลมาจากการแพร่ของโมเลกุลและผลจากการเคลื่อนไหวไปทั้งปริมาตรของไหลซึ่งหาได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{loss} = A(T_c - T_a)h_m \qquad (2.7)$$

โดยที่ $\dot{Q}_{loss}$ = อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ออกจากท่อ ,W

A = πDL = พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน ,m^2

T_c = อุณหภูมิพื้นผิวของท่อที่ส่วนควบแน่น ,K

T_a = อุณหภูมิอากาศ ,K

h_m = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาที่พื้นผิวของส่วนควบแน่น, W/m^2K

การพาความร้อนแบบอิสระหรือการพาความร้อนตามธรรมชาติของท่อทรงกระบอกที่วางในแนวดิ่ง

กล่าวถึงการเคลื่อนที่ของของไหลเป็นผลของแรงลอยตัวซึ่งเกิดจากผลการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น อันเกิดจากมีผลต่างของอุณหภูมิของของไหลใน 2 บริเวณ

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของแก๊สจะอยู่ในช่วง 2-25 W/m^2K ซึ่งหาได้จากสมการ

$$h_m = \frac{Nu_{m,cyl}k}{L_c} \qquad (2.8)$$

สหสัมพันธ์ของการพาความร้อนแบบธรรมชาติที่ได้จากการทดลองของ Churchill and Chu ซึ่งได้จากสมการ

$$Nu_{m,plate} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387\left(Gr_L \, \mathrm{Pr}\right)^{\frac{1}{6}}}{\left[1+\left(\frac{0.492}{\mathrm{Pr}}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \qquad (2.9)$$

กลุ่มมิติไร้มิติชุดใหม่ที่มีความสำคัญในการถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติ นั้นก็**คือ** Grashof Number โดยมีค่าดังนี้

$$Gr_L = \frac{g\beta L^3\left(T_c - T_a\right)}{\nu^2} \qquad (2.10)$$

โดยที่ Gr_L = Grashof Number

β = สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร ,K^{-1}

ν = Kinematic Viscosity ,m^2/s

k = ค่าการนำความร้อนของอากาศ ,W/m.K

Pr = Prandtl Number

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก , m/s^2

L_c = **ความยาวส่วนควบแน่น** ,m

D_o = **เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ** ,mm

Nu_m = Nusselt Number

2.8 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากผลงานวิจัยของ Dussadee et al.(2003) เรื่องการวิเคราะห์สมรรถนะและเศรษฐศาสตร์ของถังเก็บข้าวเปลือกที่ใช้เทอร์โมไซฟอนการวิเคราะห์สมรรถนะ และเศรษฐศาสตร์ของถังเก็บข้าวเปลือกที่ใช้เทอร์โมไซฟอน ที่ใช้ R22 เป็นสารทำงานเพื่อระบายความร้อนออกจากถังข้าวเปลือกโดยที่ถังเหล็กทรงกระบอกขนาด 1,250 mm และมีความยาว 1,500 mm ซึ่งบรรจุข้าวเปลือกขนาด 1,000 kg ในส่วนทำระเหย ของเทอร์โมไซฟอนอยู่ในข้าวเปลือก ซึ่งทำมาจากชุดท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 in และมีพื้นที่ถ่ายเทความร้อน 8.5 m^2และส่วนควบแน่นมีพื้นที่ 12.2 m^2โดยใช้อากาศในบรรยากาศระบายความร้อน การวิเคราะห์สมรรถนะ และเศรษฐศาสตร์ของถังเก็บข้าวเปลือกที่ใช้เทอร์โมไซฟอน จะวิเคราะห์เปรียบเทียบกับถังที่มีการระบายความร้อนแบบใช้อากาศไหลผ่านข้าวเปลือกจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้เทอร์โมไซมอนมีศักยภาพสูงในการควบคุมอุณหภูมิในข้าวเปลือกและสามารถรักษาอุณหภูมิเหลือเพียง 28-29 องศาเซลเซียสเมื่อเทียบกับการไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ ข้าวเปลือกจะมีอุณหภูมิ 31-32 องศาเซลเซียสตามลำดับ ยิ่งไปกว่านั้น เทอร์โมไซฟอนยังสามารถใช้ได้กับช่วงอุณหภูมิแตกต่างเพียงเล็กน้อยได้อีกด้วย ด้านคุณภาพของข้าวจะใกล้เคียงกันสำหรับการใช้เทอร์โมไซฟอน เมื่อเทียบกับการระบายความร้อนที่ใช้ลมเป่า แบบจำลองระบบนี้ยังสามารถทำนายว่าสำหรับข้าวเปลือก 1000 kg ส่วนทำระเหยควรมีพื้นที่อย่างน้อยที่สุด 16 m^2และส่วนควบแน่นควรมีพื้นที่ 12.2 m^2 จากการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์พบว่าระยะคืนทุน คือ 8.2 ปี และอัตราผลการตอบแทนคือ 8.6 % เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้พัดลมขนาด 1/8 แรงม้าในการระบายความร้อนสัดส่วนเวลาทำงานของพัดลมคือ 20 % ต่อปี

จากผลงานวิจัยของ มนัส ด้วงท้วม, วันจักร เรืองสกุล, ธนานันต์ เพชรสัมฤทธิ์ (2550) เรื่องผลของการกระจายอุณหภูมิในข้าวเปลือกที่มีต่อสมรรถนะการระบายความร้อนในข้าวเปลือกโดยใช้เทอร์โมไซฟอนโครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะจำลองโปรแกรมลักษณะการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกขนาด 1,000 kg ที่บรรจุอยู่ในถังทรงปริมาตรสี่เหลี่ยมสูง 1 m และมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 1.357 m x 1.357 m ที่มีเทอร์โมไซฟอนสำหรับระบายความร้อนให้กับข้าวเปลือก โดยเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ ทำจากท่อทองแดงมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.5 in มีความยาวส่วนทำระเหยเท่ากับ 1 m มีความยาวส่วนควบแน่นเท่ากับ 2 m และมี R134a เป็นสารทำงาน โดยการหาการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกหาจากการถ่ายเทความร้อนใน 2 มิติ ที่แต่ละหน้าตัดของถังเท่านั้น โดยสมมุติว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกไม่เปลี่ยนแปลงตามความสูงของถัง จากการศึกษาพบว่าเมื่อไม่มีการระบายความร้อนในข้าวเปลือกลักษณะการกระจายอุณหภูมิของ

ข้าวเปลือกมีดังนี้ คือ ที่บริเวณกึ่งกลางของถังทุกๆหน้าตัดจะมีอุณหภูมิสูงที่สุด ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไป 1,000 ชั่วโมง จะมีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 49 องศาเซลเซียส ส่วนที่บริเวณอื่นๆของถังจะมีอุณหภูมิต่ำลงเรื่อยๆ เมื่อเข้าใกล้ผนังของถังมากขึ้นและจะมีอุณหภูมิต่ำที่สุดที่บริเวณมุมถังของทุกๆหน้าตัด ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไป 1,000 ชั่วโมง จะมีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 37 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าเมื่อไม่มีการระบายความร้อน ข้าวเปลือกจะมีอุณหภูมิสูงถึง 37-49 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเก็บข้าวเปลือก คือ 28-29 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องมีการระบายความร้อนให้แก่ข้าวเปลือกเพื่อการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้น ข้าวเปลือกที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 29 องศาเซลเซียส จะสามารถเก็บได้นานที่สุดเท่ากับ 722.4 ชั่วโมง โดยที่เปอร์เซ็นต์ความงอกลดลงน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ การระบายความร้อนในข้าวเปลือกโดยใช้เทอร์โมไซฟอนในระบบนี้ ที่มีความเหมาะสมที่สุดจะเกิดเมื่อใช้จำนวนท่อเทอร์โมไซฟอนเท่ากับ 121 ท่อ โดยแต่ละท่อมีระยะห่างเท่ากับ 0.1357 *m* ซึ่งจะสามารถรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียส ได้ภายในเวลา 478 ชั่วโมง

จากผลงานวิจัยของ Piyanun Charoensawan (2003) เรื่อง Closed-loop pulsating heat pipes (CLPHP) Part A; parametric experimental investigation ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ซับซ้อนซึ่งเกิดจากแรงขับเคลื่อนของคลื่นแรงดันที่ไม่แน่นอนอย่างรุนแรง ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพทางความร้อนซึ่งอิทธิพลที่มีผลต่อลักษณะการทำงานขึ้นอยู่กับ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ จำนวนโค้งเลี้ยว(turns), สารทำงาน และมุมเอียงของอุปกรณ์ CLPHP ทำจากท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 มิลลิเมตรและ 1 มิลลิเมตร ให้ความร้อนโดยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80°C และให้ความเย็นโดยน้ำผสมกับเอทเทอรีนไกล์คอล อย่างละ 50 % โดยปริมาตร โดยจำนวนโค้งเลี้ยวในส่วนของ evapolator แปรผันตั้งแต่ 5 ถึง 23 โค้งเลี้ยวโดยมีสารทำงานที่ใช้ใน CLPHP คือ น้ำ เอทานอล และ R-123 ซึ่งผลลัพธ์คืออิทธิพลของแรงโน้มถ่วงที่รุนแรงและจำนวนโค้งเลี้ยวมีผลต่อประสิทธิภาพของ CLPHP รวมทั้งสมบัติทางกายภาพของสารทำงานก็มีผลต่อประสิทธิภาพของ CLPHP ด้วยเช่นกัน

บทที่ 3
วิธีดำเนินการ

3.1 การสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูล

การสำรวจและรวมรวบข้อมูล เป็นการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบจากแหล่งข้อมูลต่างๆ ซึ่งสามารถแสดงเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

3.1.1 ศึกษาการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ประกอบไปด้วย

- ลักษณะการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ
- การสร้างท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ สารทำงาน และอัตราการเติมสารทำงาน
- ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

3.1.2 รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับข้าวเปลือก คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ค่าความหนาแน่น ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน วิธีการเก็บรักษาข้าวเปลือกแบบต่างๆ

3.1.4 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับขนาดของถังที่เก็บข้าวเปลือกขนาด 500 กิโลกรัม

3.2 ตัวแปรในการทดสอบ

3.2.1 ตัวแปรควบคุม

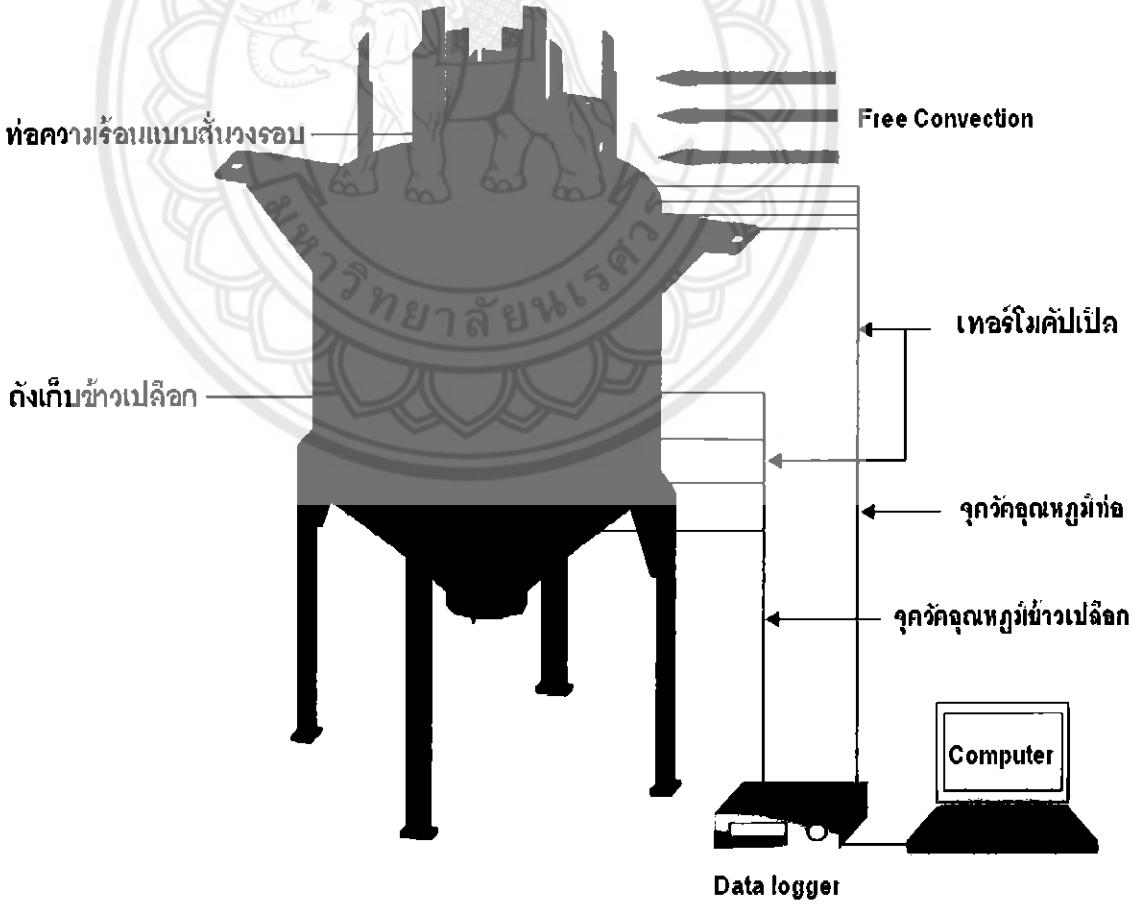
- ข้าวเปลือกสุพรรณ 4
- ถังเก็บข้าวเปลือก 500 กิโลกรัม
- ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบทำจากท่อคาปิลลารี่ทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.4 มิลลิเมตร มีความยาวส่วนทำระเหย 50 เซนติเมตร มีจำนวนโค้งเลี้ยว 20 โค้งเลี้ยว และใช้ R-134a เป็นสารทำงาน โดยอัตราการเติมสารทำงาน 50% ของปริมาตรภายในท่อ
- ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น 26%

3.2.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

- เก็บรักษาข้าวเปลือกโดยที่ไม่มีการระบายความร้อน
- เก็บรักษาข้าวเปลือกโดยที่มีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบช่วยระบายความร้อน

3.3 หลักการทำงานของระบบระบายความร้อนด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

การทำงานของระบบระบายความร้อนข้าวเปลือกที่ใช้ชุดท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ดังรูปที่ 3.1 เมื่อมีการเก็บข้าวเปลือกไว้ในถังเก็บข้าวเปลือก ข้าวเปลือกจะเกิดการหายใจทำให้เกิดความร้อนขึ้น ความร้อนดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งจะทำให้ส่วนทำระเหยของท่อความร้อนที่อยู่ในถังนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น สารทำงานที่บรรจุอยู่ในส่วนทำระเหยเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น จะเกิดการเดือดทำให้เกิดฟองไอขึ้น ฟองไอเกิดการขยายตัวทำให้เกิดแรงดัน เมื่อความร้อนเพิ่มขึ้นแรงดันก็จะสูงขึ้นและจะเกิดแรงขับผลักแท่งของเหลวให้เคลื่อนที่ไปยังส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำ (ส่วนควบแน่น) แล้วแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศภายนอกโดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติจากผิวท่อส่วนควบแน่นไปยังอากาศ เมื่อฟองไอเกิดการกลั่นตัวที่ส่วนนี้ ฟองไอจะยุบตัวจะทำให้แรงดันลดลง ฟองไอก็จะไหลกลับลงมายังส่วนทำระเหยของท่อ เพื่อรับความร้อนจากข้าวเปลือกอีกครั้ง

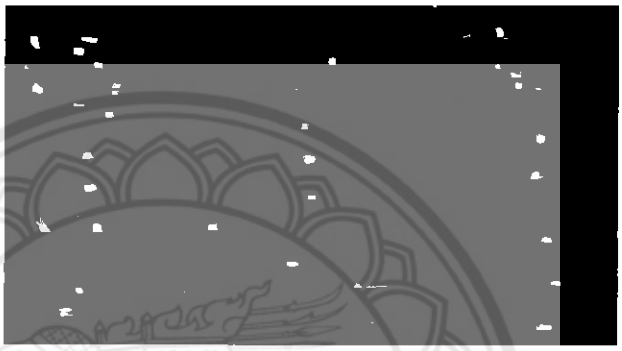


รูปที่ 3.1 ถังเก็บข้าวเปลือกที่ระบายความร้อนด้วย CLPHP

3.4 ขั้นตอนการสร้างและติดตั้งท่อความร้อน

3.4.1 การสร้างท่อความร้อน

3.4.1.1 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ทำมาจากท่อคาปิลลารีทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.4 มิลลิเมตร มาขดเป็นวงรอบโดยแบ่งเป็น 2 ส่วนคือส่วนทำระเหยมีความยาว 50 เซนติเมตร และส่วนควบแน่นยาว 100 เซนติเมตร เป็นจำนวน 20 วงรอบ ดังรูปที่ 3.2

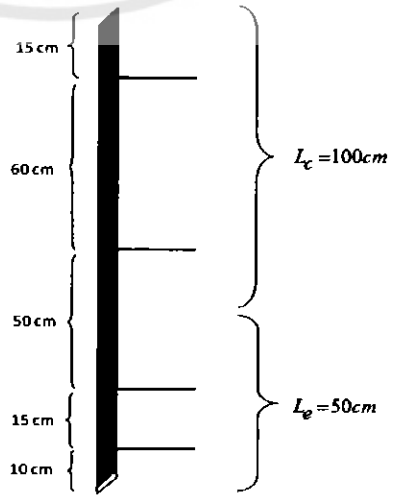


รูปที่ 3.2 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

3.4.1.2 นำท่อที่เชื่อมปลายท่อทั้งสองด้านเข้าด้วยกันแล้วไปติดตั้งกับชุดเติมสารทำงานเพื่อทำให้ภายในท่อเป็นสุญญากาศ และเพื่อทดสอบว่ามีรอยรั่วหรือไม่ จากนั้นเติมสารทำงานเข้าท่อ แล้วทำการเชื่อมปิดปลายท่อ

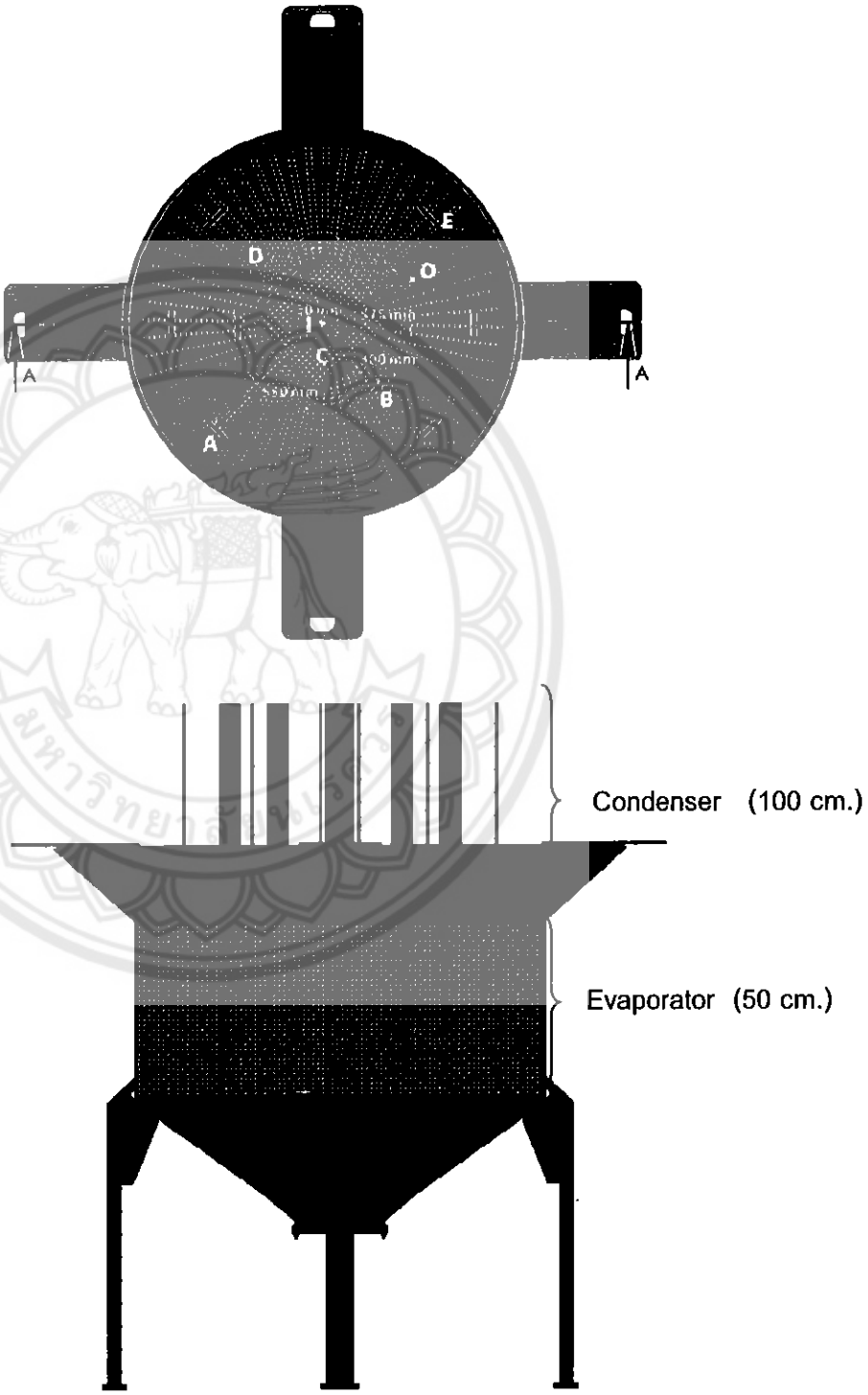
3.4.2 การติดตั้งท่อความร้อน

3.3.2.1 นำสายเทอร์โมคัปเปิล มาติดตั้งกับท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่เติมสารทำงานเรียบร้อยแล้ว โดยติดตั้ง 4 จุด แบ่งเป็นติดตั้งที่ส่วนทำระเหย 2 จุดและส่วนควบแน่น 2 จุด ดังรูปที่ 3.3



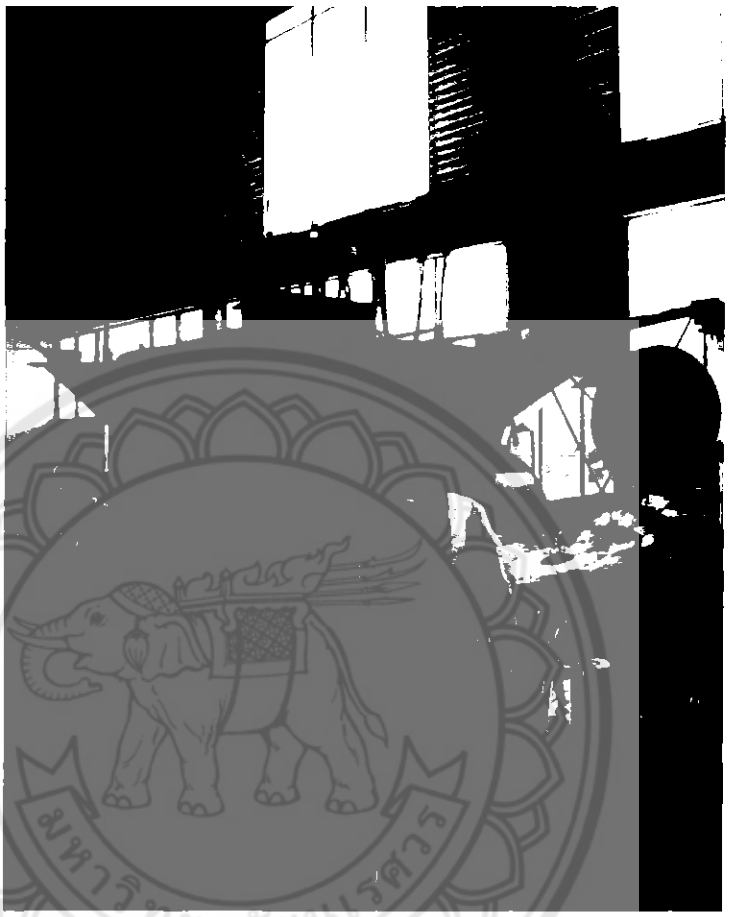
รูปที่ 3.3 แสดงจุดที่ติดเทอร์โมคัปเปิลบนผิวท่อ

3.4.2.2 นำท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ไปติดตั้งลงในถังเก็บข้าวเปลือก ทำมุมเอียง 90 กับแนวระดับ โดยจัดวางท่อ เป็น 3 วงรอบตามแนวรัศมี และมีชุดท่อที่ติดเทอร์โมคัปเปิลจำนวน 5 ชุด ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงรูปแบบการติดตั้งท่อ

3.4.2.3 ต่อสายเทอร์โมคัปเปิลทั้งหมดเข้ากับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ

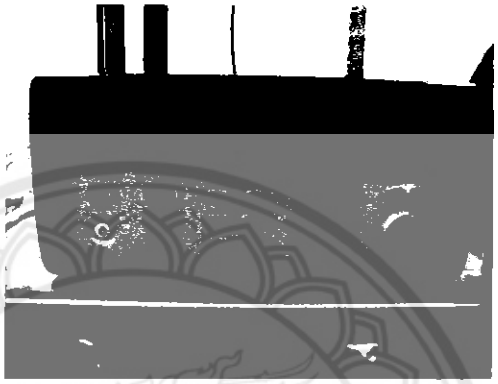


รูปที่ 3.5 รูปแสดงการต่อสายเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ

3.5 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด

3.5.1 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger)

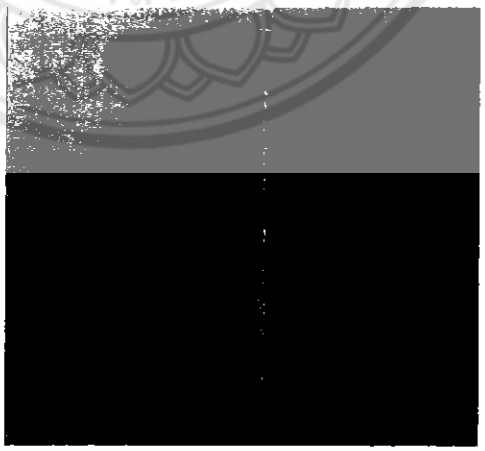
ยี่ห้อ Agilent รุ่น 34970 ขนาด 40 ช่องสัญญาณ มีความแม่นยำ ± 0.003°C ความละเอียด 1°C ช่วงการวัด -100 ถึง -1200 ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger)

3.5.2 เทอร์โมคัปเปิล

ยี่ห้อ Omega Type K ชนิด Chromel-Alumel ใช้ร่วมกับเครื่องบันทึกข้อมูลในข้อ 3.5.1 มีช่วงการวัดอุณหภูมิ -40 – 1200 ความแม่นยำ ± 0.0075 % หรือ ± 2.5 °C ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เทอร์โมคัปเปิล

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

3.5.3 ชุดเติมสารทำงาน

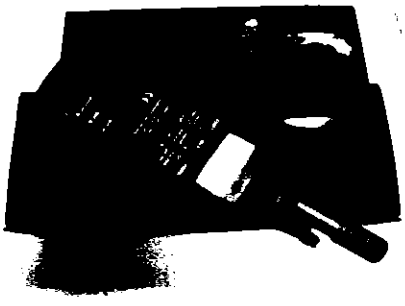
เป็นชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเติมสารทำงานเข้าสู่ท่อความร้อน ซึ่งประกอบด้วย ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump), วาล์ว, เกจน์วัดความดัน (Pressure gauge) และสายเติมสารทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.8

รูปที่ 3.8 ชุดเติมสารทำงาน

3.5.4 เครื่องวัดความชื้น

รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความชื้น

3.5.5 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์

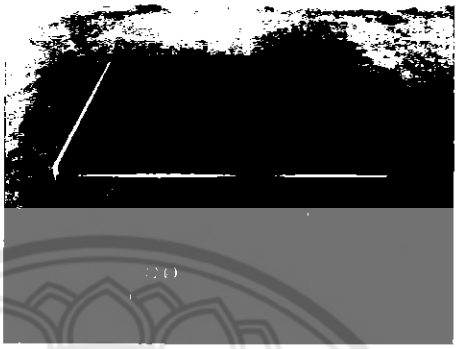


รูปที่ 3.10 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์

i5506645
ว.
ค245ก
2563

3.5.6 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด

ยี่ห้อ Mettler Toledo มีช่วงน้ำหนักที่จะชั่ง 0.005 ถึง 60 kg ใช้ในการชั่งน้ำหนักของสารทำความเย็น ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด

3.6 ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพ

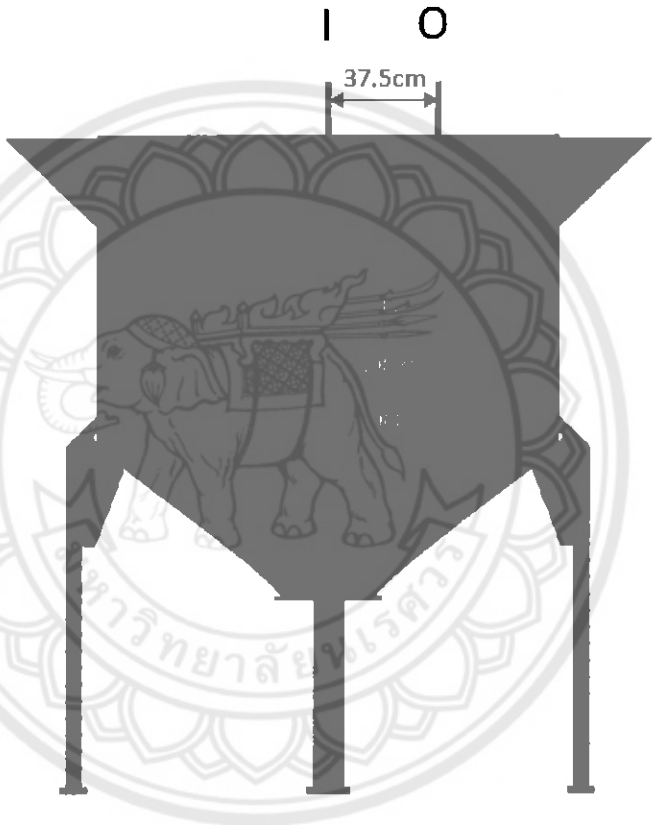
3.6.1 เปิดเครื่องบันทึกอุณหภูมิเพื่อทำการเก็บค่าอุณหภูมิทุกชั่วโมงโดยเริ่มเก็บตั้งแต่วันที่ 26 มกราคม 2554 เวลา 19.00 น. ถึงวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2554 เวลา 24.00 น.

3.6.2 ทำการเก็บความชื้นของข้าวเปลือกทุกๆ 6 ชั่วโมง โดยเก็บครั้งละ 5 จุด จุดละ 3 ซ้ำ

3.6.3 ทำการเก็บความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศทุกๆ 6 ชั่วโมงโดยเก็บครั้งละ 5 จุด จุดละ 3 ซ้ำ

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

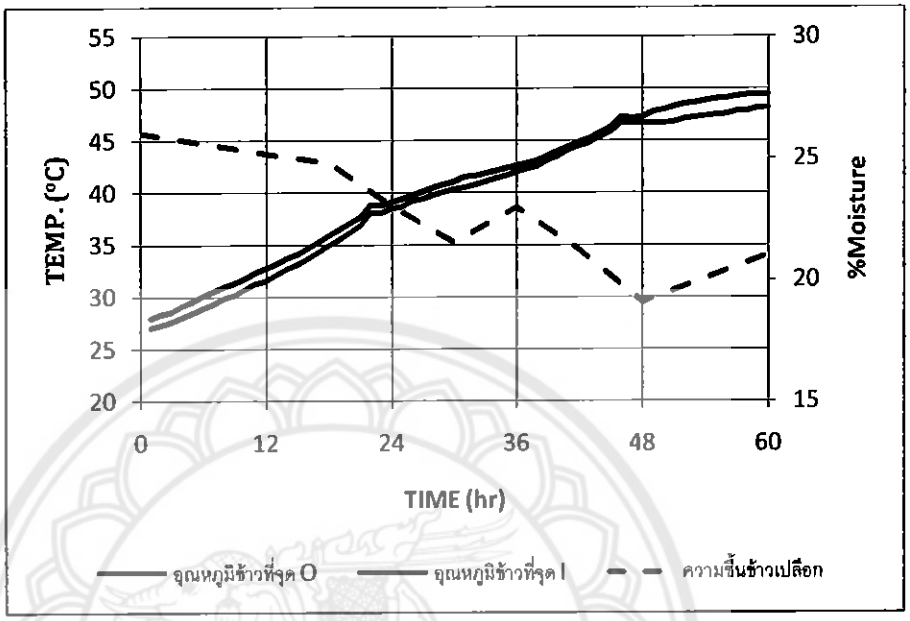
จากการทดลองเก็บข้าวเปลือกในถังที่ไม่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ และที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ มีผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.1 แสดงจุดที่มีการวัดอุณหภูมิในข้าวเปลือก

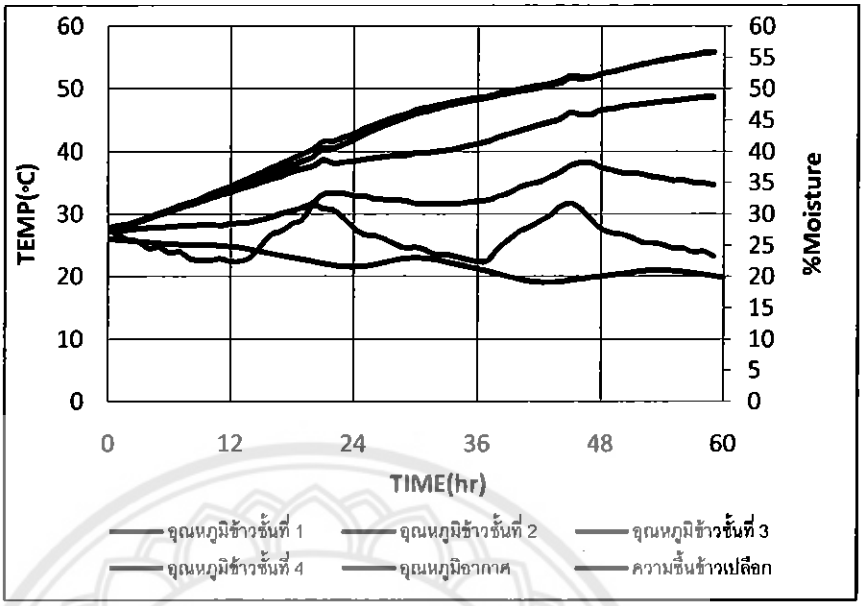
รูปที่ 4.1 เป็นการแสดงจุดที่วัดอุณหภูมิข้าวเปลือกในถังโดยที่จุด I เป็นจุดที่อยู่บริเวณตรงกลางถังเก็บข้าวเปลือกซึ่งจุด I ประกอบไปด้วยจุด I_1 I_2 I_3 I_4 ซึ่งเป็นจุดวัดอุณหภูมิของข้าวเปลือกในแต่ละชั้นดังแสดงในรูปที่ 4.1 และจุด O เป็นจุดที่อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางถังออกมาตามแนวรัศมีเป็นระยะทาง 37.5 เซนติเมตร ซึ่งประกอบไปด้วยด้วยจุด O_1 O_2 O_3 O_4 ซึ่งเป็นจุดวัดอุณหภูมิของข้าวเปลือกในแต่ละชั้นเช่นกัน เพราะฉะนั้นจะทำการเรียกระนาบ ที่จุดมี I_4 และ O_4 ว่าชั้นที่ 4 ระนาบที่มีจุด I_3และ O_3 ว่าชั้นที่3 ระนาบที่มีจุด I_2และ O_2 ว่าชั้นที่2 ระนาบที่มีจุด I_1และ O_1ว่าชั้นที่

4.1 ผลการทดลองเก็บข้าวเปลือกในถังที่ไม่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือกในถังเก็บที่ไม่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ในแนวรัศมี (r)

จากรูปที่ 4.2 จากเส้นกราฟอุณหภูมิของข้าวเปลือกจุด O และ I มีค่าใกล้เคียงกันแต่อุณหภูมิที่จุด I มีอุณหภูมิสูงกว่าเล็กน้อยเนื่องจากจุด I อยู่ตรงกลางถังซึ่งเป็นจุดที่อยู่ห่างจากอากาศที่สุด (ดูรูปที่ 4.1ประกอบ) จากเส้นกราฟอุณหภูมิของข้าวเปลือกและความชื้นของข้าวเปลือกจะเห็นได้ว่าความชื้นของข้าวเปลือกแปรผกผันกับอุณหภูมิของข้าวเปลือก คือ เมื่อเก็บข้าวเปลือกในถังเก็บอุณหภูมิของข้าวเปลือกจะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ส่วนความชื้นจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิอากาศสูงขึ้นจะทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศลดลงทำให้ความชื้นจากข้าวระเหยสู่อากาศได้มากขึ้นจึงทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกลดลง อุณหภูมิที่สูงขึ้นดังกล่าวจะทำให้ข้าวเปลือกมีการเสื่อมสภาพและเกิดเชื้อราในข้าวเปลือกและข้าวเกิดการงอก จึงใช้เวลาในการเก็บเพียง 60 ชั่วโมง โดยเก็บอุณหภูมิเฉลี่ยได้ประมาณ 48 องศาเซลเซียส และความชื้นลดได้เพียง 21 %



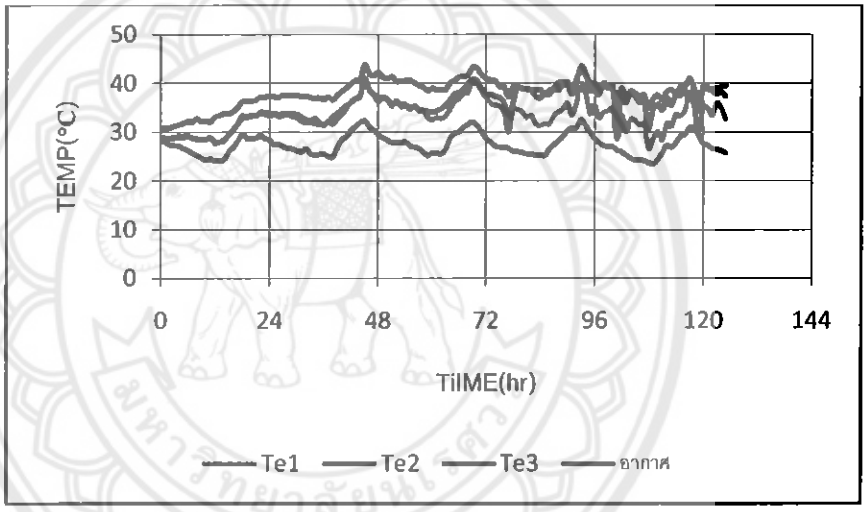
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือกที่เก็บรักษาโดยไม่มีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ในแนวตั้ง (z)

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกในแต่ละชั้นมีค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถเรียงลำดับจากชั้นที่มีอุณหภูมิสูงสุดไปยังชั้นที่มีอุณหภูมิต่ำสุดได้ดังนี้ คือ ชั้นที่ 4 และชั้นที่ 3 มีอุณหภูมิใกล้เคียงกันโดยในช่วงแรก ชั้นที่ 3 จะมากกว่าเล็กน้อย และชั้นที่ 2 ชั้นที่ 1 และอุณหภูมิของอากาศ ตามลำดับ (ดูรูปที่ 4.1ประกอบ) จากกราฟจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของชั้นที่ 4,3,2 มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อระยะเวลาการเก็บเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากภายในถังข้าวเปลือกมีการสะสมความร้อน ซึ่งเกิดจากการหายใจของข้าวเปลือกเมื่อเวลาผ่านไปจึงทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น สำหรับอุณหภูมิของชั้นที่ 1 จะมีลักษณะเส้นแนวโน้มที่คล้ายกันกับอุณหภูมิอากาศเนื่องจากเป็นจุดที่อยู่ติดกับบริเวณผนังด้านล่างสุดของถัง ซึ่งบริเวณผนังนี้จะเกิดการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ทำให้อุณหภูมิชั้นที่ 1 สูญเสียความร้อนที่เกิดจากข้าวเปลือกให้กับบรรยากาศทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของอากาศ นอกจากนี้ความชื้นนั้นลดลงแบบไม่คงที่คือมีการเพิ่มลดตรงกันข้ามกับอุณหภูมิอากาศ เนื่องจากในเวลากลางคืนอุณหภูมิของอากาศลดลงความชื้นสัมพัทธ์อากาศเพิ่มขึ้นทำให้ความชื้นข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นด้วย และจะเห็นได้ว่าถ้าหากปราศจากการระบายความร้อนแล้วอุณหภูมิของข้าวเปลือกเมื่อเวลาผ่านไป เพียง 60 ชั่วโมง อุณหภูมิสุดท้ายของข้าวเปลือกในถังเก็บข้าวเปลือกมีค่าสูงอยู่ในช่วง 35-56 องศาเซลเซียส เลย

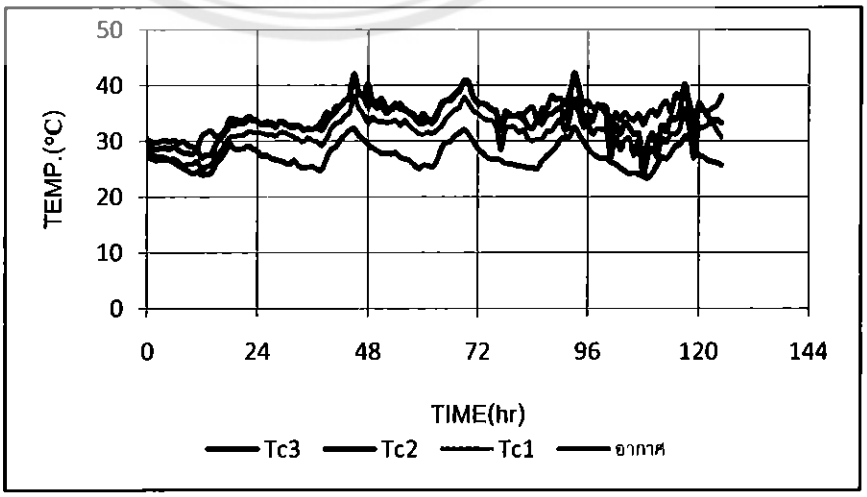
ทีเดียว ซึ่งถือว่าข้าวเปลือกที่มีอุณหภูมิสูงถึงขนาดนี้ จะทำให้ข้าวเปลือกเสื่อมคุณภาพลงอย่างรวดเร็ว เพราะการเก็บรักษาข้าวเปลือกให้คงคุณภาพดีนั้นจะต้องรักษาอุณหภูมิให้คงที่ที่ 28-29 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องมีการระบายความร้อนให้กับข้าวเปลือกเพื่อรักษาคุณภาพของข้าวเปลือก โดยในโครงงานนี้จะอาศัยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ มาช่วยระบายความร้อนในถังเก็บข้าวเปลือก

4.2 ผลการทดลองเก็บข้าวเปลือกในถังที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

4.2.1 อุณหภูมิส่วนทำระเหยและอุณหภูมิส่วนควบแน่น ที่ผิวท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ



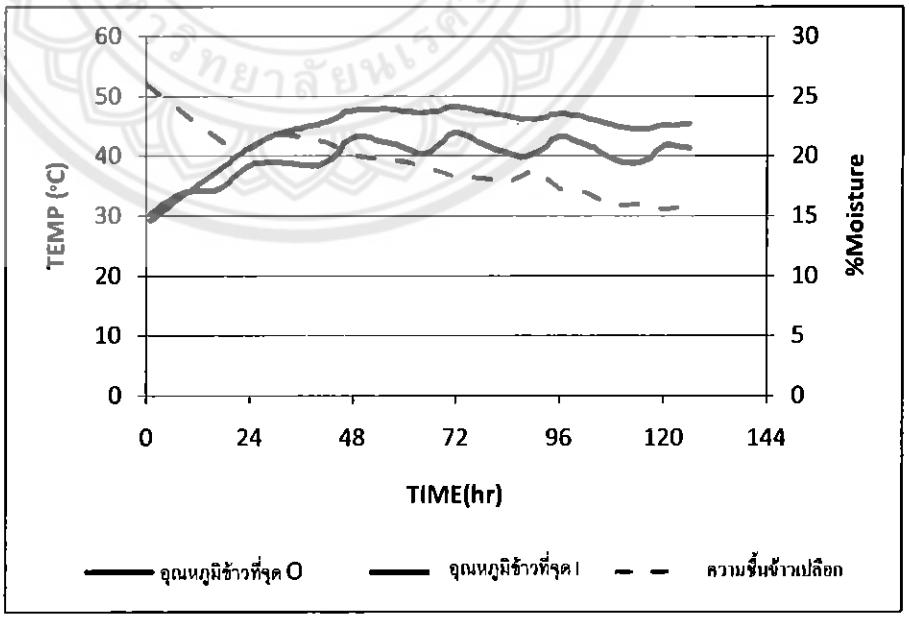
รูปที่ 4.4 แสดงอุณหภูมิส่วนทำระเหย ที่ผิวท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ



รูปที่ 4.5 แสดงอุณหภูมิส่วนควบแน่น ที่ผิวท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

จากรูปที่ 4.4 เป็นการแสดงอุณหภูมิในส่วนทำระเหยและ รูปที่ 4.5 แสดงอุณหภูมิส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบมีการจัดวางท่อตามแนวรัศมีของถัง โดยที่ Te1 และ Tc1 คือ อุณหภูมิส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นของท่อที่อยู่วงในสุด Te2 และ Tc2 คือ อุณหภูมิส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นของท่อที่วงกลาง Te3 และ Tc3 เป็นอุณหภูมิส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่ของท่อวงนอกสุด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 จากกราฟจะเห็นได้ว่าจุดที่มีอุณหภูมิสูงที่สุด คือ วงนอกสุด สำหรับในส่วนทำระเหย (Te3) เท่ากับ 44 องศาเซลเซียสและส่วนควบแน่น (Tc3) เท่ากับ 42 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิต่างกันเพียงเล็กน้อยซึ่งแสดงให้เห็นว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบนั้นสามารถระบายความร้อนออกจากถังข้าวเปลือกได้ดี และที่วงนอกสุด นั้นจะมีภาระในการระบายความร้อนมากกว่า เพราะเป็นบริเวณที่มีการจัดวางของกลุ่มท่อน้อยและเบาบางจึงทำให้มีอุณหภูมิสูงกว่าวงอื่น นอกจากนี้เส้นอุณหภูมิของทั้ง 3 วง จะมีลักษณะแนวโน้มคล้ายของอุณหภูมิของอากาศ

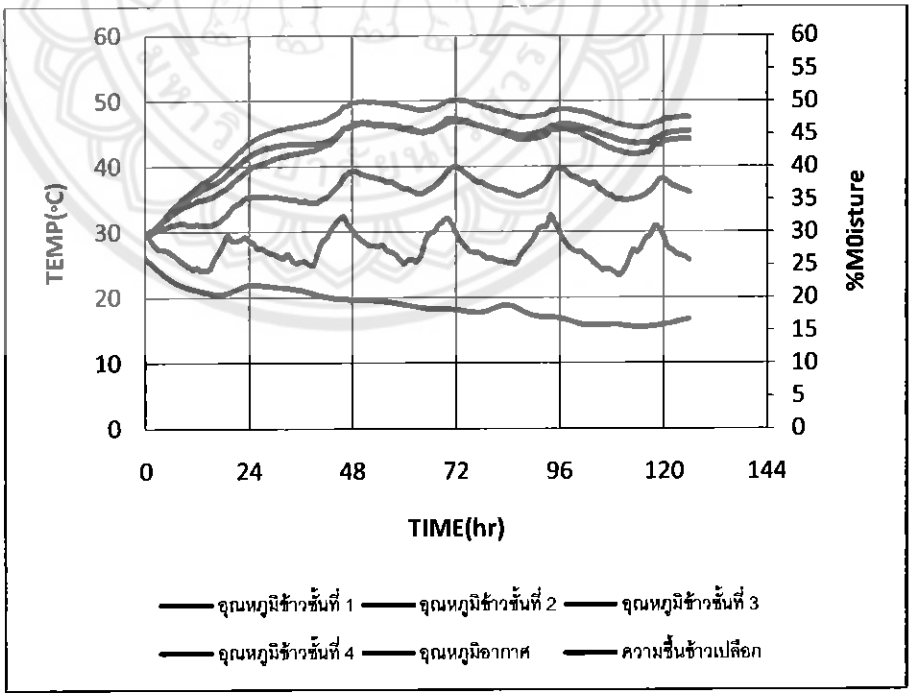
4.2.2 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือกในถังเก็บที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือกในถังเก็บที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ในแนวรัศมี (r)

จากรูปที่ 4.6 จากเส้นกราฟอุณหภูมิของข้าวเปลือกบริเวณจุด O มีอุณหภูมิสูงกว่าจุด I เนื่องจากการจัดเรียงท่อเพราะว่าการจัดเรียงท่อบริเวณจุด I มีความหนาแน่นของท่อมากกว่า (พื้นที่รับความร้อนจากข้าวเปลือกต่อ 1 ท่อ น้อยกว่าบริเวณวงนอก) บริเวณจุด O ซึ่งถ้ามีความหนาแน่นของท่อมากแสดงว่ามีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนมากจึงทำให้สามารถดึงความร้อนออกจากข้าวเปลือกได้มาก

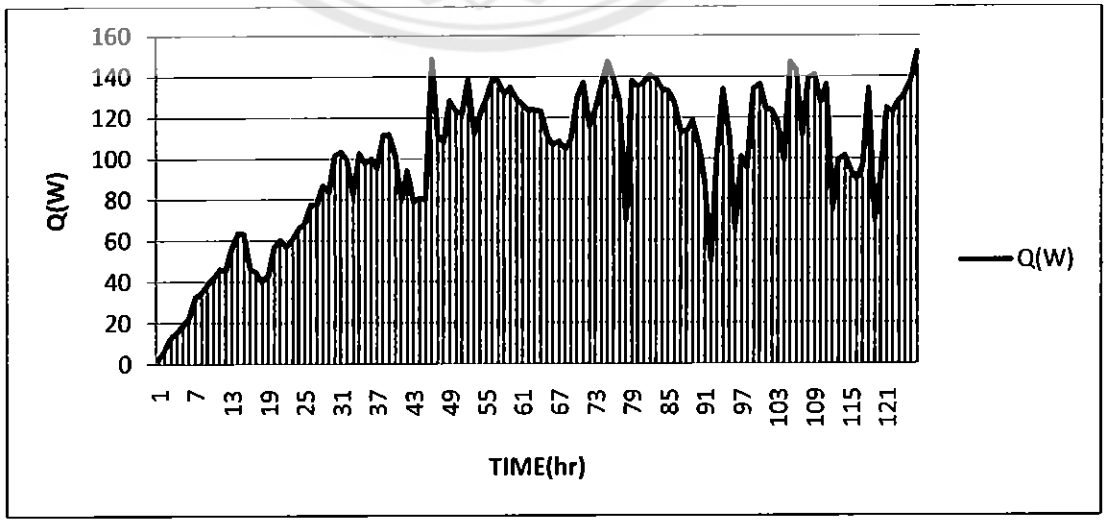
จากเส้นกราฟอุณหภูมิของข้าวเปลือกและความชื้นของข้าวเปลือกจะเห็นได้ว่าความชื้นของข้าวเปลือกแปรผกผันกับอุณหภูมิของข้าวเปลือกเหมือนกับแบบที่ไม่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ เมื่อเทียบกับรูปที่ 4.2 ที่เวลาผ่านไป 60 ชั่วโมงอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ประมาณ 44 องศาเซลเซียสส่วนความชื้นลดได้ 19% ซึ่งดีกว่าแบบที่ไม่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบเพียงเล็กน้อย และเมื่อเก็บไปจนถึง 126 ชั่วโมง เก็บอุณหภูมิเฉลี่ยได้ประมาณ 43 องศาเซลเซียสและความชื้นลดได้ 15.52 %



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือกที่เก็บรักษาโดยมีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ในแนวตั้ง (z)

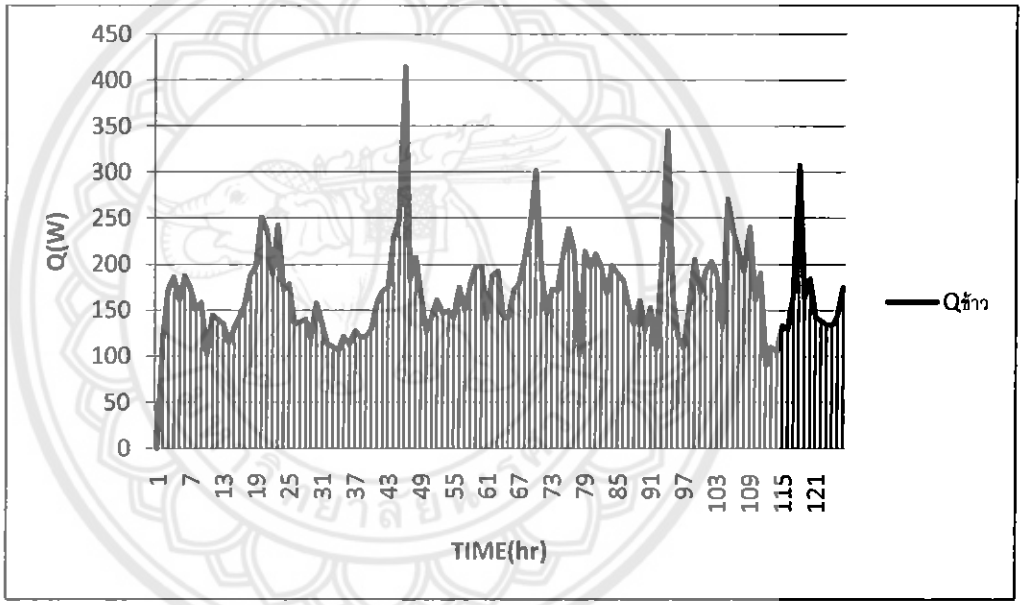
จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกในแต่ละชั้นมีค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถเรียงลำดับจากชั้นที่มีอุณหภูมิสูงสุดไปยังชั้นที่มีอุณหภูมิต่ำสุดได้ดังนี้ คือ ชั้นที่ 3, ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 4 ใกล้เคียงกัน, ชั้นที่ 1 และอุณหภูมิของอากาศ ตามลำดับ โดยความสามารถในการรักษาอุณหภูมิของท่อในแต่ละชั้นของข้าวเปลือก มีดังนี้ จากที่เริ่มมีการเก็บอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจาก 30 องศาเซลเซียส จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 45 ชั่วโมงจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิจะเริ่มคงที่และเริ่มลดลงมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามอุณหภูมิอากาศและเมื่อเวลาผ่านไป 126 ชั่วโมง จุดวัดอุณหภูมิในชั้นที่ 3 สามารถควบคุมอุณหภูมิในชั้นข้าวเปลือกไม่ให้เกิน 50 องศาเซลเซียส และชั้นที่ 1 สามารถรักษาอุณหภูมิข้าวเปลือกได้ต่ำสุด ที่ 35 องศาเซลเซียส และความชื้นลดลงถึง 16% เมื่อเปรียบเทียบกับการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ไม่มีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ดังรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบสามารถระบายความร้อนที่เกิดขึ้นในชั้นข้าวเปลือกได้ แต่เนื่องจากการเก็บรักษาข้าวเปลือกทั่วไป จำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิในชั้นข้าวเปลือกให้ต่ำกว่า 28-29 องศาเซลเซียส ถึงจะป้องกันการเสื่อมคุณภาพของข้าวเปลือกได้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบสามารถนำมาใช้ในการเก็บรักษาข้าวเปลือกได้ หากมีการพัฒนาและศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อ ไม่ว่าจะเป็น ลักษณะการจัดวางท่อ รูปแบบการติดตั้ง และสถานที่ในการเก็บรักษา เป็นต้น

4.2.3 สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อ

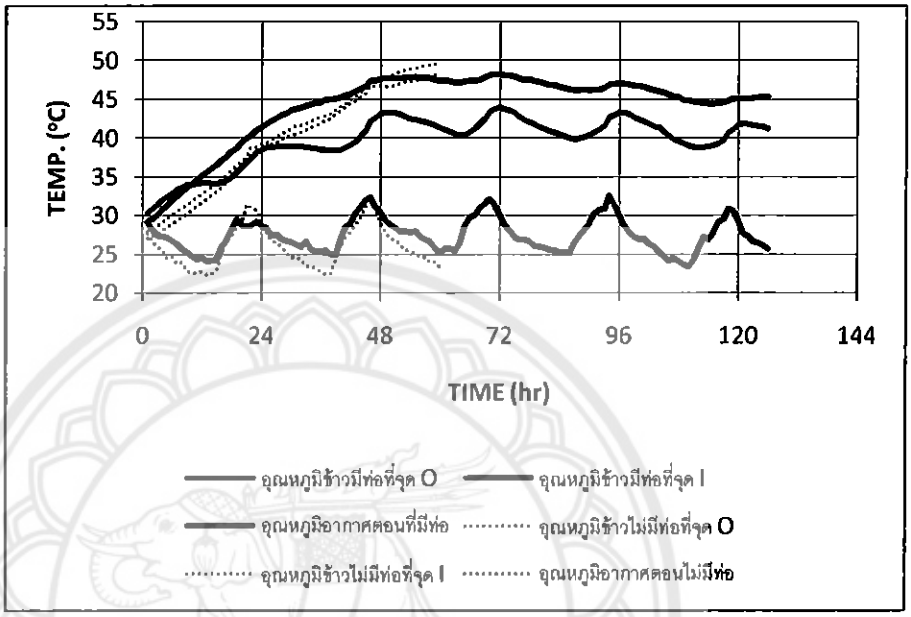
จากรูปที่ 4.8 แสดงอัตราการระบายความร้อนจากท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบสู่อากาศภายนอก ($\dot{Q}$) ซึ่งเป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection) ที่ส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ซึ่งจะเห็นว่าช่วงเวลาการเก็บช่วงแรกๆ ข้าวเปลือกมีความร้อนจากการหายใจน้อย และเมื่อเวลาผ่านๆไปจะค่อยๆสูงขึ้น ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนนี้จะแปรผันตามผลต่างระหว่างอุณหภูมิส่วนควบแน่นและอุณหภูมิอากาศ ซึ่งจะได้พลังงานความร้อนที่ระบายออกจากข้าวเปลือกในระยะเวลา126 ชั่วโมงเท่ากับ 45.18 MJ ซึ่งก็คือพื้นที่ใต้กราฟของรูปที่ 4.8 นั่นเอง



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความร้อนที่เกิดจากข้าวเปลือก

จากรูปที่ 4.9 แสดงความร้อนที่เกิดจากข้าวเปลือก ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการหายใจของข้าวเปลือกนั้นแปรผันตามอุณหภูมิอากาศ ซึ่งค่าความร้อนของข้าวจะเพิ่มขึ้นในช่วงกลางวัน ซึ่งจุดสูงสุดนั้นจะอยู่ในช่วงเวลา 16.00 น. และจะลดลงในช่วงกลางคืนซึ่งจุดต่ำสุดจะอยู่ในช่วงเวลา 4.00-8.00 น. ซึ่งจะได้พลังงานความร้อนที่เกิดจากข้าวเปลือกในระยะเวลา 126 ชั่วโมง เท่ากับ 76.57 MJ ซึ่งก็คือพื้นที่ใต้กราฟของรูปที่ 4.9 นั่นเอง

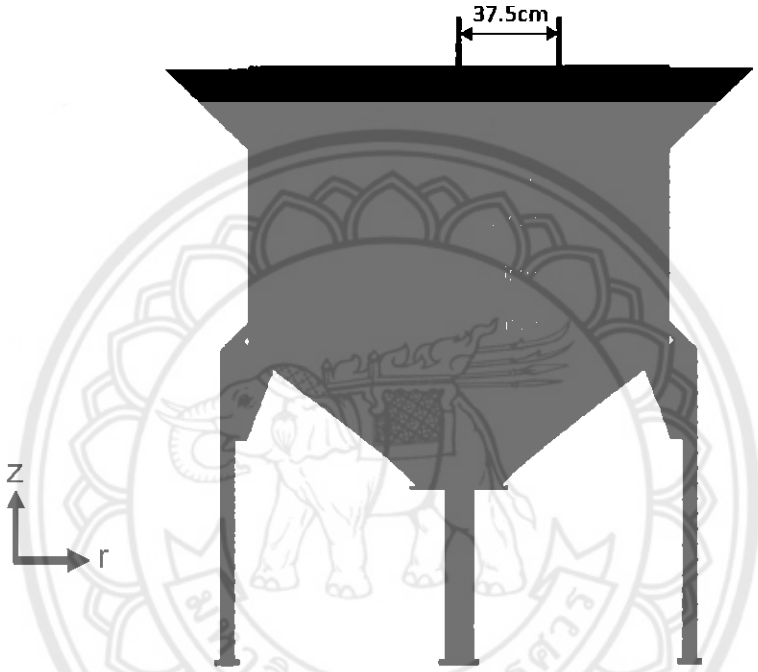
4.3 การเปรียบเทียบอุณหภูมิในถังข้าวเปลือกที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบและไม่ติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ



รูปที่ 4.10 แสดงอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บข้าวเปลือกแบบติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบกับไม่ได้ติดตั้งในแนวรัศมีและอุณหภูมิอากาศ

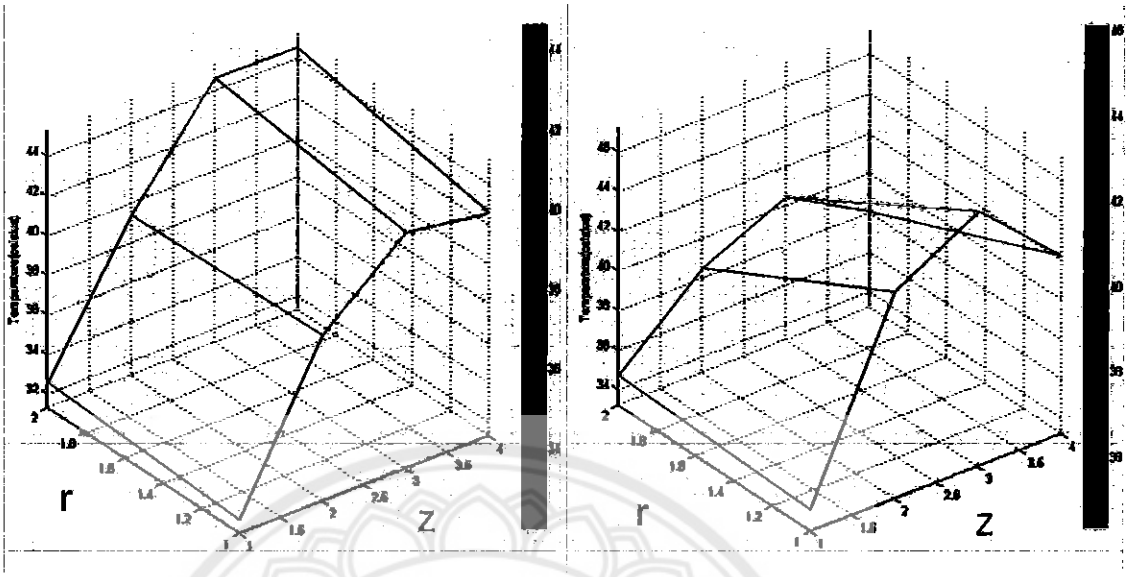
จากรูปที่ 4.10 กราฟอุณหภูมิอากาศทั้งแบบที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบแล้วและแบบที่ยังไม่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ อุณหภูมิของอากาศมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลของอุณหภูมิข้าวเปลือกแบบที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบแล้วและแบบที่ยังไม่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบสามารถเปรียบเทียบกันได้ จากกราฟอุณหภูมิของข้าวเปลือกแบบที่ยังไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวที่จุด O และจุด I มีอุณหภูมิสูงขึ้นแบบราบเรียบและมีความแตกต่างกันน้อยมากทั้งที่อุณหภูมิของอากาศนั้นมีการแกว่งตามช่วงเวลากลางวันกลางคืนแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศหมายความว่าข้าวเปลือกมีการถ่ายเทความร้อนให้อากาศน้อยมากเนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน (ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ)

ส่วนอุณหภูมิของข้าวเปลือกแบบมีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิทั้งจุด O และจุด i มีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยมีการแกว่งของอุณหภูมิตามอากาศ (ตามเวลากลางวันกลางคืน) ซึ่งเป็นเพราะการที่มีท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบเป็นตัวถ่ายเทความร้อนออกจากข้าวเปลือกสู่อากาศ



รูปที่ 4.11 แสดงจุดวัดอุณหภูมิ ประกอบรูปที่ 4.12, 4.13

รูปที่ 4.11 เป็นรูปที่แสดงจุดวัดอุณหภูมิประกอบรูปที่ 4.12 และ 4.13 ซึ่งประกอบไปด้วยจุดที่ (1, 1) (1, 2) (1, 3) (1, 4) (2, 1) (2, 2) (2, 3) (2, 4) โดยตัวเลขในหลักแรกแสดงจุดในแนวรัศมี (r) ซึ่งประกอบด้วยจุดที่ 2 ซึ่งอยู่ตรงกลางถัง และจุดที่ 1 ซึ่งอยู่ห่างจากกึ่งกลางถังในแนวรัศมีเป็นระยะ 37.5 เซนติเมตร ส่วนตัวเลขหลักที่สองแสดงจุดในแนวแกน (z) ซึ่งมีระยะห่างดังแสดงในรูป 4.11



รูปที่ 4.12 แสดงอุณหภูมิข้าวเฉลี่ย ณ จุดวัดอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บข้าวเปลือกที่ไม่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

รูปที่ 4.13 แสดงอุณหภูมิข้าวเฉลี่ย ณ จุดวัดอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บข้าวเปลือกที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 อุณหภูมิข้าวเปลือกในถังเก็บบริเวณตรงกลางถัง (จุด 2,2 2,3 2,4) ลดลงมาก เนื่องจาก จุดที่ 2,2 2,3 2,4 เป็นจุดที่อยู่ตรงกลางซึ่งมีความหนาแน่นของท่อมากกว่าบริเวณวงนอก(จุด 1,2 1,3 1,4)ซึ่งมีความหนาแน่นของท่อน้อยกว่าทำให้มีพื้นที่แรกเปลี่ยนความร้อนน้อยกว่าแสดงให้เห็นว่าการจัดเรียงท่อมีผลต่อการถ่ายเทความร้อน ส่วนบริเวณจุด 1,1 และจุด 1,2 อุณหภูมิไม่ลดลงเนื่องจากอยู่ตรงบริเวณด้านล่างของถังซึ่งอยู่ใกล้กับผนังท่อจึงมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศอยู่แล้วถึงแม้ว่าจะติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบก็ไม่สามารถลงอุณหภูมิลงไปกว่านี้ได้แล้วเพราะการแลกเปลี่ยนทางผนังด้านล่างง่ายกว่าการที่จะแลกเปลี่ยนผ่านท่อซึ่งมีระยะทางไกลกว่า

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเก็บของข้าวเปลือกในถังทั้งที่ไม่มีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบและที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบระบายความร้อน ทำให้สามารถทราบลักษณะการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกทั้งที่ไม่มีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบและมีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ เพื่อหาสมรรถนะทางความร้อนของการระบายความร้อนในข้าวเปลือกโดยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 จากผลการทดลองของระบบที่ไม่มีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ซึ่งทำการทดลองจำนวน 60 ชั่วโมงจะเห็นได้ว่าในถังข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงขึ้นและมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิดังกล่าวมีผลทำให้เกิดเชื้อราในข้าวเปลือกและข้าวเปลือกมีการเสื่อมสภาพลง ดังนั้นจึงต้องมีการระบายความร้อน

5.1.2 จากผลการทดลองที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ซึ่งใช้เวลาในการเก็บ 126 ชั่วโมง ซึ่งในเวลาการเก็บช่วงแรกอุณหภูมิมีแนวโน้มสูงขึ้นจะเริ่มคงที่และลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง ซึ่งได้อุณหภูมิสุดท้ายของการเก็บอยู่ที่ 44 องศาเซลเซียส ความชื้นลดได้ 15.58 % และมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนอยู่ที่ 59.01 % ซึ่งยังไม่ได้ค่าการเก็บตามที่ต้องการ ซึ่งจะต้องรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกไว้ประมาณ 28-29 องศาเซลเซียสและความชื้นอยู่ที่ 13 % จึงควรมีการปรับปรุงระบบต่อไป

5.1.3 จากผลการทดลองของระบบที่มีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบช่วยในการระบายความร้อนในถังข้าวเปลือกจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิในแนวรัศมีค่าต่างกัน คือจุด I ซึ่งเป็นจุดที่อยู่ตรงกลางถัง (รูปที่ 4.1) มีการติดตั้งกลุ่มท่อหนาแน่นกว่า มีอุณหภูมิน้อยกว่าจุด O ดังนั้นการจัดวางท่อหรือลักษณะการติดตั้งท่อในถังเก็บข้าวเปลือกมีผลต่อการระบายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบมีลักษณะทางกายภาพที่ช่วยให้เกิดการไหลเวียนในทิศทางเดียวทำให้มีค่าการส่งถ่ายความร้อนที่สูงมาก และมีความน่าสนใจที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการส่งถ่ายความร้อน แต่ข้อมูลจากการศึกษาท่อความร้อนชนิดนี้ยังมีไม่มากนักซึ่งทำให้เกิดข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้งาน ดังนั้นจึงควรที่จะมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ

1. ผลของตัวแปรอื่นๆ ที่อาจมีผลต่อการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่น เช่น ผลของมุมการทำงาน ผลของจำนวนโค้งเลี้ยว ผลของความยาวส่วนทำระเหย ผลจากสารทำงาน ผลจากลักษณะการจัดวางและการติดตั้งท่อความร้อน สถานที่ทำการทดลอง เป็นต้น

2. ควรศึกษาการประยุกต์ใช้งานท่อความร้อนแบบสั่นเพื่อใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติของท่อความร้อนแบบสั่นให้มากที่สุด

3. ควรมีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบให้สม่ำเสมอทั่วถึงในถังเก็บข้าวเปลือกเพื่อให้อุณหภูมิในถังมีความสม่ำเสมอซึ่งจะทำให้คุณภาพข้าวเปลือกในแต่ละจุดจะไม่แตกต่างกันด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] Piyanun Charoensawan, Sameer Khandekar, Manfred Groll and Pradit Terdtoon Closed-loop pulsating heat pipes Part A; parametric experimental investigation, 2003

[2] Nathawuth Dussadee, Tanongkiat Kiatsiriroat, Performance analysis and economic evaluation of thermosyphon paddy bluk storage, 2003

[3] มนัส ด้วงท้วม, วันจักร เรืองสกุล, ธนานันต์ เพชรสัมฤทธิ์, ผลของการกระจายอุณหภูมิในข้าวเปลือกที่มีผลต่อสมรรถนะการระบายความร้อนในข้าวเปลือกโดยใช้เทอร์โมไซฟ่อน, 2550

[4] ณัฐวุฒิ ธาราวดี, Effect of diameter ratio on heat transfer characteristic of non-uniform diameter closed loop oscillating heat pipe, 2008

[5] www.ricethailand.go.th

[6] http://cbr-rsc.ricethailand.go.th/seed_1.htm

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดของท่อความร้อนแบบสั่น

หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อมากที่สุดที่ท่อความร้อนชนิดสั่นจะสามารถทำงานได้สำหรับ R134a ดังวิธีต่อไปนี้ จากตารางคุณสมบัติของ R134a ทำงานที่ 40 °C คำนวณหาขนาดของท่อความร้อนที่ใช้สำหรับ R134a

$\sigma = 0.00613 N/m$

$\rho = 1147 Kg/m^3$

$g = 9.81 m/s^2$

$$D_{i,\max} = 2\sqrt{\frac{\sigma}{\rho_l g}}$$

$$D_{i,\max} = \sqrt{\frac{0.00613}{1147 \times 9.81}}$$

$$D_{i,\max} = 1.5mm$$

การคำนวณปริมาณการเติมสารทำงาน

คำนวณปริมาณการเติมสารทำงานได้จากสมการดังต่อไปนี้

ปริมาตรการเติมสทธิ $= V_{total} \times F$

โดย $L = 60m$ $D_i = 1.4mm$ $D_o = 2.2mm$ $L = 60m$ $F = 0.5$

$$A = \frac{\pi}{4} D_i^2$$

$$= 1.539 \times 10^{-6} m^2$$

$$= 1.539 \times 10^{-6} m^2$$

$$V = AL$$

$$= \left(9.236 \times 10^{-6}\right)(60)$$

$$= 9.236 \times 10^{-6} m^3$$

ใช้อัตราการเติมสาร 50%ของปริมาตรท่อ

$$V = \left(9.236 \times 10^{-6}\right) \times \frac{50}{100}$$

$$= 4.618 \times 10^{-6}$$

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$m = \rho v$$

$$m = 1147 \times \left(4.618 \times 10^{-6}\right)$$

$$m = 0.0053kg$$

$$m = 5.3g$$

ดังนั้นจะได้อัตราการเติมสารทำงานเท่ากับ $5.3g$

ตัวอย่างการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

ผิวท่อที่คอนเดนเซอร์มีอุณหภูมิ 306 K ความยาว 1.01 m ท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2.2 mm ถูกพาความร้อนด้วยอากาศที่ 300 K

สมบัติของอากาศ $T_f = \frac{(300+306)}{2} = 303 \approx 300K$

$\nu = 15.89 \times 10^{-6} m^2/s$

$k = 0.0263 W/m \cdot K$

$\beta = 1300 K^{-1}$

$\Pr = 0.707$

จาก $Gr_l = \frac{g\beta L^3 (T_{con} - T_a)}{\nu^2} = 792672800.5$

จาก $Nu_{m,plate} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387(Gr_L \Pr)^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{\Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2$

$= 102.764$

จาก $h_m = \frac{Nu_m k}{L} = 2.67 W/m^2 \cdot K$

อัตราการสูญเสียความร้อนจากท่อ

$\dot{Q}_{loss} = \pi DL(T_{con} - T_a)h_m = 0.111\, W$

ตัวอย่างการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของข้าวเปลือก

เก็บข้าวเปลือกในถัง 500 kg อุณหภูมิข้าวเปลือกในการเก็บมีอยู่ที่ 30.76 °C เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมงอุณหภูมิข้าวเปลือกเพิ่มเป็น 31.36 °C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอยู่ที่ 60 % และถูกพาความร้อนออกจากท่อ 15.46 W

หาค่า C_p จากตาราง ข.3

จะได้ $C_p = 1180 + 3766x$

ซึ่ง $x = 0.294 - 0.046 \times \ln[(-T + 35.703)\ln(RH)]$

$= 0.396 \ \frac{kgH_2O}{kgd.m.}$

นำไปแทนในสมการ C_p จะได้

$C_p = 1180 + 3766(0.396) = 2671.33 \ J/kg^{\circ}C$

จาก $Q_{Paddy} = (mC_p\Delta T)/\Delta t$

$= 222.61 \ W$

จากสมการสมดุลพลังงาน

$$\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_{out}$$

$$\dot{Q}_{gen} - \dot{Q}_{tube} = \dot{Q}_{paddy}$$

จะได้ความร้อนที่เกิดจากการหายใจของข้าวเปลือก

$$\dot{Q}_{gen} = \dot{Q}_{paddy} + \dot{Q}_{tube}$$

$$\dot{Q}_{gen} = 222.61 + 15.46 = 238.07 \ W$$

ภาคผนวก ข.

ตารางคุณสมบัติ

ตาราง ข.1 แสดงคุณสมบัติของอากาศ

TABLE A.4 Thermophysical Properties of Gases at Atmospheric Pressure[a]

T (K)	ρ (kg/m^3)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m^2)	$\nu \cdot 10^6$ (m^2/s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m^2/s)	Pr
Air							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536
Ammonia (NH_3)							
300	0.6894	2.158	101.5	14.7	24.7	16.6	0.887
320	0.6448	2.170	109	16.9	27.2	19.4	0.870
340	0.6059	2.192	116.5	19.2	29.3	22.1	0.872
360	0.5716	2.221	124	21.7	31.6	24.9	0.872
380	0.5410	2.254	131	24.2	34.0	27.9	0.869

ตาราง ข.2 แสดงคุณสมบัติของ R134a

Thermophysical properties of refrigerants tested at 40 °C

	P (kPa)	ρ_f (kg m^{-3})	ρ_g (kg m^{-3})	C_{pf} (kJ kg^{-1} K^{-1})	h_{fg} (kJ kg^{-1})	k_f (mW m^{-1} K^{-1})	μ_f (μPa·s)	σ (N m^{-1})	Φ^a
R22	1534	1129	66.7	1.339	166.6	76.9	139.4	0.00604	2.11
R134a	1017	1147	50.0	1.498	163.0	74.7	163.4	0.00613	2.04
R407C[b]	1640	1080	73.0	1.626	168.4	81.2	129.6	0.00521	2.43
R410A[b]	2414	979	103.1	1.917	159.9	87.7	97.8	0.00303	3.04

ตาราง ข.3 แสดงคุณสมบัติของข้าวเปลือก

Property	Unit	Reference
$\rho_{paddy} = 1.029(1456 + 705x)$	kg/m^3	Lague and Jenkins(1991)
$C_{p,paddy} = 1180 + 3766x$	$J/kg^{\circ}c$	Lague and Jenkins(1991)
$k_{paddy} = (0.0637 + 0.0958M)/(0.656 - 0.475M)$	$W/m.K$	Lague and Jenkins(1991)
$x = 0.294 - 0.046 \times \ln[(-T + 35.703)\ln(RH)]$	$\frac{kgH_2O}{kgd.m.}$	ASAE(2002)
$\Delta H_v = 2.357 \times 10^6$	J/kg	Istadi and Sitompul(2002)
$D_{eff} = 1.165 \times 10^{-5}$	m^3/s	Istadi and Sitompul(2002)

ประวัติผู้ทำโครงงาน

ชื่อ : นาย คเณศ มูลเทพ

วัน เดือน ปีเกิด : วันที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2532

ภูมิลำเนา : บ้านเลขที่ 64/14 ถ.ลูกเสือ2 ต.ในเมือง อ.ในเมือง จ.ชัยนาท

การศึกษา : ระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนชัยนาทพิทยาคม

: ปัจจุบันศึกษาที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก

ชื่อ : นาย ณัฐพล รัตนะ

วัน เดือน ปีเกิด : วันที่ 11 มกราคม พ.ศ.2531

ภูมิลำเนา : บ้านเลขที่ 182 ต.กลางเวียง อ.เวียงสา จ.น่าน

การศึกษา : ระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนสา

: ปัจจุบันศึกษาที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก

ชื่อ : นาย เอกชัย อักษรผดุงกุล

วัน เดือน ปีเกิด : วันที่ 18 กรกฎาคม พ.ศ.2531

ภูมิลำเนา : บ้านเลขที่ 38 ม.9 ต.บ่อเกลือเหนือ อ.บ่อเกลือ จ.น่าน

ประวัติการศึกษา : ระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนบ่อเกลือ

: ปัจจุบันศึกษาที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก