การเก็บรักษาข้าวเปลือกโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ

Paddy Storage using Closed-Loop Oscillating Heat Pipes Combined with Aeration

นายหิรัญ ปัญญาอ้าย

นายประสพสันต์ เปลี่ยนศรี

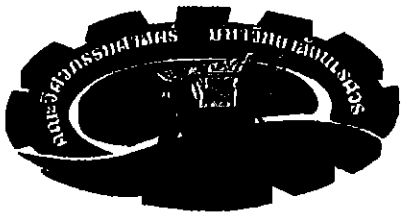
ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 11 ม.ค. 2555
เลขทะเบียน 16997161
เลขเรียกหนังสือ วร.
มหาวิทยาลัยนเรศวร ฉ 7611 2554

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2554



ใบรับรองโครงงานวิศวกรรมเครื่องกล

หัวข้อโครงงาน : การเก็บรักษาข้าวเปลือกโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ (Paddy Storage using Closed-Loop Oscillating HeatPipes Combined with Aeration)

ผู้ดำเนินโครงงาน : นายหิรัญ ปัญญาอ้าย รหัสนิสิต 51380972

นายประสพสันต์ เปลี่ยนศรี รหัสนิสิต 51382136

ที่ปรึกษาโครงงาน : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์

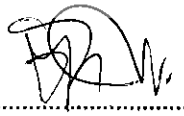
ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา : 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะกรรมการสอบโครงงาน

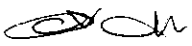
.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์)



.....กรรมการ

(ดร.นินนาท ราชประดิษฐ์)



.....กรรมการ

(ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว)

หัวข้อโครงงาน : การเก็บรักษาข้าวเปลือกโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ

ผู้ดำเนินโครงงาน : นายหิรัญ ปัญญาอ้าย รหัส 51380972
นายประสพสันต์ เปลี่ยนศรี รหัส 51382136

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา : 2554

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีจุดประสงค์เพื่อสร้างระบบการเก็บรักษาข้าวเปลือก ซึ่งมีปริมาณของข้าวเปลือก 500 kg. ที่บรรจุอยู่ในถังทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.5 m. และมีความสูง 1 m. โดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ โดยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ใช้ทำจากท่อแคปิลลารี่ทองแดงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.4 mm. มีส่วนทำระเหยยาวเท่ากับ 60 mm. มีส่วนควบแน่นยาวเท่ากับ 30 mm. และใช้สารทำความเย็น R-134a เป็นสารทำงาน โดยมีอัตราส่วนการเติมที่ 50% ของปริมาตรภายในท่อทั้งหมด โดยมีการเปรียบเทียบอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อนและข้าวเปลือกที่ไม่มีการระบายความร้อน ที่ความชื้นข้าวเปลือก 14% และ26% มาตรฐานเปียก จากการศึกษาพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ไม่มีการระบายความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆเมื่อเวลาผ่านไป 60 ชั่วโมง ข้าวเปลือก 14% มาตรฐานเปียกมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 30.93$^{\circ}C$ มีความชื้นข้าวเปลือกอยู่ที่ 14.1% มาตรฐานเปียก ซึ่งอุณหภูมิสูงขึ้นอาจทำให้ข้าวเปลือกเสื่อมสภาพ และข้าวเปลือก 26% มาตรฐานเปียกมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 45$^{\circ}C$ มีความชื้นข้าวเปลือกอยู่ที่ 25% มาตรฐานเปียก ซึ่งมีอุณหภูมิและความชื้นสูงมากทำให้ข้าวเปลือกเกิดการงอกและข้าวเน่าอย่างรวดเร็ว ขณะที่ข้าวที่ 14%และ 26%มาตรฐานเปียกที่มีการติดตั้งท่อความร้อนร่วมกับพัดลมระบายอากาศจะมีอุณหภูมิลดลง ข้าวเปลือก 14% มาตรฐานเปียกจะมีอุณหภูมิลดลงอย่างต่อเนื่องไป 36 ชั่วโมงและอุณหภูมิจะสูงขึ้นเล็กน้อยจากนั้นจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไปถึง 60 ชั่วโมง ข้าวเปลือกจะมีอุณหภูมิ เท่ากับ 26$^{\circ}C$ และมีความชื้นข้าวเปลือกอยู่ที่ 12.5% ข้าวเปลือก 26% มาตรฐานเปียกอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 45$^{\circ}C$ ในช่วง 0ถึง12 ชั่วโมง เมื่อเวลาผ่านไป 18 ชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยจะลดลงเท่ากับ 28$^{\circ}C$ และเมื่อเวลาผ่านไป 60 ชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 31$^{\circ}C$ และมีความชื้นข้าวเปลือกอยู่ที่ 24%มาตรฐานเปียก ซึ่งระบบการเก็บรักษาข้าวเปลือก 14% มาตรฐานเปียกที่มีการระบายอากาศมีประสิทธิภาพเท่ากับ 35.09% และระบบการเก็บรักษาข้าวเปลือก 26% มาตรฐานเปียกที่มีการระบายอากาศมีประสิทธิภาพเท่ากับ 24.1% จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศสามารถระบายความร้อนที่เกิดขึ้นกับข้าวเปลือก 14% และ 26% มาตรฐานเปียกได้ แต่เนื่องจากข้าวการเก็บรักษาข้าวเปลือกจะต้องอุณหภูมิ 20-30$^{\circ}C$ จึงสามารถรักษาคุณภาพของข้าวเปลือกไว้ได้ดังนั้นจะต้องมีการพัฒนาและศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบระบายความร้อนต่อไป

Project Title	: Paddy Storage using Closed-Loop Oscillating Heat Pipes Combined with Aeration		
Name	: Mr. Hirun Phanyaai	Code	51380972
	Mr.Prasobsun Pliansri	Code	51382136
Project Adviser	: Asst. Prof. Dr. Piyanun Charoensawan		
Department	: Mechanical Engineering		
Academic Year	: 2011		

Abstract

This project aims to construct the storage system of 500 kg paddy contained in the cylindrical bin with 1.5 m diameter and 1 m height by using the close loop pulsating heat pipe (CLOHP) combined with the aeration. CLOHPs were made of a copper capillary tube with 1.4 mm inside diameter, 0.6 m evaporator length and 0.3 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 CLOHP with aeration was compared to that without cooling system. The temperature of paddy without cooling clearly increased along the time and at 60 h the paddy temperature of initial moisture content of 14% wet basis was about 30.93$^{\circ}C$ and its moisture content was 14.1% wet basis at 60 h. At this high temperature, the paddy was devalued dramatically. The temperature and moisture content of paddy with initial moisture content of 26% wet basis was about 45$^{\circ}C$ and 25% wet basis at 60 h. For paddy cooled by CLOHP and aeration, the temperature of paddy was stable and became lower. At 60 h, the temperature and moisture content of paddy with cooling system and initial moisture content of 14% wet basis were about 26$^{\circ}C$ and 12.5% wet basis respectively. Their values were about 31$^{\circ}C$ and 24% wet basis for initial moisture content of 26% wet basis. The thermal efficiency of cooling system of paddy with initial moisture content of 14% wet basis was 35.09% and it was 24.1% for paddy with initial moisture content of 26% wet basis. In order to avoid the paddy damage, the proper temperature of paddy rice storage is usually about 20-30$^{\circ}C$. It is seen that the cooling system constructed in this project can fairly remove heat generated in paddy buck. Therefore the important factors that affected on paddy buck storage with CLOHP cooling combined with aeration should be continually studied.

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานเรื่องการเก็บรักษาข้าวเปลือกโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ ซึ่งจะสำเร็จไม่ได้ ถ้าปราศจากบุคคลที่มีความสำคัญดังต่อไปนี้ ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน ผู้ซึ่งให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา และให้แนวทางการแก้ปัญหาตลอดจนจนให้ความไว้วางใจในการทำงานเป็นอย่างดี ขอขอบพระคุณครูช่างภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้ความกรุณาให้คำแนะนำในเรื่องวิธีการใช้เครื่องมือต่างๆและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์

ขอขอบคุณ นายพงษ์ศักดิ์ เกียรติเจริญศิริและนายศุภชัย ชุมนุมวัฒน์ นิสิตปริญญาโท ขอขอบคุณห้องวิจัยท่อความร้อนและระบบความร้อน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่งเป็นสถานที่ในการจัดทำโครงงานจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ เอาใจใส่ดูแลและสนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่างด้วยดี โดยเฉพาะการให้การศึกษาที่ดีแก่ผู้จัดทำตลอดมา

หิรัญ ปัญญาอ้าย
ประสพสันต์ เปลี่ยนศรี

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงงาน	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญรูปภาพ	ช
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ญ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตการศึกษา	4
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	5
1.6 ระยะเวลาและแผนปฏิบัติงาน	6
1.7 สถานที่ปฏิบัติงาน	6
1.8 อุปกรณ์ที่ใช้	6
1.9 งบประมาณ	7

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเก็บรักษาข้าวเปลือก	8
2.2 การหายใจของข้าวเปลือก	10
2.3 ทฤษฎีการพาความร้อน	11
2.4 ทฤษฎีการอบแห้งที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน	13
2.5 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์	15
2.6 อัตราส่วนการเติมสารทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	15
2.7 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	
3.1 สำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูล	17
3.2 ตัวแปรในการทดสอบ	18
3.3 หลักการทำงานของระบบ	18
3.4 ขั้นตอนการสร้างและติดตั้งท่อความร้อน	18
3.5 การติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิข้าวเปลือก	21
3.6 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด	22
3.7 ขั้นตอนการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	24
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 การทดลองเก็บข้าวเปลือกที่มีความชื้น 14% เก็บในสภาพปกติไม่มีการใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ	25
4.2 การทดลองเก็บข้าวเปลือกที่มีความชื้น 14 % มาตรฐานเปียกโดยมีการใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ	28
4.3 การเปรียบเทียบอุณหภูมิในถังข้าวเปลือกที่ความชื้น 14% มาตรฐานเปียกโดยมีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ	31
4.4 การทดลองเก็บข้าวเปลือกที่มีความชื้น 26% เก็บในสภาพปกติไม่มีการใช้ท่อความร้อนร่วมกับการระบายอากาศ	32
4.5 การทดลองเก็บข้าวเปลือกที่มีความชื้น 26% มาตรฐานเปียก โดยมีการใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ	34
4.6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิในถังข้าวเปลือกที่ความชื้น 26% มาตรฐานเปียกโดยมีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ	38
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุปผลการทดลอง	39
เอกสารอ้างอิง	40

สารบัญ (ต่อ)

ภาคผนวก	หน้า
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ	42
ภาคผนวก ข ตารางแสดงคุณสมบัติ	47
ภาคผนวก ค ข้อมูลที่ใช้คำนวณ	51

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 การติดตั้งระบบท่อความร้อนชนิด เทอร์โมไซฟอน	2
รูปที่ 1.2 กราฟแสดงผลจากการใช้ท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนระบายความร้อนและลดความชื้น	2
รูปที่ 1.3 กราฟแสดงผลจากการใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนร่วมกับการระบายอากาศลดอุณหภูมิและความชื้น	3
รูปที่ 1.4 แบบโครงสร้างระบบที่ใช้ทดลอง	6
รูปที่ 2.1 การเก็บในสภาพปกติ ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ	8
รูปที่ 2.2 การเก็บในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว	9
รูปที่ 2.3 การเก็บในสภาพที่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ	9
รูปที่ 2.4 การเก็บในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ	10
รูปที่ 3.1 แบบโครงสร้างถังเก็บข้าวเปลือก และการติดตั้งอุปกรณ์เก็บข้อมูลของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	17
รูปที่ 3.2 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	19
รูปที่ 3.3 ระยะและตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบนท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	19
รูปที่ 3.4 ด้านหน้าของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ใส่ในถังข้าวเปลือก	20
รูปที่ 3.5 ด้านบนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ใส่ในถังข้าวเปลือก	20
รูปที่ 3.6 การติดตั้งท่อความร้อนลงในถังข้าวเปลือก	21
รูปที่ 3.7 แบบโครงสร้างถังเก็บข้าวเปลือก และการติดตั้งอุปกรณ์เก็บข้อมูลของข้าวเปลือก	21
รูปที่ 3.8 ชุดเติมสารทำงาน	22
รูปที่ 3.9 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger)	22
รูปที่ 3.10 เทอร์โมคัปเปิล	23
รูปที่ 3.11 เครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือก	23
รูปที่ 3.12 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์	23
รูปที่ 4.1 แสดงค่าอุณหภูมิแต่ละหลักและแต่ละชั้นของข้าวเปลือกที่ใช้การคำนวณ	25
รูปที่ 4.2 แสดงค่าอุณหภูมิในส่วนระเหยและส่วนควบแน่นของท่อที่ใช้การคำนวณ	26
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือก 14% มาตรฐานเปียกในถังเก็บที่ไม่มีการติดตั้งท่อความร้อนและพัดลมระบายอากาศ	26
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ความชื้น 14% มาตรฐานเปียกในถังเก็บในแต่ละชั้นที่ไม่มีการติดตั้งท่อความร้อนและพัดลมระบายอากาศ	27

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.5 เป็นการแสดงอุณหภูมิในส่วนทำระเหย และอุณหภูมิในส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	28
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความชื้นข้าวเปลือก 14% มาตรฐานเปียกในถังเก็บที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ	29
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ความชื้น 14% มาตรฐานเปียกในถังเก็บในแต่ละชั้นโดยมีการติดตั้งท่อความร้อนร่วมกับพัดลมระบายอากาศ	29
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบรักษาข้าวเปลือกที่ความชื้น 14% มาตรฐานเปียก	30
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสร้างความร้อนของข้าวเปลือกและเวลา	31
รูปที่ 4.10 แสดงอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บข้าวเปลือกที่เก็บแบบปกติและเก็บแบบระบายอากาศ	31
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือก 26% มาตรฐานเปียกในถังเก็บที่ไม่มีการติดตั้งท่อความร้อนและพัดลมระบายอากาศ	32
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิข้าวเปลือก 26% มาตรฐานเปียกในถังเก็บในแต่ละชั้นที่ไม่มีการติดตั้งท่อความร้อนและพัดลมระบายอากาศ	33
รูปที่ 4.13 แสดงอุณหภูมิในส่วนทำระเหย และอุณหภูมิในส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	34
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความชื้นข้าวเปลือก 26% ในถังเก็บที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ	35
รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิข้าวเปลือก 26%ในถังเก็บในแต่ละชั้นโดยมีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับพัดลมระบายอากาศ	35
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ความชื้น 26% มาตรฐานเปียกและเวลา	36
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ความร้อนระหว่างอัตราการสร้างความร้อนของข้าวเปลือกและเวลา	37
รูปที่ 4.18 แสดงอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ความชื้น 26% มาตรฐานเปียกในถังเก็บข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อนและไม่มีการระบายความร้อน	38

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
F	อัตราการเติมสาร	-
DML	การสูญเสียมวลแห้ง	-
t	เวลา	hr
T_b	อุณหภูมิข้าวเปลือก	^oC
M_w	ความชื้นข้าวเปลือก	% $wetbasis$
Q_{paddy}	ค่าความร้อนของข้าวเปลือก	W
m	มวลของข้าวเปลือกในปริมาตรควบคุม	kg
$D_{i,max}$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสูงสุด	mm
σ	แรงตึงผิวของของเหลว	N/m
ρ_l	ความหนาแน่นของของเหลว	kg/m^3
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	m/s^2
L_e	ระยะส่วนทำระเหย	m
L_c	ระยะส่วนควบแน่น	m
n	จำนวนโค้งเลี้ยว	-
D_i	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	mm
D_o	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	mm
r	รัศมีของโค้งเลี้ยว	mm
$\dot{Q}_{loss}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ออกจากท่อ	W
A	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน	m^2
T_c	อุณหภูมิพื้นที่ผิวของท่อส่วนควบแน่น	K
T_a	อุณหภูมิอากาศ	K
h_m	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาพื้นผิวของส่วนควบแน่น	W/m^2K
Gr_l	Grashof Number	-
β	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร	K^{-1}
ν	Kinematic Viscosity	m^2/s
k	ค่าการนำความร้อนของอากาศ	$W/m.K$
Pr	Prandtl Number	-
Nu_m	ค่าความจุความร้อนของข้าวเปลือก	$kJ/kg.K$

บทที่ 1
บทนำ

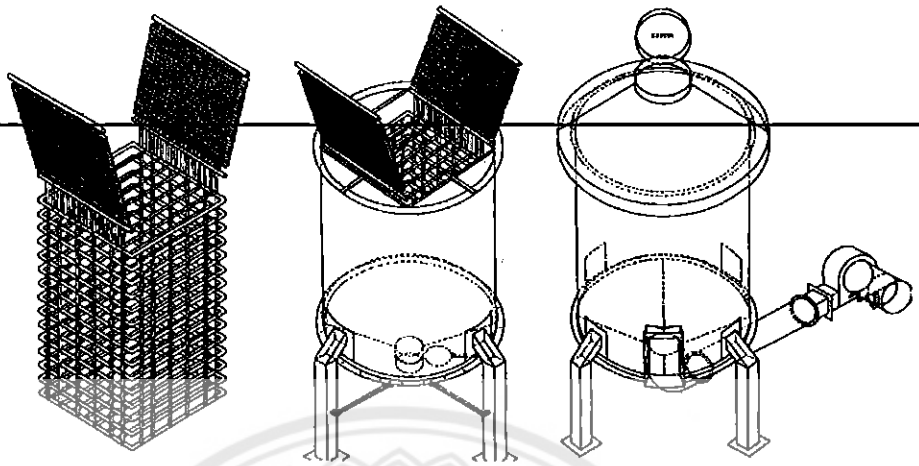
1.1 ที่มาและความสำคัญ

ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่มีความอุดมสมบูรณ์ทางทรัพยากรธรรมชาติ ประชากรส่วนใหญ่ในประเทศประกอบอาชีพเกษตรกรรมเป็นหลัก ผลผลิตทางการเกษตรที่สำคัญอย่างหนึ่งในการประกอบอาชีพเกษตรกรรม คือ ข้าว นอกจากจะใช้บริโภคแล้ว ยังเป็นพืชเศรษฐกิจในการค้าและการส่งออกทำให้มีรายได้เข้าประเทศเพิ่มมากขึ้นแต่ปัญหาที่มักเกิดขึ้นกับเกษตรกร คือ การเก็บรักษาข้าวหลังการเก็บเกี่ยวเนื่องจากข้าวเปลือกมีความชื้นที่เกิดจากกระบวนการหายใจของข้าวเปลือกซึ่งเป็นไปตามสมการเคมี

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 2.831 \quad MJ \tag{1.1}$$

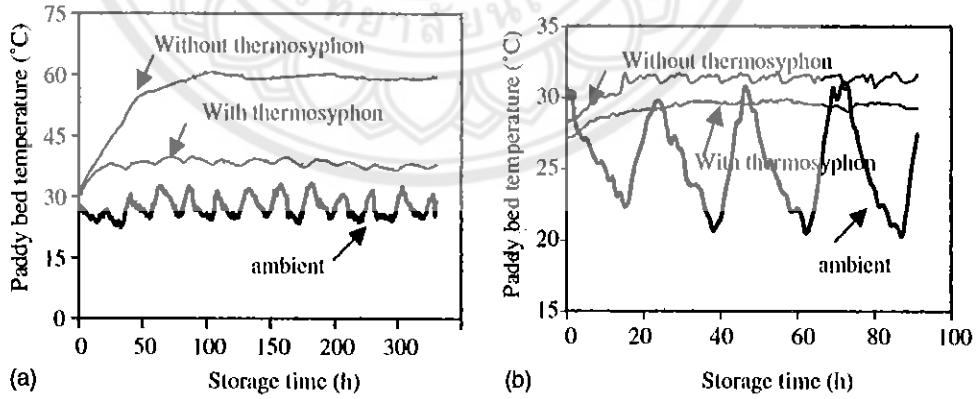
โดยทั่วไปความชื้นและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเก็บรักษาข้าวเปลือกนั้นจะอยู่ในช่วง 10%-14% มาตรฐานเปียกและที่อุณหภูมิ 20–30$^{\circ}C$ ในปัจจุบันการเก็บรักษาข้าวเปลือกมีอยู่ 4 [1] วิธีคือ 1. การเก็บไว้ในสภาพปกติ คือ ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอยู่ส่วนใหญ่เพราะมีการลงทุนน้อยและเสียค่าใช้จ่ายต่ำ แต่โอกาสที่จะเกิดความเสียหายในระหว่างการเก็บรักษาสูง 2.การเก็บโดยมีการควบคุมอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว เช่น การเก็บข้าวเปลือกไว้ในตู้ตู้เย็น หรือในไซโลที่มีการเป่าลมเย็น แต่วิธีนี้จะมีข้อเสีย คือ เสียค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าในแต่ละเดือน 3.การเก็บในสภาพที่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศการเก็บข้าวเปลือกไว้ในภาชนะที่มิดชิดสามารถป้องกันการเคลื่อนที่เข้าออกของอากาศได้และ 4.การเก็บโดยการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและอุณหภูมิซึ่งวิธีการเก็บรักษาข้าวเปลือกโดยการควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ นี้เป็นวิธีการที่ดีที่สุดในการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่มีในปัจจุบัน แต่มีข้อเสียคือ มีการลงทุนและเสียค่าใช้จ่ายในการดูแลสูง แต่ในปัจจุบันได้มีการนำเอาเทคโนโลยีของท่อความร้อนมาประยุกต์ใช้ในการลดอุณหภูมิและลดความชื้นในการเก็บรักษาข้าวเปลือกอีกด้วย จากงานวิจัยของ N. Dussadee และ TKiatsiriroat (2004) [2] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการนำท่อความร้อนชนิด เทอร์โมไซฟอน ในการลดอุณหภูมิ และมีการติดตั้งระบบ ดังรูปที่ 1 โดยใช้โลหะทรงกระบอกซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 m และสูง 1.5 m และมีการติดตั้งชุดท่อทองแดงจำนวน 15 ท่อ วางตัวในแนวตั้งแต่ละท่อทองแดงมีความสูง 1.4 m ทำให้มีพื้นที่การถ่ายเทความร้อน 8.5 m^2 โดยใช้สารทำความเย็น R-22 เป็นสาร

ทำงาน และ ใช้ข้าวเปลือกปริมาณ 1000 kg ที่มีความชื้น 26.9% และ 13.5% มาตรฐานเปียก ในการระบายความร้อน



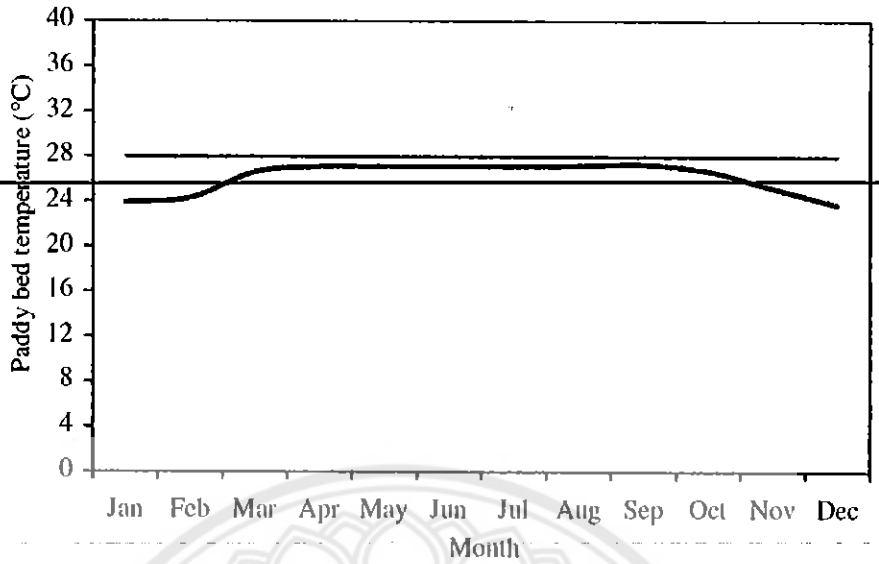
รูปที่ 1.1 การติดตั้งระบบท่อความร้อนชนิด เทอร์โมไซฟอน [2]

ผลจากงานวิจัยการเก็บรักษาข้าวเปลือกโดยใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนระบายความร้อนและลดความชื้นในข้าวเปลือก 1000 kg มีผลดังรูปที่ 1.2 จากรูป (a) เป็นการลดอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ 26.9% มาตรฐานเปียก และรูป (b) เป็นการลดอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ 13.5% มาตรฐานเปียก ซึ่งทั้งสองรูปเป็นการแสดงการลดอุณหภูมิของข้าวเปลือกเทียบกับเวลา จากรูปจะเห็นได้ว่าการใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนช่วยให้อุณหภูมิคงที่ แต่การเก็บรักษาข้าวโดยไม่ใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ข้าวเปลือกเกิดความเสียหาย



รูปที่ 1.2 กราฟแสดงผลจากการใช้ท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนระบายความร้อนและลดความชื้น [2]

และจากงานวิจัยการระบายความร้อนและลดความชื้นข้าวเปลือกโดยใช้ท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนร่วมกับการระบายอากาศของ N. Dussadee , T. Punsaensri และ T. Kiatsiriroat (2007) [3] ได้มีการติดตั้งชุดท่อเทอร์โมไซฟอนร่วมกับการระบายอากาศ โดยมีผลการวิจัยดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 กราฟแสดงผลจากการใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนร่วมกับการระบายอากาศ ลดอุณหภูมิและความชื้น [3]

จากกราฟการลดอุณหภูมิข้าวเปลือกโดยการใช่ท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนร่วมกับการระบายอากาศจะมีการลดอุณหภูมิอยู่ในช่วง 24-28 $^{\circ}C$ ซึ่งสามารถลดอุณหภูมิได้ดีกว่าการลดอุณหภูมิโดยใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนเพียงอย่างเดียว

ส่วนข้อเสียของท่อเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ในงานวิจัยเหล่านี้คือ การติดตั้งท่อต้องวางในแนวระดับความสูงของถังเนื่องจากสารทำงานภายในจะมีทิศทางการไหลอิสระตามแรงโน้มถ่วงของโลก โครงสร้างระบบมีความซับซ้อนจึงมีการออกแบบและติดตั้งได้ยากและท่อเทอร์โมไซฟอนมีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าท่อความร้อนที่มีขนาดเล็ก

เพื่อเป็นการแก้ไขข้อเสียของท่อเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ในวิจัยเหล่านี้ จึงได้มีการประยุกต์ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศซึ่งข้อดีของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมีขนาดเล็กกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเทอร์โมไซฟอนจึงทำให้มีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนมากกว่าท่อเทอร์โมไซฟอน สามารถติดตั้งระบบได้ง่ายเนื่องจากท่อโค้งงอได้ง่ายตามโครงสร้างที่ออกแบบและสามารถติดตั้งท่อในแนวระดับหรือแนวดิ่งได้ มีพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนมากกว่าท่อเทอร์โมไซฟอน

ท่อความร้อนแบบสั่น [4] คืออุปกรณ์ที่ทำจากท่อคาปิลลารีและสามารถแลกเปลี่ยนความร้อนโดยไม่ต้องอาศัยพลังงานภายนอก ทำงานโดยใช้หลักการการส่งถ่ายความร้อนจากความร้อนแฝงของสารทำงานภายในท่อ ซึ่งระเหยโดยการรับความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนแล้วถ่ายเทความร้อนโดยการควบแน่น ท่อความร้อนแบบสั่นแบ่งออกได้ 3 ชนิดคือ 1.ท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด (Closed End Oscillating Heat Pipe : CEOHP) ทำจากท่อคาปิลลารีเส้นหนึ่งขดไปมาโดยที่ปลายทั้งสองข้างไม่ต่อเข้าหากันสำหรับกรณีการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจากการสั่นที่ขับเคลื่อนความดันที่

กวัดแกว่งอย่างรวดเร็วซึ่งเกิดจากการเดือดแบบฟอง 2.ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบมีวาล์วกันกลับ (Closed-Loop Oscillating Heat Pipe with Check Valve: CLOHP/CV) ทำจากท่อคาปิลลารีเส้นหนึ่งขดไปมาปลายทั้งสองข้างเชื่อมต่อกันเป็นวงรอบในวงรอบของท่อมีวาล์วกันกลับช่วยบังคับทิศทางการไหลของสารทำงานให้ไหลเวียนไปทางเดียว 3.ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ (Closed-Loop Oscillating Heat Pipe: CLOHP) ทำจากท่อคาปิลลารีเส้นหนึ่งขดไปมาเช่นเดียวกับท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด แต่ต่างกันตรงที่มีการต่อปลายสองข้างเข้าหากันเป็นวงรอบ ดังนั้นกรณีการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นจากการสั่นของสารทำงานตามแนวแกน

เนื่องจากคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่น ขึ้นอยู่กับชนิดของท่อความร้อน ซึ่งท่อแบบสั่นวงรอบและท่อความร้อนแบบปลายปิดจะมีรูปแบบการไหลของสารทำงานเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติแต่การไหลในท่อความร้อนแบบสั่นมีวาล์วกันกลับจะถูกบังคับการไหลด้วยอุปกรณ์ ข้อดีของการเลือกใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบคือ การเคลื่อนที่ของสารทำงานมีทิศทางเดียวกันและมีการไหลเป็นวงรอบและไม่มีการอัดตัวของสารทำงานภายในเนื่องจากปลายท่อทั้งสองเชื่อมต่อเข้าหากันดังนั้นสารทำงานจึงมีอิสระในการไหลของสารทำงาน

จากการศึกษาท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ มีหลักการทำงาน คือ สารทำงานภายในจะก่อตัวเป็นแท่งของเหลวสลับกับฟองไอซึ่งจะช่วยเพิ่มการเคลื่อนที่แบบสั่นของของไหลทำงาน โดยเกิดขึ้นจากแรงขับของคลื่นแรงดันที่ไม่แน่นอน ข้อดีคือ สามารถส่งถ่ายความร้อนได้อย่างรวดเร็วและมีพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนมาก

โครงงานนี้จึงต้องการศึกษาประสิทธิภาพการระบายความร้อนและลดความชื้นข้าวเปลือกโดยการใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ เนื่องจากต้องการปรับปรุงข้อเสียของท่อเทอร์โมไซฟอนในงานวิจัยที่ผ่านมาให้มีประสิทธิภาพให้ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อสร้างระบบการระบายความร้อนและลดความชื้นข้าวเปลือกโดยใช้พัดลมร่วมกับท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการระบายความร้อนและลดความชื้นของระบบที่มีการใช้พัดลมร่วมกับท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ตัวแปรควบคุม

1.3.1 ข้าวเปลือกพันธุ์พิษณุโลก 2 จำนวน 500 kg.

1.3.2 อัตราการการไหลของอากาศ และ ความเร็วรอบพัดลม

1.3.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อความร้อน 1.4 mm. เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ 2.2 mm.

1.3.4 ถังบรรจุทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 m. สูง 1 m.

ตัวแปรต้น

1.3.5 ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก และ 26% มาตรฐานเปียก

1.3.6 สภาพอากาศในแต่ล่ะช่วงเวลา (อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์)

ตัวแปรตาม

1.3.7 อุณหภูมิ

1.3.8 ความชื้น

1.3.9 อัตราการถ่ายเทความร้อน

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

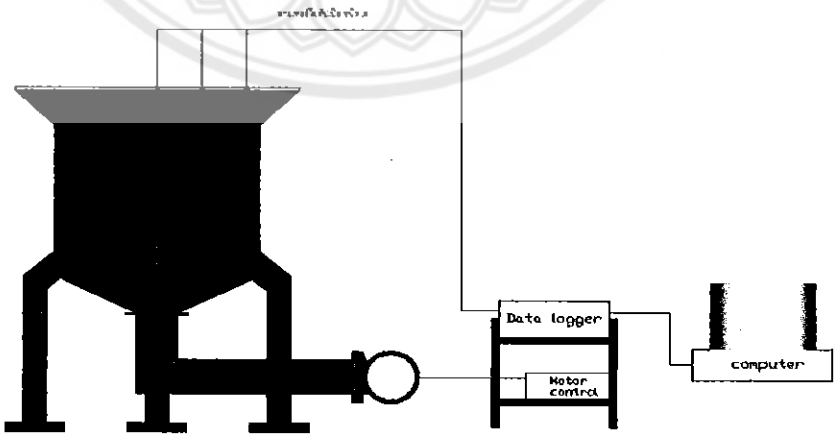
1.4.1 ได้ระบบการระบายความร้อนและลดความชื้นข้าวเปลือกโดยใช้พัดลมร่วมกับท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

1.4.2 ทราบถึงประสิทธิภาพการระบายความร้อนและลดความชื้นของระบบที่มีการใช้พัดลมร่วมกับท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการเก็บรักษาและการระบายความร้อนและลดความชื้นของข้าวเปลือกและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับข้าวเปลือก

1.5.2 สร้างและติดตั้งระบบระบายความร้อนและลดความชื้นข้าวเปลือกโดยใช้พัดลมร่วมกับท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ



รูปที่ 1.4 แบบโครงสร้างระบบใช้ทดลอง

1.5.3 ทำการทดสอบและบันทึกผลประสิทธิภาพของการระบายความร้อนในข้าวเปลือกโดยใช้พัดลมระบายอากาศร่วมกับการใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

1.5.4 วิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลอง

1.5.5 สรุปผลการทดลอง

1.6 ระยะเวลาและแผนการปฏิบัติงาน

งาน/ระยะเวลา	2554							2555	
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1.ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง									
2.สร้างและติดตั้งระบบการระบายความร้อนและลดความชื้นของข้าวเปลือก									
3.ทำการทดสอบ เปรียบเทียบและศึกษาประสิทธิภาพการระบายความร้อน และลดความชื้นของข้าวเปลือก									
4.วิเคราะห์ และสรุปผล									
5.จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์									

1.7 สถานที่ปฏิบัติงาน

หน่วยวิจัยท่อความร้อนและระบบระบายความร้อน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.8 อุปกรณ์ที่ใช้

1.8.1 พัดลมระบายอากาศ

1.8.2 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

1.8.3 ถังไซโลเก็บข้าวเปลือก

1.8.4 เทอร์โมคัปเปิล ชนิด เค (Thermocouple type K)

1.8.5 เครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ (Datalogger)

1.8.6 เครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือก

1.8.7 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์อากาศ (Humidity meter)

1.9 งบประมาณ

โครงงานปริญญานิพนธ์การเก็บรักษาข้าวเปลือกโดยใช่ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานซึ่งสามารถจำแนกได้คือ

1.9.1 ค่ากระดาษพิมพ์		200	บาท
1.9.2 ค่าถ่ายเอกสาร		500	บาท
1.9.3 ค่าหมึกพิมพ์		500	บาท
1.9.4 ค่าทำรูปเล่มรายงาน		1,000	บาท
1.9.5 ค่าปกจัดทำโครงงาน		800	บาท
	รวม	3,000	บาท

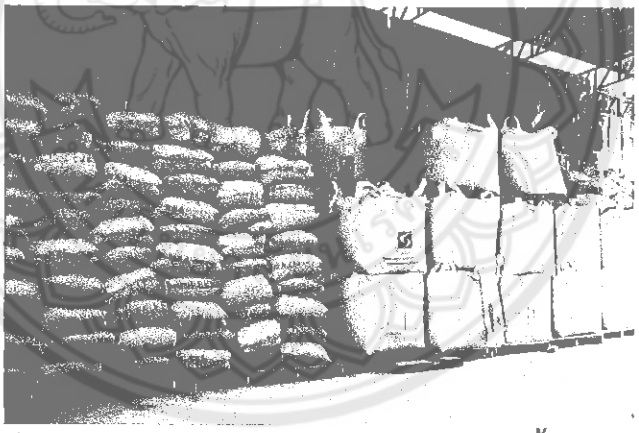
บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเก็บรักษาข้าวเปลือก

เป้าหมายของการเก็บรักษาข้าวเปลือก คือ ต้องมีการสูญเสียของข้าวเปลือกในขณะเก็บรักษาน้อยที่สุดทั้งด้านปริมาณและคุณภาพ หลักการเก็บรักษาโดยทั่วไปควรเก็บรักษาข้าวไว้ในสภาพหรือโรงเก็บที่มีความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศต่ำ (ในที่แห้งและเย็น)

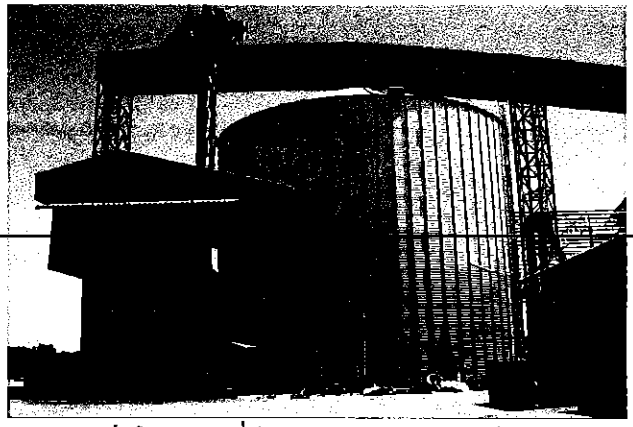
2.1.1 วิธีการเก็บรักษาข้าวเปลือก [1]

การเก็บรักษาข้าวเปลือกโดยทั่วๆ ไป แบ่งออกได้เป็น 4 วิธีได้แก่วิธีที่ 1.การเก็บรักษาในสภาพปกติ ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 หมายถึง การเก็บข้าวเปลือกไว้ในโรงเก็บปกติที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเก็บเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอยู่ส่วนใหญ่ เพราะมีการลงทุนน้อย และเสียค่าใช้จ่ายต่ำ แต่โอกาสที่จะเกิดความเสียหายในระหว่างการเก็บรักษาสูง เช่นการเก็บรักษาในโรงเก็บ หรือยุ้งฉางของเกษตรกรโรงสีหรือโกดังส่งออกข้าวเปลือกขนาดใหญ่



รูปที่ 2.1 การเก็บในสภาพปกติ ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ [1]

วิธีที่ 2.การเก็บในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว เช่น การเก็บข้าวไว้ในตู้แช่ ตู้เย็น หรือในไซโลเก็บข้าวที่มีการเป่าลมเย็น เป็นต้น



รูปที่ 2.2 การเก็บในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว [1]

วิธีที่ 3.การเก็บในสภาพที่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ได้แก่ การเก็บข้าวไว้ในภาชนะเก็บที่มิดชิด สามารถป้องกันการเคลื่อนที่ผ่านเข้าออกของอากาศได้ เช่น การเก็บเมล็ดพันธุ์ไว้ในปีบสังกะสี หรือ polyethylene bags เป็นต้น การเก็บข้าวในสภาพปิดเช่นนี้ ความชื้นของข้าวจะเป็นตัวกำหนดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในภาชนะที่เก็บ ถ้าความชื้นของข้าวต่ำ ความชื้นสัมพัทธ์ภายในภาชนะบรรจุก็จะต่ำ ข้าวที่เก็บจะเกิดความเสียหายน้อย ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ของข้าวสูง ความชื้นสัมพัทธ์ภายในภาชนะบรรจุก็จะสูง ข้าวที่เก็บจะเกิดความเสียหายสูง ดังนั้นการเก็บรักษาข้าวด้วยวิธีนี้ ข้าวควรมีความชื้นก่อนเก็บต่ำ ทั้งนี้ขึ้นกับระยะเวลาที่ต้องการเก็บรักษา อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปความชื้นไม่ควร เกิน 10% มาตรฐานเปียกวิธีนี้เป็นวิธีที่ได้ผลดีและมีค่าใช้จ่ายต่ำ

รูปที่ 2.3 การเก็บในสภาพที่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ [1]

วิธีที่ 4.การเก็บในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ วิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด สามารถป้องกันและลดความเสียหายของข้าวได้ดี เก็บรักษาข้าวให้คงคุณภาพดีได้เป็นเวลานาน แต่มีการลงทุน และเสียค่าใช้จ่ายในการดูแลสูง เช่นการเก็บอนุรักษ์เชื้อพันธุ์ข้าวในธนาคารเชื้อพันธุ์

รูปที่ 2.4 การเก็บในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ [1]

2.2 การหายใจของข้าวเปลือก

ความร้อนที่เกิดจากการหายใจของข้าวเปลือกสามารถหาได้จากสมการปฏิกิริยาเคมี ดังนี้

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 2.831MJ \qquad (2.1)$$

ค่าความร้อนของข้าวเปลือก (Q_{Paddy}) มีความสัมพันธ์กับค่าผลต่างของอุณหภูมิซึ่งหาได้จาก

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

โดยที่ Q_{Paddy} คือ ค่าความร้อนของข้าวเปลือก, KW
M คือ มวลของข้าวเปลือกในปริมาตรควบคุม, kg
Δt คือ เวลาในการเกิดความร้อน, S
C_p คือ ค่าความจุความร้อนของข้าวเปลือก, $J/kg.C$

ซึ่งค่าความจุความร้อนของข้าวเปลือกมีสมการดังนี้

$$C_p = [3.1(W) + 1.2648)] \times 10^3 \qquad (2.3)$$

W คือ ความชื้นของข้าวเปลือก, %

2.3 ทฤษฎีการพาความร้อน

การพาความร้อนจำแนกได้เป็นสองแบบดังนี้

การพาความร้อนแบบบังคับ เกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่พร้อมๆ กับทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนมักจะอาศัยอุปกรณ์ช่วย ตัวอย่างเช่น ปั๊ม พัดลม การพาความร้อนแบบบังคับนี้จะมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบธรรมชาติ

การพาความร้อนแบบธรรมชาติ กลไกการเกิดการถ่ายโอนความร้อน มักเกิดเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นในระบบ ไม่ว่าจะเป็นการถ่ายโอนความร้อนแบบพาในลักษณะใดก็ตาม จะมีสมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการถ่ายโอนความร้อนเหมือนกันคือ

$$q = hA\Delta T \tag{2.4}$$

ในสมการที่ 2.3 เรียกว่า Newton's law of cooling

เมื่อ q =ปริมาณความร้อนที่เกิดการถ่ายโอนเนื่องจากการพา , W

h =สัมประสิทธิ์การพาความร้อน , $W/m^2.K$

A =พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน , m^2

ΔT =ผลต่างอุณหภูมิ , K

ในการหาความต้านทานของการไหลของความร้อนแสดงได้ดังสมการที่ 2.4

$$R = \frac{1}{hA} \tag{2.5}$$

กลุ่มตัวแปลไร้หน่วยที่มักนำมาวิเคราะห์ คือ

Reynold Number

$$\mathrm{Re} = \frac{Dv\rho}{\mu} \tag{2.6}$$

Prandtl Number

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu C_p}{k} \tag{2.7}$$

Nusselt Number

$$Nu = \frac{hD}{k} \tag{2.8}$$

การพาความร้อนแบบอิสระหรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติของท่อทรงกระบอกที่วางในแนวดิ่ง เกิดขึ้นเมื่อของไหลเกิดการเคลื่อนที่เนื่องจาแรงลอยตัว (buoyancy force) ของของไหลซึ่งแรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล อันเป็นผลจากความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหลใน 2 บริเวณ

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติหาได้จากสมการ

$$h_m = \frac{Nu_m k}{L_c} \tag{2.9}$$

สหสัมพันธ์ของการพาความร้อนแบบธรรมชาติที่ได้จากการทดลองของ Churchill and Chu ซึ่งได้จากสมการ

$$Nu_{m,plate} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387(Gr_L \Pr)^{\frac{1}{6}}}{\left[1+\left(\frac{0.492}{\Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \tag{2.10}$$

กลุ่มไร้มิติที่มีความสำคัญในการถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติ นั้นก็คือ Grashof Number โดยมีค่าดังนี้

$$Gr_L = \frac{g\beta L^3 (T_c - T_a)}{\nu^2} \tag{2.11}$$

โดยที่ Gr_L = Grashof Number

β = สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร , K^{-1}

ν = Kinematic Viscosity , m^2/s

k = ค่าการนำความร้อนของอากาศ , $W/m.k$

$\Pr$ = Prandtl Number

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง , m/s^2

L_c = ความยาวส่วนควบแน่น , mm

Nu = Nusselt Number

2.4 ทฤษฎีการอบแห้งที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน [5]

โดยปกติความชื้นเมล็ดพืชขณะเก็บเกี่ยวจะมีค่าระหว่าง 20–25% มาตรฐานเปียก ดังนั้นจึงต้องลดความชื้น ในอดีตเกษตรกรเก็บเกี่ยวข้าวในขณะความชื้นเมล็ดข้าวไม่สูงนัก ทั้งนี้เนื่องจากเมล็ดพืชถูกทิ้งไว้ในไร่นาหรือใช้เวลาในการทำให้เมล็ดแห้งนานเกินไป เป็นผลทำให้เกิดความสูญเสียด้านปริมาณ และเกิดการสูญเสียด้านคุณภาพ เช่น ข้าวแตกหักจากการเกิดวงจรเปียก-แห้ง ข้าวฟันหนู ข้าวงอก เนื่องจากเมล็ดข้าวยังมีความชื้นสูงอยู่ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีเครื่องอบแห้งเพื่อลดความชื้นของเมล็ดพืชให้ถึงระดับที่ปลอดภัยภายในระยะเวลาอันสมควร โรงสีข้าวโดยทั่วไปมักจะไม่มีเครื่องอบแห้ง แต่จะใช้วิธีการตากข้าวเป็นชั้นบางๆ บนลานคอนกรีตที่สร้างให้มีลักษณะเหมือนหลังเต่าเพื่อป้องกันน้ำขังเป็นที่นิยมกันค่อนข้างมาก เพื่อให้ข้าวแห้งอย่างทั่วถึง จะมีการรวบรวมให้เป็นกองข้าวแล้วคลุมทับด้วยผ้าใบ เมื่อฝนหยุดตกแล้วก็จะเกลี่ยข้าวเป็นชั้นบางใหม่ ระยะเวลาที่ใช้ในการตากแดดอาจเพียงครึ่งวันหรือหลายวัน ทั้งนี้คืนอยู่กับความชื้นของเมล็ดพืชและสภาวะอากาศ

ปัจจุบันมีการใช้รถเก็บเกี่ยวข้าวและนวดไปในตัวกันอย่างแพร่หลาย ดังนั้นจะได้ข้าวชื้นอยู่เสมอไม่ว่าจะเป็นข้าวนาปีหรือนาปรัง เครื่องอบแห้งจึงมีบทบาทมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากที่โรงสีข้าวต่างเริ่มลงทุนติดตั้งเครื่องอบแห้ง รัฐบาลเองก็มีนโยบายสนับสนุนทางด้านการเงิน เป็นที่คาดหมายว่าเครื่องอบแห้งจะเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ระยะเวลาการอบแห้งที่ปลอดภัยเมื่อเก็บเมล็ดพืชที่มีความชื้นรวมกันเป็นปริมาณมากไว้ระยะเวลาหนึ่ง จุลินทรีย์ต่างๆเช่นเชื้อราจะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว เชื้อราบางอย่างอาจสร้างสารพิษซึ่งให้โทษต่อคนหรือสัตว์ที่กินเข้าไป ซึ่งจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในเมล็ดพืชมีการหายใจโดยการเผาผลาญคาร์โบไฮเดรตกับออกซิเจน ทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และความร้อน เป็นผลให้การหายใจเป็นสาเหตุหนึ่งทำให้คุณภาพของเมล็ดพืชลดลง เช่น ทำให้ข้าวเป็นฟันหนู (เมล็ดข้าวสารมีสีเหลือง)

คุณภาพของเมล็ดพืชกับการอบแห้ง การอบแห้งมีผลต่อคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี และชีวภาพของการอบแห้งซึ่งส่งผลทำให้เกิดการร้าวหรือแตกหักในเมล็ด อุณหภูมิของการอบแห้งมีผลต่อคุณภาพของเมล็ดพืชหลังการอบแห้งมาก อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งจะแตกต่างจากอุณหภูมิของเมล็ดพืช เมื่อเริ่มการอบแห้ง อุณหภูมิของเมล็ดพืชจะต่ำกว่าของอากาศ เมื่อเมล็ดแห้ง อุณหภูมิของเมล็ดจะเพิ่มสูงขึ้น จนอุณหภูมิใกล้เคียงกับอากาศ การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้บริเวณผิวของเมล็ดพืชสูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็ว เมื่อโซนการอบแห้งเคลื่อนย้ายจากบริเวณผิวไปยังชั้นในของเมล็ด ทำให้ชั้นในสูญเสียความชื้นและหดตัวโดยแยกตัวออกจากผิวที่แข็ง ทำให้เกิดรอยร้าว แตกหักในเมล็ดพืชได้ การอบแห้งหรือการสูญเสียความชื้นจะเป็นไปอย่างช้าๆ ซึ่งผิวของเมล็ดจะไม่แข็งตัวในเวลาอันรวดเร็วเกินไป คุณภาพที่สำคัญของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งอันหนึ่งได้แก่เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ด ซึ่งข้าวเต็มเมล็ดหมายถึง เมล็ดข้าวสารที่มีความยาวแปดในสิบของเมล็ดข้าวที่สมบูรณ์

หลักการอบแห้งเมล็ดพืชโดยทั่วไปเรามักใช้อากาศที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ทั้งนี้เพราะสามารถอบแห้งได้เร็วและได้ความชื้นของเมล็ดพืชต่ำ โดยมากเรามักจะเลือกเอาอุณหภูมิสูงสุดที่ยอมให้ได้โดยคุณภาพของเมล็ดพืชไม่เสียหาย เพราะจะทำให้อบแห้งได้เร็ว ในการอบแห้งบางวิธีเราอาจใช้อากาศแวดล้อมในการอบแห้ง เช่นวิธีการอบแห้งในถังเก็บ คืออบแห้งเมล็ดพืชภายในตัวถังที่ใช้เก็บรักษา การใช้อากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้เมล็ดพืชทางด้านล่างของถังซึ่งสัมผัสกับลมร้อนก่อนแห้งเกินกว่าที่ต้องการ ส่วนเมล็ดพืชด้านบนของถังจะยังชื้นอยู่

ในขณะที่อากาศร้อนเคลื่อนที่ผ่านชั้นเมล็ดพืช จะเกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อน ความร้อนจากอากาศจะถ่ายเทไปยังเมล็ดพืช และทำให้น้ำบริเวณผิวเมล็ดระเหยเข้าไปอยู่ในอากาศ ทำให้อากาศมีอุณหภูมิลดลง และความชื้นอากาศสัมพัทธ์สูงขึ้น ส่วนเมล็ดจะมีความชื้นลดต่ำลง และหากความชื้นลดลงมากพอแล้วอุณหภูมิของเมล็ดก็จะเริ่มสูงขึ้นด้วย จนในที่สุดเมล็ดพืชจะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิอากาศที่ใช้อบแห้ง หากว่าความชื้นลดลงถึงความชื้นสมดุล เรามักจะผ่านอากาศแวดล้อมเข้าชั้นเมล็ดพืชเพื่อให้อุณหภูมิลดลง หากเก็บเมล็ดพืชทั้งที่ยังมีอุณหภูมิสูงอยู่อาจเกิดปัญหาการไหลเวียนของอากาศโดยธรรมชาติ ซึ่งมีผลทำให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำในอากาศ ทำให้เมล็ดพืชบริเวณที่มีการควบแน่นมีความชื้นสูง

2.4.1 ทฤษฎีดรายแอเรชัน (Dryeration)

เป็นเทคนิคการอบแห้งแบบหนึ่งซึ่งสามารถลดความสิ้นเปลืองของพลังงานอย่างได้ผล Foster (1964) อธิบายเทคนิคดรายแอเรชันของข้าวโพดว่าประกอบด้วยการอบแห้งข้าวโพดด้วยอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิสูง ให้ข้าวโพดมีความชื้นหลังอบแห้งสูงกว่าที่ต้องการประมาณ 2% แล้วขนย้ายไปเก็บในถังชั่วคราว โดยที่ไม่มีอากาศไหลผ่าน ข้าวโพดจะเย็นตัวลงช้าๆ ความชื้นจากภายในเมล็ดข้าวโพดจะแพร่มายังผิวเมล็ด หลังจากนั้นจะเป่าอากาศแวดล้อมผ่านชั้นเมล็ดพืชเพื่อทำให้เย็นลงพร้อมกับทำการอบแห้งโดยอาศัยความร้อนจากตัวเมล็ดข้าวโพดซึ่งยังร้อนอยู่ หลังจากนั้นแล้วต้องขนย้ายเมล็ดข้าวโพดไปเก็บไว้ที่อื่นเพราะว่าอากาศที่ไหลออกจากชั้นข้าวโพดยังมีอุณหภูมิสูงและอิ่มตัวด้วยไอน้ำ

ข้อดีของเทคนิคการอบแห้งแบบนี้คือ สามารถลดความสิ้นเปลืองพลังงานลงได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง และยังสามารถใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่สูงด้วย เทคนิคนี้เป็นที่นิยมกันแพร่หลายในสเกลการอบแห้งขนาดใหญ่ ไม่เหมาะกับการอบแห้งขนาดเล็กเพราะค่อนข้างยุ่งยาก ดังนั้นจึงมีการนำเอาเทคนิค ดรายแอเรชันมาใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก เนื่องจากข้าวเปลือกเป็นเมล็ดพืชที่แตกร้าวได้ง่ายถ้าใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงเกินไป และเมื่อนำไปสีจะได้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดต่ำซึ่งทำให้ขายไม่ได้ราคา

2.4.2 ทฤษฎีอากาศชื้น [6]

สำหรับของผสมอากาศชื้นนี้ประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำความดันต่ำ บางทีเรียกว่าของผสมระหว่างอากาศ น้ำ และไอน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากระหว่างดำเนินกระบวนการนั้นการระเหยตัวของน้ำหรือควบแน่นของไอน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง

อากาศแห้ง (dry air) อากาศในบรรยากาศเป็นสารผสมของไนโตรเจน 78.10%ออกซิเจน 20.95% อาร์กอน 0.92% และก๊าซอื่นๆอีก ปกติในบรรยากาศนี้อาจจะประกอบด้วยความชื้นจำนวนหนึ่งซึ่งเรียกว่าอากาศชื้น ส่วนอากาศที่ไม่มีไอน้ำเป็นองค์ประกอบเรียกว่าอากาศแห้ง ช่วงอุณหภูมิใช้งานด้านการปรับอากาศประมาณตั้งแต่ $-10^{\circ}C$ ถึง $50^{\circ}C$ ในช่วงอุณหภูมินี้สามารถสมมติให้อากาศแห้งเป็นกาซอุดมคติที่มี C_p คงที่เท่ากับ 1.005 $kJ/kg.K$ โดยกำหนดให้ใช้อุณหภูมิอ้างอิงที่ $0^{\circ}C$ เอนทาลปีและการเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีของอากาศแห้งามารถเขียนเป็น

$$\Delta h_a = C_p \Delta T = 1.005 \Delta T \; kJ/kg \qquad (2.12)$$

โดยที่ T มีหน่วยเป็น $^{\circ}C$ และ ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิอากาศชื้น

2.5 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ (The first law of Thermodynamics) [7]

ในหัวข้อนี้จะศึกษาถึงความสัมพันธ์ของพลังงานในรูปของ ความร้อน (Q), งาน (W) และพลังงานรวม (E) โดยอาศัยกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ หรือกฎการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy principle) ซึ่งมีหลักการว่า พลังงานสามารถเกิดการถ่ายโอนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ และเกิดการเปลี่ยนรูปได้ แต่ไม่สามารถถูกสร้างขึ้นมาใหม่หรือถูกทำลายได้

สมดุลพลังงาน (Energy Balance)

$$\text{Accumulation} = \text{Input} - \text{Output} \tag{213}$$

จะได้สมการ

$$\dot{Q} + \dot{E}_{Input} = \dot{E}_{Output} + \dot{W} \tag{2.14}$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{E}_{Output} - \dot{E}_{Input} \tag{2.15}$$

เนื่องจากระบบไม่มีพลังงานจลน์ พลังงานศักย์ และงาน จะได้สมการดังนี้

$$\dot{Q} = \dot{m}[h_{Input} - h_{Output}] \tag{2.16}$$

$$\dot{Q} = \dot{m}\Delta h \tag{2.17}$$

2.6 อัตราส่วนการเติมสารทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ [8]

อัตราส่วนเติมสารทำงานมีผลต่อคุณลักษณะการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ โดยพบว่าที่ช่วงอัตราเติมสาร 30% ถึง 50% การส่งถ่ายความร้อนจะเพิ่มขึ้น และช่วงอัตราการเติมสาร 50% ถึง 70% เป็นช่วงที่การส่งถ่ายความร้อนสูงสุดของทุกมุมเอียงการทำงาน และช่วงอัตราที่มากกว่า 70% อัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลงอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากฟองไอและก้อนของเหลวมีขนาดเล็กเพียงพอที่จะเคลื่อนได้ง่าย และมีปริมาณมากพอที่ส่งถ่ายความร้อน

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของท่อนั้นคือความยาวส่วนทำระเหยพบว่าความยาวส่วนทำระเหย 150 mm. อัตราส่วนการเติมที่เหมาะสมคือ 30% และที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 mm อัตราส่วนการเติมสารที่เหมาะสมคือ 30% ถึง 50%
คำนวณปริมาณการเติมสารทำงานได้จากสมการต่อไปนี้

ปริมาณการเติมสุทธิ $= V_{total} \times Filling \quad ratio$ (2.18)

$$V_{total} = \frac{\pi D_2^i}{4}(L_t) \quad (2.19)$$

$$Lt = (n \times 2(L_e + L_a + L_c)) + (n \times (2\pi r)) \quad (2.20)$$

โดยที่

L_e = ระยะส่วนทำระเหย , m
L_a = ระยะส่วนกันความร้อน, m
L_c = ระยะส่วนควบแน่น, m
n = จำนวนโค้งเลี้ยว, m
D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน, m
r = รัศมีโค้งเลี้ยว, mm
Fillingratio = อัตราส่วนการเติมสารทำงาน (50%)

2.7 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะเป็นค่าที่จะบอกให้ทราบว่า ระบบเกิดประโยชน์ตามวัตถุประสงค์มากน้อยเพียงใด โดยจะระบุประสิทธิภาพอยู่ในรูปของอัตราส่วนของ สิ่งที่ปรารถนาจะได้ต่อสิ่งที่ป้อนเข้า ดังสมการ 2.22

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}} \quad (2.21)$$

โดยที่ $\dot{Q}_{out}$ คือ $\dot{Q}_{tube} + \dot{Q}_{air}$

$\dot{Q}_{in}$ คือ $\dot{Q}_{paddy}$

ดังนั้นจะได้สมการประสิทธิภาพคือ

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{tube} + \dot{Q}_{air}}{\dot{Q}_{paddy}} \quad (2.22)$$

บทที่ 3
ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 สำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูล

การสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูล เป็นการศึกษาอุณหภูมิและความชื้นในถังข้าวเปลือกที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศและการเก็บข้าวเปลือกที่ไม่มีการใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายความร้อนตามทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจากแหล่งข้อมูลต่างๆ ซึ่งสามารถแสดงเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

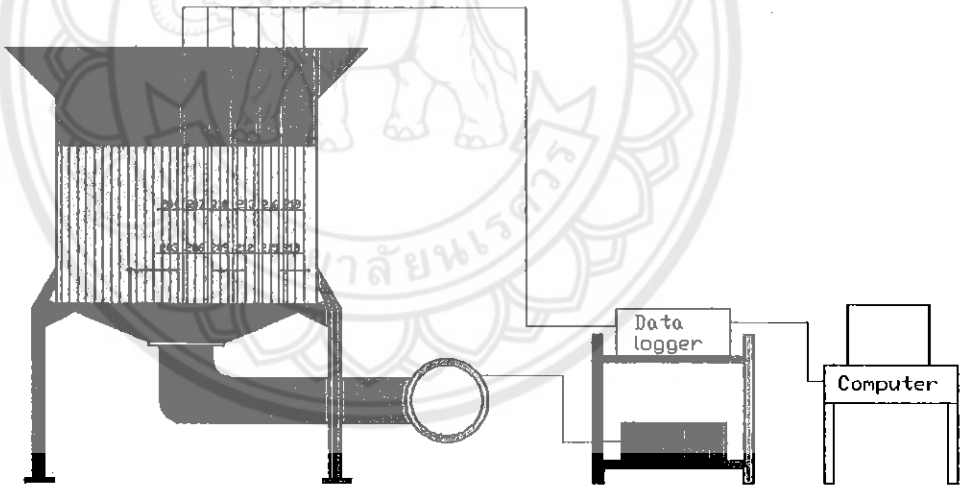
3.1.1 ศึกษาการเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับข้าวเปลือก และการเก็บรักษาข้าวเปลือก

3.1.2 ศึกษาการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

3.1.3 ลักษณะการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

3.1.4 การสร้างท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ สารทำงาน และการเติมสารทำงาน

3.1.5 ออกแบบโครงสร้างถังเก็บข้าวเปลือก การติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบการติดตั้งพัดลม และอุปกรณ์การเก็บข้อมูล ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบโครงสร้างถังเก็บข้าวเปลือก และการติดตั้งอุปกรณ์เก็บข้อมูล

3.2 ตัวแปรในการทดสอบ

ตัวแปรความคุม

3.2.1 ข้าวเปลือกพันธุ์พิษณุโลก 2 จำนวน 500 *kg*

3.2.2 อัตราการการไหลของอากาศ และ ความเร็วรอบพัดลม

3.2.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อความร้อน 1.4 mm. เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ 2.2 mm.

3.2.4 ถังบรรจุทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 m. สูง 1 m

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

3.2.5 ข้าวเปลือกความชื้น 14%มาตรฐานเปียก

3.2.6 ข้าวเปลือกความชื้น 26%มาตรฐานเปียก

3.3 หลักการทำงานของระบบ

หลักการทำงานของระบบระบายความร้อนจะแบ่งเป็นสองช่วงคือ ช่วงกลางวันและช่วงกลางคืน ในช่วงกลางวันตั้งแต่เวลา 06.00 น.ถึง 18.00 น. อุณหภูมิของอากาศจะสูงกว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกจึงมีการเปิดพัดลมระบายร่วมกับการใช้ท่อความร้อนเพื่อให้อากาศช่วยในการลดอุณหภูมิและลดความชื้นของข้าวเปลือกไปด้วย ในช่วงกลางคืนตั้งแต่เวลา 18.00 น.ถึง 24.00 น. อุณหภูมิของอากาศจะต่ำกว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกทำให้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบสามารถนำความร้อนของข้าวเปลือกออกสู่อากาศภายนอกได้จึงไม่มีการใช้พัดลมในช่วงกลางคืน

การทำงานของระบบจะมีการระบายความร้อนด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ ซึ่งในส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบจะถูกฝังลงในข้าวเปลือกเพื่อรับความร้อนจากข้าวเปลือกและถ่ายเทความร้อนออกในส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่สูงพ้นข้าวเปลือกออกมา และการระบายอากาศพัดลมจะเป่าลมเข้าด้านล่างของถังข้าวเปลือกขึ้นสู่ผิวด้านบนของข้าวเปลือกเพื่อให้ลมมีการระบายข้าวเปลือกทั่วทั้งหมด

3.4 ขั้นตอนการสร้างและติดตั้งท่อความร้อน

3.4.1 การสร้างท่อความร้อน

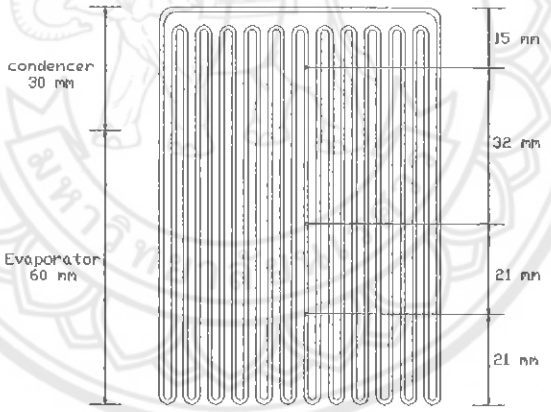
3.4.1.1 นำท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบหนึ่งเส้นมาขดเป็นวงรอบมีจำนวนรอบทั้งหมด 33 รอบโดยแบ่งเป็นสองส่วนคือส่วนควบแน่น และส่วนทำระเหย มีท่อที่ใช้ทั้งหมดจำนวน 32 ชุด ดังรูป 3.2

รูปที่ 3.2 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

3.4.1.2 นำท่อที่เชื่อมปลายทั้งสองข้างเข้าด้วยกันไปติดตั้งกับชุดเติมสารทำงานเพื่อตรวจสอบรอยรั่วและจากนั้นเติมสารทำความเย็นและเชื่อมปิดปลายท่อ

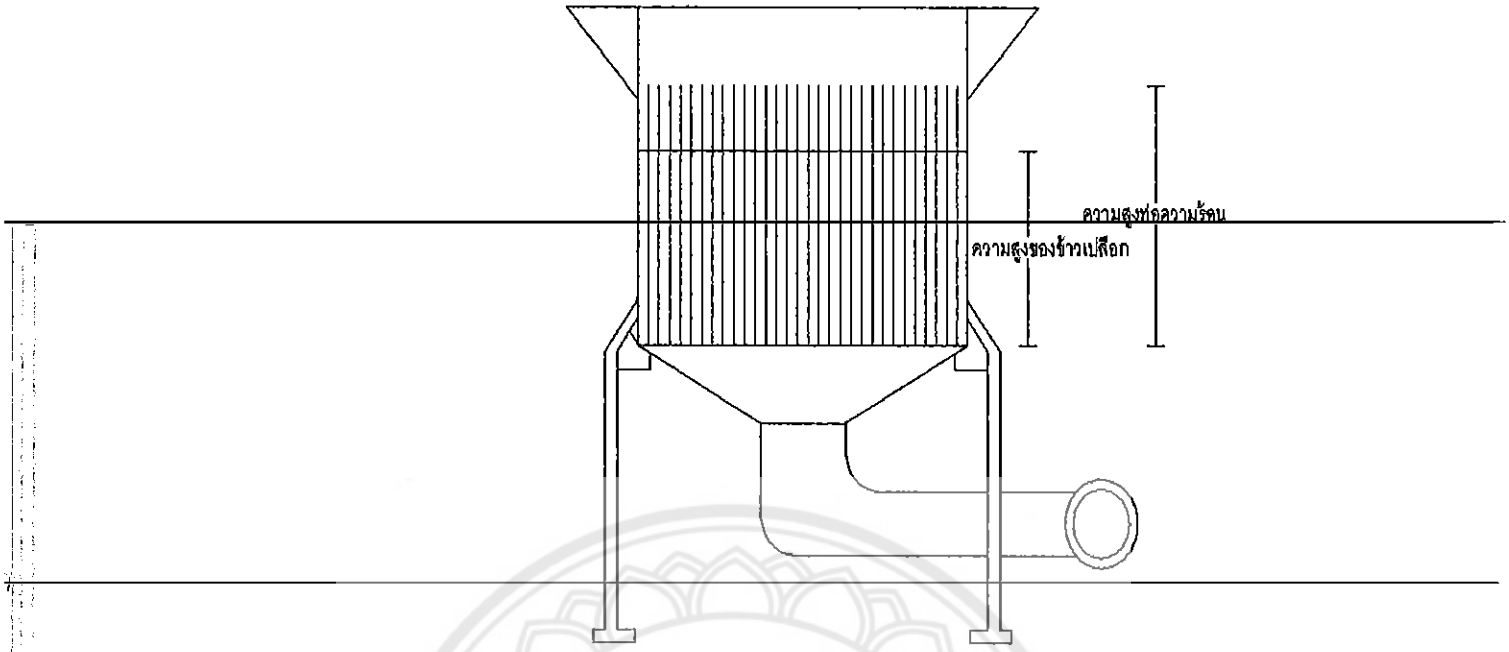
3.4.2 การติดตั้งท่อความร้อนลงในถัง

3.4.2.1 นำสายเทอร์โมคัปเปิล มาติดตั้งกับท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่เติมสารทำงานเรียบร้อยแล้ว โดยติดตั้งไว้ 3 จุด แบ่งติดตั้งที่ส่วนทำระเหย 2 จุด และส่วนควบแน่นอีก 1 จุด ดังรูปที่ 3.3

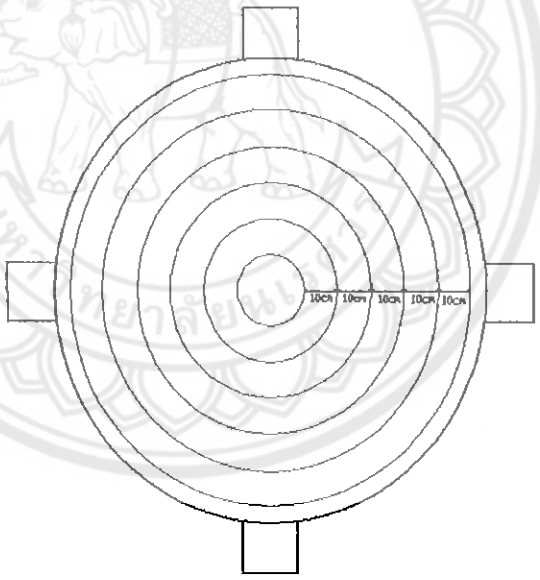


รูปที่ 3.3 ระยะและตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบนท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

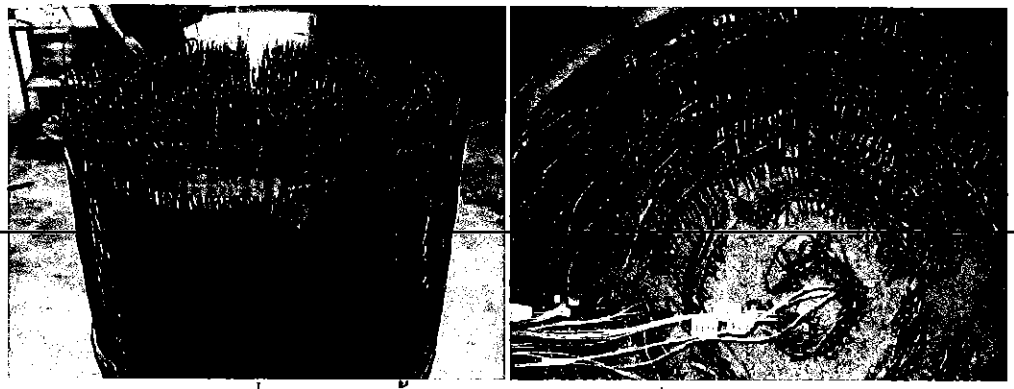
3.4.2.2 เมื่อติดสายเทอร์โมคัปเปิลเสร็จแล้วจะนำท่อความร้อนใส่ในถังข้าวเปลือก โดยมีการใส่ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบเป็นชั้นๆตามแนวรัศมีของถัง 6 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นจะมีระยะห่างกัน 10 cm. ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ด้านหน้าของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ใส่ในถังข้าวเปลือก



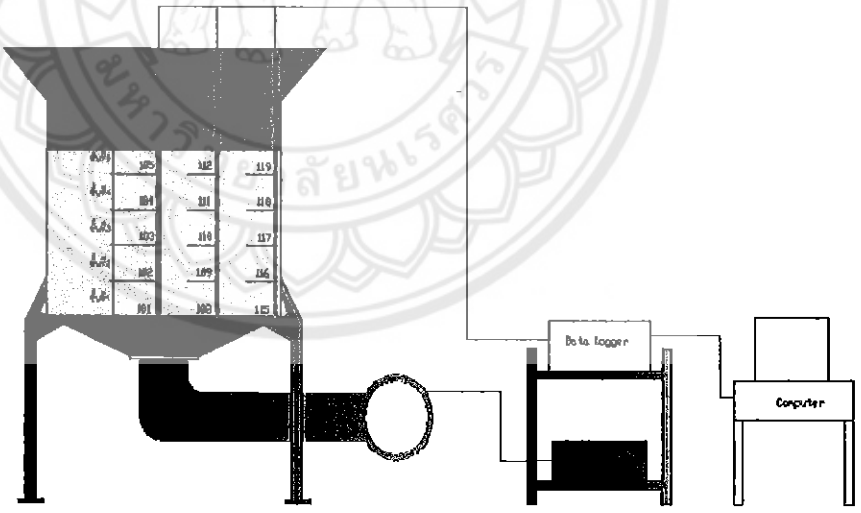
รูปที่ 3.5 ด้านบนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ใส่ในถังข้าวเปลือก



รูปที่ 3.6 การติดตั้งท่อความร้อนลงในถังเก็บข้าวเปลือก

3.5 การติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิดเพื่อวัดอุณหภูมิข้าวเปลือก

ทำการจัดเรียงแท่งติดสาย เทอร์โมคัปเปิลทั้ง 3 แท่ง โดยแต่ละแท่งประกอบด้วยเทอร์โมคัปเปิล 7 จุด โดยแต่ละจุดห่างกัน 16.25 *cm* การวางเทอร์โมคัปเปิลแท่งที่ 1 (หมายเลข 101–107) วางไว้ที่จุดศูนย์กลางของถังเก็บข้าวเปลือก เทอร์โมคัปเปิลแท่งที่ 2 (หมายเลข 108–114) วางไว้ห่างจากผนังด้านข้างถังระยะ 35 *cm* เทอร์โมคัปเปิลแท่งที่ 3 (หมายเลข 115–120 และหมายเลข 201) วางไว้ชิดผนังของถังเก็บข้าวเปลือก และเทอร์โมคัปเปิลหมายเลข 202 ทำการวัดอุณหภูมิอากาศแวดล้อม จากนั้นทำการต่อสายเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูลซึ่งประกอบไปด้วยดาต้าล็อกเกอร์ (Data logger) และคอมพิวเตอร์ (Computer) ดังรูปที่ 3.7

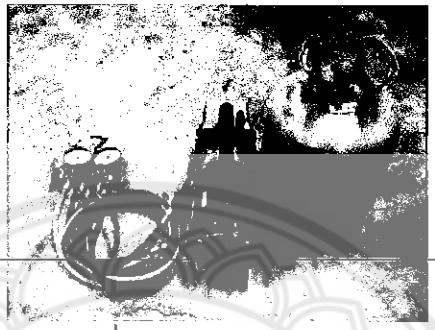


รูปที่ 3.7 แบบโครงสร้างถังเก็บข้าวเปลือก และการติดตั้งอุปกรณ์เก็บข้อมูลของข้าวเปลือก

3.6 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด

3.6.1 ชุดเติมสารทำงาน

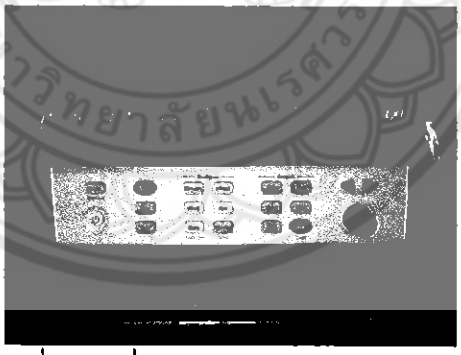
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เติมสารทำงานเข้าสู่ท่อความร้อน ซึ่งประกอบด้วย ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump), วาล์ว , เกจวัดความดัน (Pressure gauge) , สารทำความเย็น และสายเติมสารทำงาน ดังรูป 3.8



รูปที่ 3.8 ชุดเติมสารทำงาน

3.6.2 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger)

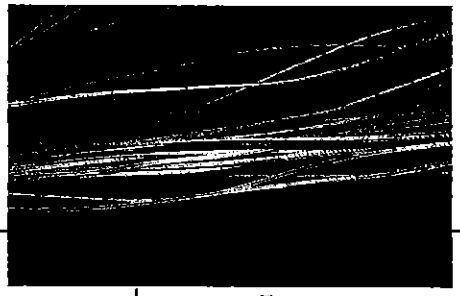
ยี่ห้อ Agilent รุ่น 34972A ขนาด 40 ช่องสัญญาณ มีความแม่นยำ $\pm 0.0035^{\circ}C$ ช่วงการวัด -100$^{\circ}C$ ถึง 1200$^{\circ}C$ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger)

3.6.3 เทอร์โมคัปเปิล

ยี่ห้อ OMEGA type K ชนิด Chromel-Alumel ใช่ร่วมกับเครื่องบันทึกข้อมูลมีช่วงการวัดอุณหภูมิ -40$^{\circ}C$ ถึง 1200$^{\circ}C$ ความแม่นยำ$\pm 0.0075\%$ หรือ $\pm 2.5\ ^{\circ}C$ ดังรูป 3.10



รูปที่ 3.10 เทอร์โมคัปเปิล

3.6.4 เครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือก

ยี่ห้อ MORITA รุ่น MS-3L เป็นเครื่องวัดเมล็ดพืชแบบเกลียวบิด มีค่าความละเอียด 0.1% ดังรูป 3.11

รูปที่ 3.11 เครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือก

3.6.5 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity meter)

ยี่ห้อ EXTECH รุ่น 4465CF ช่วงของการวัดความชื้น 10% ถึง 95% RH ความละเอียด 0.1% RH ดังรูป 3.12

รูปที่ 3.12 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity meter)

3.7 ขั้นตอนการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.7.1 นำข้าวเปลือกพันธุ์พิษณุโลก 2 จำนวน 500 kg ใส่ลงในถัง ที่มีการจัดเรียงท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบและแท่งเทอร์โมคัปเปิลเรียบร้อยแล้ว

3.7.2 เปิดเครื่องบันทึกอุณหภูมิเพื่อทำการเก็บค่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ความชื้น 14% มาตรฐานเปียกที่ความเร็วลม 1.7 $m^3/min/m^3_{paddy}$ โดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศในข้าวเปลือกทุกครึ่งชั่วโมงโดยเริ่มเก็บตั้งแต่วันที่ 13 มกราคม 2555 เวลา 18.00 น. ถึงวันที่ 18 มกราคม 2555 เวลา 06.00 น.รวม 102 ชั่วโมง

3.7.3 ทำการเก็บค่าความชื้นข้าวเปลือกทุกๆ 6 ชั่วโมง โดยเก็บครั้งละ 10 จุด

3.7.4 ทำการเก็บค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศทุกๆ 6 ชั่วโมง โดยเก็บที่พื้นผิวของด้านบนข้าวเปลือก 8 จุด และสภาพแวดล้อมอีก 1 จุด

3.7.5 นำข้าวเปลือกออกมาสเปรย์น้ำให้มีความชื้น 26% มาตรฐานเปียก ที่ความเร็วลม 1.7 $m^3/min/m^3_{paddy}$ แล้วนำข้าวเปลือกใส่ถัง เปิดเครื่องบันทึกอุณหภูมิเพื่อทำการเก็บค่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ความชื้น 26% มาตรฐานเปียกโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศในข้าวเปลือกทุกครึ่งชั่วโมงโดยเริ่มเก็บตั้งแต่วันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2555 เวลา 18.00 น. ถึงวันที่16 กุมภาพันธ์ 2555 เวลา 06.00 น.รวม 60 ชั่วโมง ทำการเก็บค่าความชื้นข้าวเปลือกและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเช่นเดียวกับการเก็บค่าข้าวเปลือกที่ 14% มาตรฐานเปียก

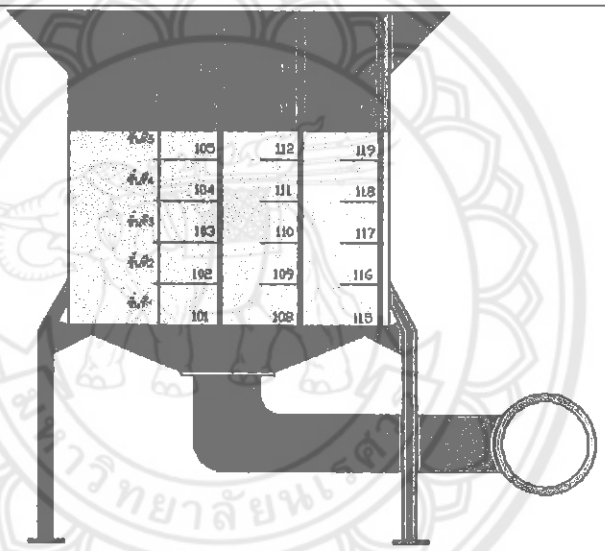
3.7.6 นำข้าวเปลือกออกมาสเปรย์น้ำให้มีความชื้น 26% มาตรฐานเปียก แล้วนำข้าวเปลือกใส่ถัง เปิดเครื่องบันทึกอุณหภูมิเพื่อทำการเก็บค่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ความชื้น 26% โดยที่ไม่มีการใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบและไม่มีการเปิดพัดลมระบายอากาศ ทุกๆครึ่งชั่วโมงโดยเริ่มเก็บตั้งแต่วันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2555 เวลา 00.00 น. ถึงวันที่ 22 กุมภาพันธ์ 2555 เวลา 12.00 น.รวม 60 ชั่วโมง ทำการเก็บค่าความชื้นข้าวเปลือกและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเช่นเดียวกับการเก็บค่าข้าวเปลือกที่ 14% มาตรฐานเปียก

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทที่ 4
วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองการเก็บรักษาข้าวเปลือกโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศในมีผลการทดลองดังนี้

4.1 การทดลองเก็บข้าวเปลือกที่มีความชื้น 14% มาตรฐานเปียกเก็บในสภาพปกติไม่มีการใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ



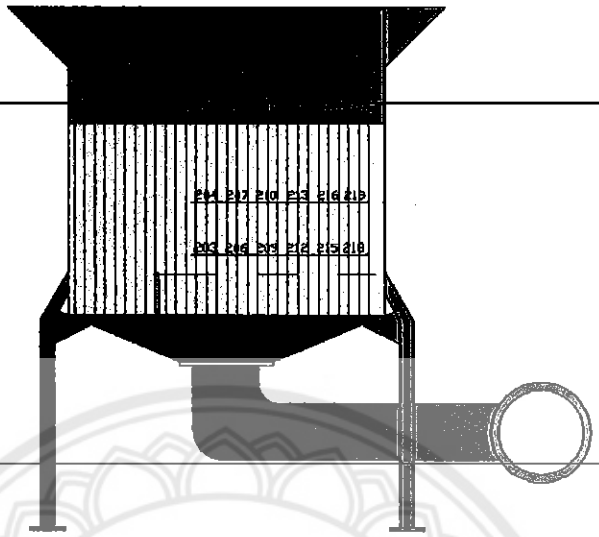
รูปที่ 4.1 แสดงค่าอุณหภูมิแต่ละหลักและแต่ละชั้นของข้าวเปลือกที่ใช้การคำนวณ

การคำนวณค่าอุณหภูมิแต่ละหลักมีดังนี้ หลักที่ 1 จะทำการเฉลี่ยอุณหภูมิข้าวที่จุด 101-105 หลักที่ 2 จะทำการเฉลี่ยอุณหภูมิข้าวที่จุด 108-112 และหลักที่ 3 จะทำการเฉลี่ยอุณหภูมิข้าวที่จุด 115-119 ซึ่งทั้ง 3 หลักเป็นการเฉลี่ยตามแนวรัศมีของถัง โดยหลักที่ 1 จะอยู่ที่จุดศูนย์กลางของถังมีระยะห่างจากขอบถัง 70 *cm* หลักที่ 2 จะอยู่ห่างจากขอบถังเป็นระยะ 35 *cm* และหลักที่ 3 จะอยู่ชิดที่ของผนังของถัง

การคำนวณค่าอุณหภูมิในแต่ละชั้นมีดังนี้ ชั้นที่ 1 จะทำการเฉลี่ยอุณหภูมิข้าวที่จุด 101 108 115 ชั้นที่ 2 จะทำการเฉลี่ยอุณหภูมิข้าวที่จุด 102 109 116 ชั้นที่ 3 จะทำการเฉลี่ยอุณหภูมิข้าวที่จุด

16997161
ปร.
ย5669
2554

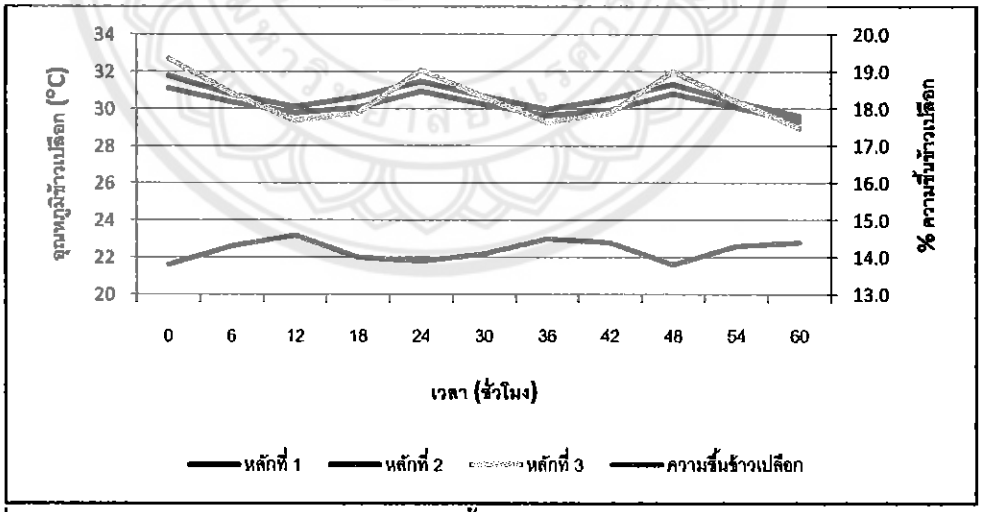
103 110 117 ชั้นที่ 4 จะทำการเฉลี่ยอุณหภูมิข้าวที่จุด 104 111 118 และชั้นที่ 5 จะทำการเฉลี่ยอุณหภูมิข้าวที่จุด 105 112 119 ซึ่งทั้ง 5 ชั้นเป็นการเฉลี่ยตามแนวระดับความสูงของถัง



รูปที่ 4.2 แสดงค่าอุณหภูมิในส่วนระเหยและส่วนควบแน่นของท่อที่ใช้การคำนวณ

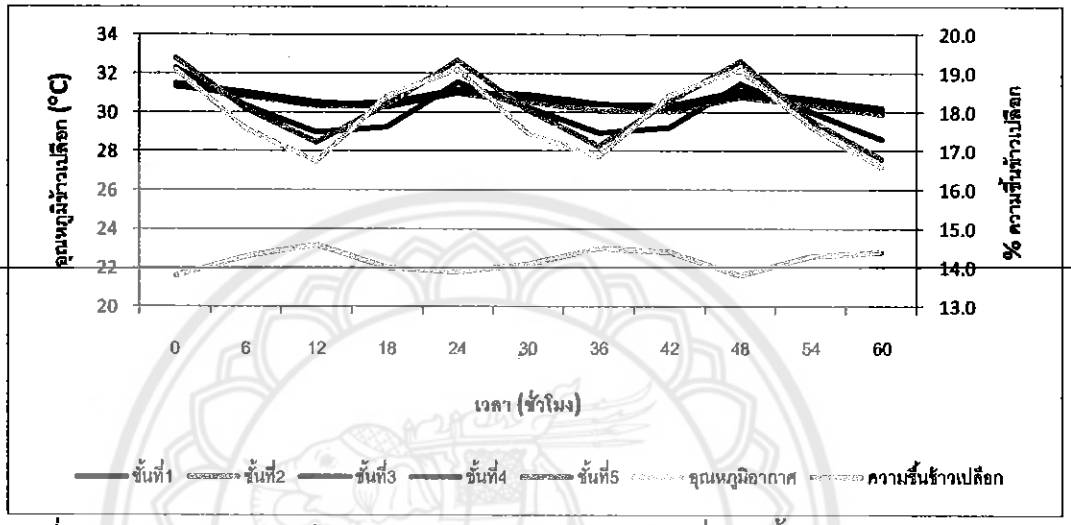
การคำนวณค่าอุณหภูมิในส่วนระเหยมีดังนี้ จะทำการคำนวณค่าอุณหภูมิในส่วนทำระเหยทั้งหมดได้แก่ จุดที่ 203-204, 206-207, 209-210, 212-213, 215-216, และ218-219

การคำนวณค่าอุณหภูมิในส่วนควบแน่นมีดังนี้ จะทำการคำนวณค่าอุณหภูมิในส่วนควบแน่นทั้งหมด ได้แก่ จุดที่ 205 208 211 214 217 และ 220



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือก 14% มาตรฐานเปียกในถังเก็บที่ไม่มีการติดตั้งท่อความร้อนและพัดลมระบายอากาศ

จากรูป 4.3 จะเห็นได้ว่าความชื้นของข้าวเปลือกแปรผกผันกับอุณหภูมิของข้าวเปลือก คือ เมื่ออุณหภูมิของข้าวเปลือกสูงขึ้นความชื้นของข้าวเปลือกก็จะลดลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นจะทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศลดลง ความชื้นจากข้าวระเหยสู่อากาศได้มากขึ้นจึงทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกลดลง จึงทำให้ในเวลากลางวันข้าวเปลือกมีความชื้นต่ำกว่าตอนกลางคืน อุณหภูมิเฉลี่ยของข้าวเปลือกทุกชั้นในถังจะมีอุณหภูมิสูงเฉลี่ยประมาณ 30.93$^{\circ}C$ และความชื้นจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 14.1% มาตรฐานเปียก

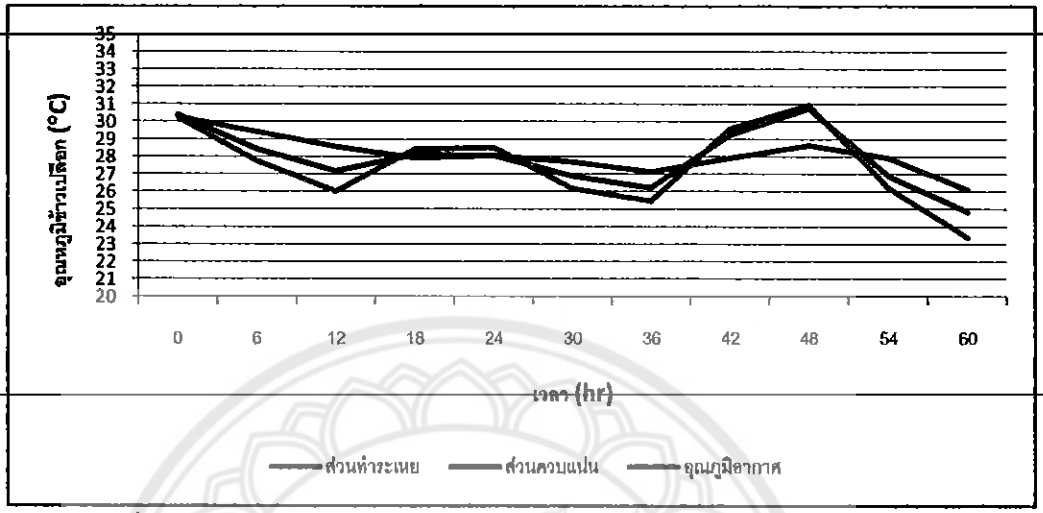


รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ความชื้น 14% มาตรฐานเปียกในถังเก็บในแต่ละชั้นที่ไม่มีการติดตั้งท่อความร้อนและพัดลมระบายอากาศ

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกในแต่ละชั้นมีแนวโน้มลดลงแบบไม่คงที่ ซึ่งอุณหภูมิของข้าวเปลือกในชั้นที่ 1 และชั้นที่ 5 จะมีค่าต่ำสุด จะอยู่ที่ประมาณ 26.45$^{\circ}C$ เนื่องจากชั้นที่ 1 และชั้นที่ 5 เกิดการพาความร้อนแบบธรรมชาติบริเวณพื้นของถังเก็บและบริเวณผิวด้านบนของข้าวเปลือก ส่วนอุณหภูมิของข้าวเปลือกในชั้นที่ 2 ชั้นที่ 3 และชั้นที่ 4 จะมีค่าใกล้เคียงกัน และความชื้นจะมีค่าแปรผกผันกับอุณหภูมิข้าวเปลือกและอุณหภูมิอากาศ คือ เมื่ออุณหภูมิของข้าวเปลือกและอุณหภูมิของอากาศสูงขึ้น ความชื้นของข้าวเปลือกจะมีค่าลดลง ซึ่งอุณหภูมิสุดท้ายของข้าวเปลือกจะอยู่ที่ประมาณ 28-30$^{\circ}C$ ความชื้นสุดท้ายจะอยู่ที่ประมาณ 14% แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิสุดท้ายของข้าวเปลือกก็ยังสูงอยู่ซึ่งอาจจะทำให้ข้าวเปลือกเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นจึงต้องมีการระบายความร้อนให้กับข้าวเปลือกเพื่อรักษาคุณภาพของข้าวเปลือก โดยโครงงานนี้จะอาศัยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ มาช่วยระบายความร้อนในถังเก็บข้าวเปลือก

4.2 การทดลองเก็บข้าวเปลือกที่มีความชื้น 14% มาตรฐานเปียกโดยมีการใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ

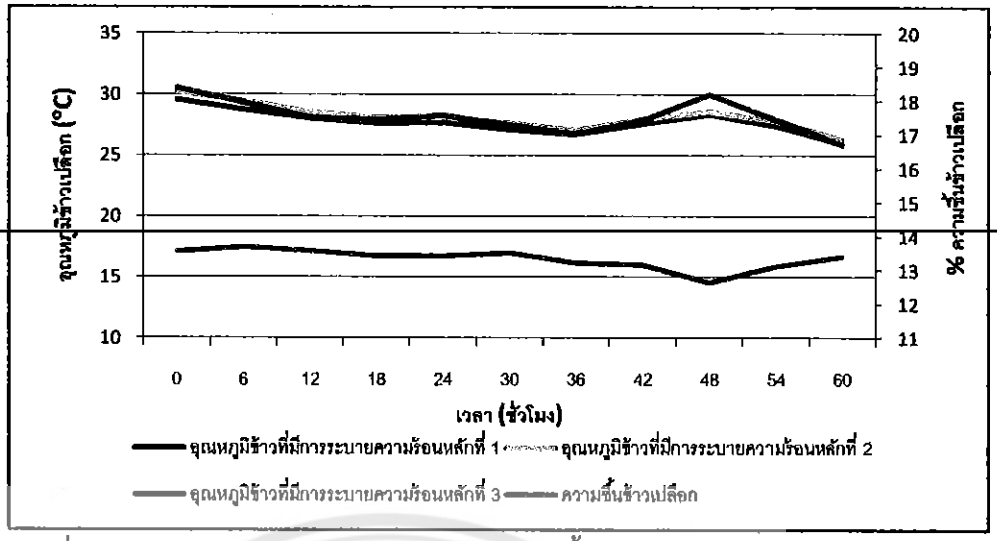
4.2.1 อุณหภูมิส่วนทำระเหยและอุณหภูมิส่วนควบแน่น ที่ผิวท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ



รูปที่ 4.5 เป็นการแสดงอุณหภูมิในส่วนทำระเหยและอุณหภูมิในส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

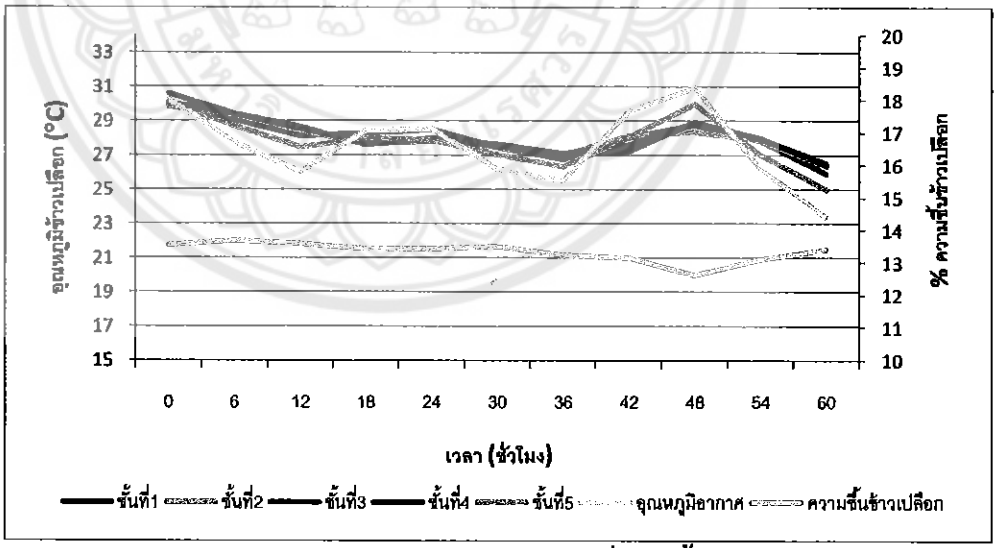
จากรูป 4.5 เป็นการแสดงอุณหภูมิในส่วนทำระเหย และอุณหภูมิในส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ซึ่งมีการจัดวางท่อตามแนวรัศมีของถัง มีทั้งหมด 6 วง (ดูรูป 3.5 ประกอบ) ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิส่วนควบแน่นและอุณหภูมิอากาศจะสูงกว่าอุณหภูมิส่วนทำระเหย แสดงว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบมีการดึงเอาความร้อนของข้าวเปลือกมาถ่ายเทสู่อากาศภายนอก และอุณหภูมิในส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นจะมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบสามารถระบายความร้อนออกจากถังข้าวเปลือกได้ดี และนอกจากนี้อุณหภูมิของส่วนควบแน่นมีลักษณะแนวโน้มคล้ายกับอุณหภูมิของอากาศ

4.2.2 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือก 14% มาตรฐานเปียก ที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการใช้พัดลมระบายอากาศ



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความชื้นข้าวเปลือก 14% มาตรฐานเปียกใน ถังเก็บที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ

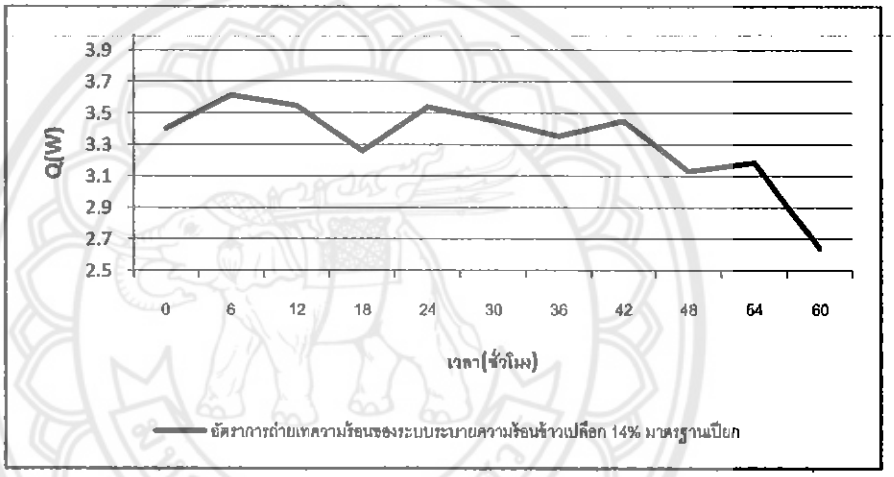
จากรูป 4.6 แสดงอุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือกจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิในแต่ละหลักมีแนวโน้มลดลง ซึ่งอุณหภูมิในหลักที่ 3 ที่อยู่ชิดกับขอบถังเก็บจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 30°C และลดลงตามเวลาที่ทดลอง ส่วนความชื้นจะมีค่าผกผันกับอุณหภูมิของข้าวเปลือก และเมื่อเก็บในระยะเวลา 60 ชั่วโมง อุณหภูมิของข้าวเปลือกสามารถลดลงได้ในช่วง 26–27°C และความชื้นลดลงอยู่ที่ 12.5% มาตรฐานเปียกเมื่อเปรียบเทียบกับการเก็บรักษาข้าวเปลือกในสภาพปกติ



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ความชื้น 14% มาตรฐานเปียกใน ถังเก็บในแต่ละชั้นโดยมีการติดตั้งท่อความร้อนร่วมกับพัดลมระบายอากาศ

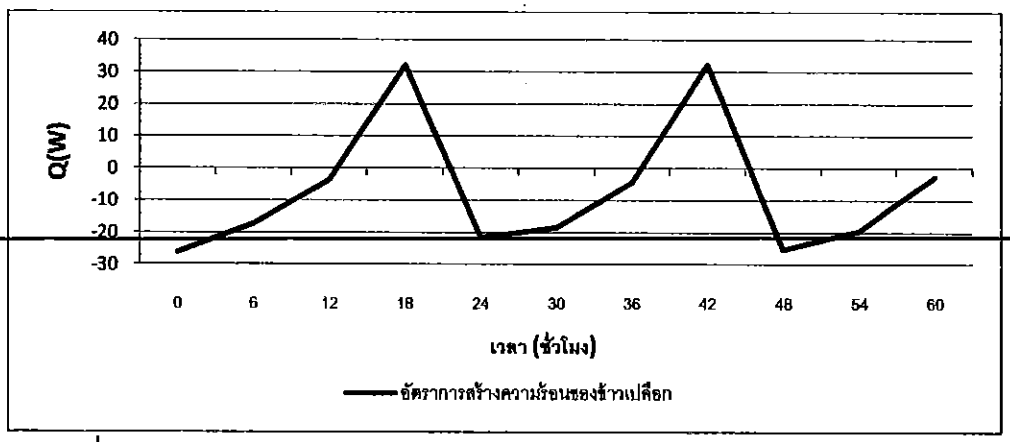
จากรูที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกในแต่ละชั้นมีอุณหภูมิน้อยกว่าอุณหภูมิอากาศ ซึ่งแต่ชั้นจะมีค่าอุณหภูมิใกล้เคียงกัน จนเวลาผ่านไปประมาณ 50 ชั่วโมงแล้วอุณหภูมิในแต่ละชั้นจะเริ่มแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยจะเห็นว่าชั้นที่ 1 และชั้นที่ 5 จะมีอุณหภูมิสูง เนื่องจากอุณหภูมิอากาศที่ระบายมีอุณหภูมิสูง ซึ่งจะเห็นว่าชั้นที่ 1 ข้าวเปลือกจะอยู่บริเวณผิวด้านล่างของถังและชั้นที่ 5 จะอยู่บริเวณผิวด้านบนของถัง จึงทำให้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศมากที่สุด สำหรับชั้นอื่นๆจะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ส่วนความชื้นของข้าวเปลือกจะมีค่าผกผันกับอุณหภูมิข้าวเปลือกและอุณหภูมิอากาศ เมื่อเวลาผ่านไป 60 ชั่วโมง สามารถลดอุณหภูมิได้ถึง 27.5$^{\circ}C$ และความชื้นอยู่ที่ 12.5% มาตรฐานเปียก

4.2.3 สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของระบบการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ความชื้น 14% มาตรฐานเปียก



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ความชื้น 14% มาตรฐานเปียกและเวลา

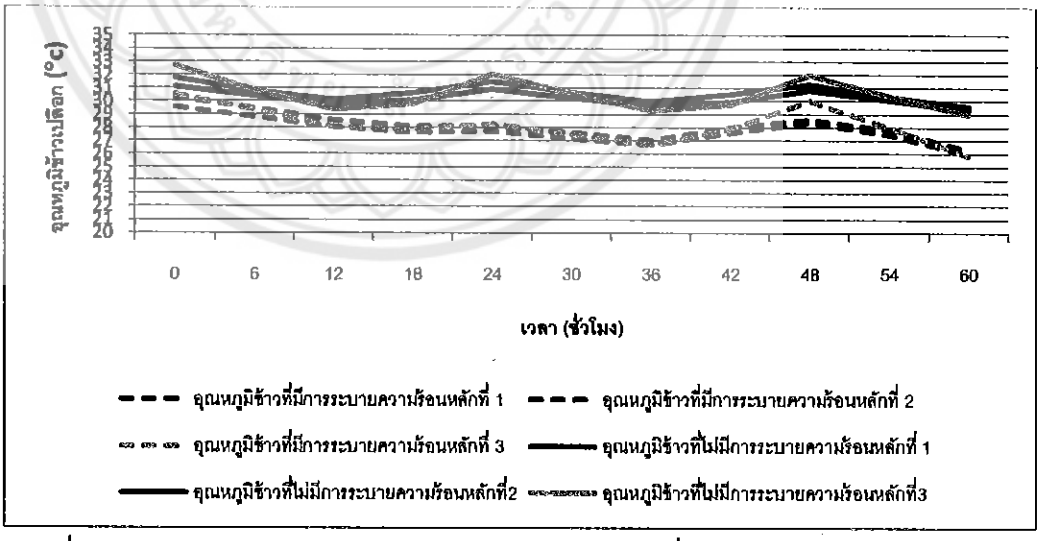
จากรูปที่ 4.8 แสดงอัตราการระบายความร้อนของระบบสู่อากาศภายนอก ซึ่งมีการระบายความร้อนเป็นแบบการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ที่ส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายความร้อนโดยใช้พัดลม ซึ่งจะเห็นว่าอัตราการระบายความร้อนของระบบจะมีระดับสูงต่ำสลับกันเนื่องจากช่วงเวลามีผลต่อการหายใจของข้าวซึ่งในเวลากลางวันจะมีการใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับพัดลมระบายอากาศจึงทำให้อัตราการระบายความร้อนมีค่าสูงและในช่วงเวลากลางคืนจะมีการใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบระบายอากาศเพียงอย่างเดียว จึงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าต่ำ ซึ่งค่าอัตราการระบายความร้อนเฉลี่ยของระบบเป็นเวลา 60 ชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 3.33W



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสร้างความร้อนของข้าวเปลือกและเวลา

จากรูปที่ 4.9 แสดงอัตราความร้อนที่เกิดจากข้าวเปลือก ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการหายใจของข้าวเปลือก ซึ่งค่าความร้อนของข้าวจะเพิ่มขึ้นในช่วงกลางวันซึ่งจุดสูงสุดนั้นจะอยู่ในช่วงเวลา 12.00 น.-16.00 น. และจะลดลงในช่วงกลางคืนซึ่งจุดต่ำสุดจะอยู่ในช่วงเวลา 18.00-24.00 น. จะเห็นได้ว่าข้าวเปลือกมีการสร้างความร้อนอยู่ตลอดเวลา ซึ่งมีอัตราการสร้างความร้อนเฉลี่ยเป็นเวลา 60 ชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 18.55W และจากการหาประสิทธิภาพของระบบการระบายความร้อนของข้าวเปลือกที่ความชื้น 14% มาตรฐานเปียกมีค่าเท่ากับ 35.09%

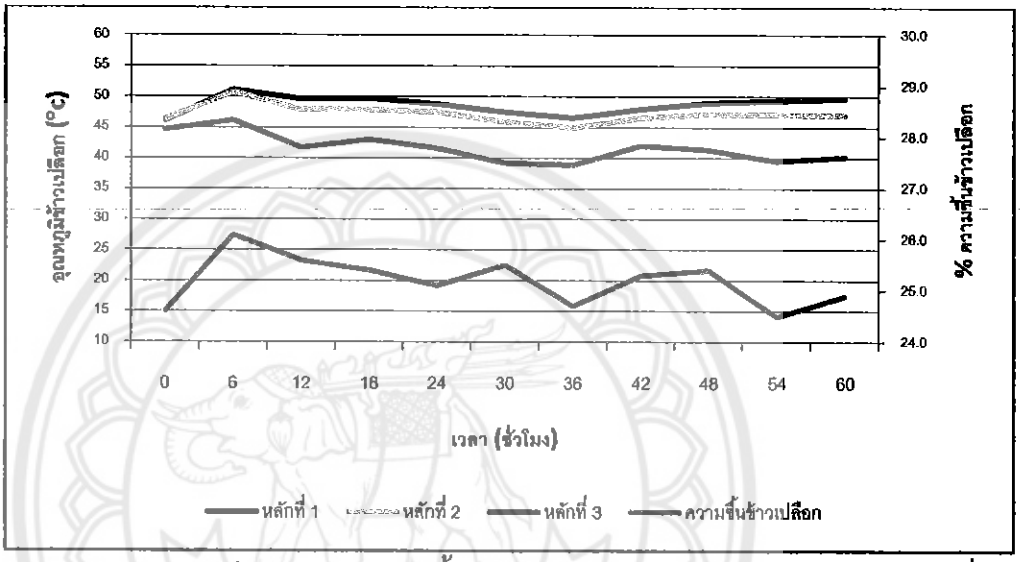
4.3 การเปรียบเทียบอุณหภูมิในถังข้าวเปลือกที่ความชื้น 14% มาตรฐานเปียกโดยมีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ



รูปที่ 4.10 แสดงอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บข้าวเปลือกที่เก็บแบบปกติและเก็บแบบระบายอากาศ

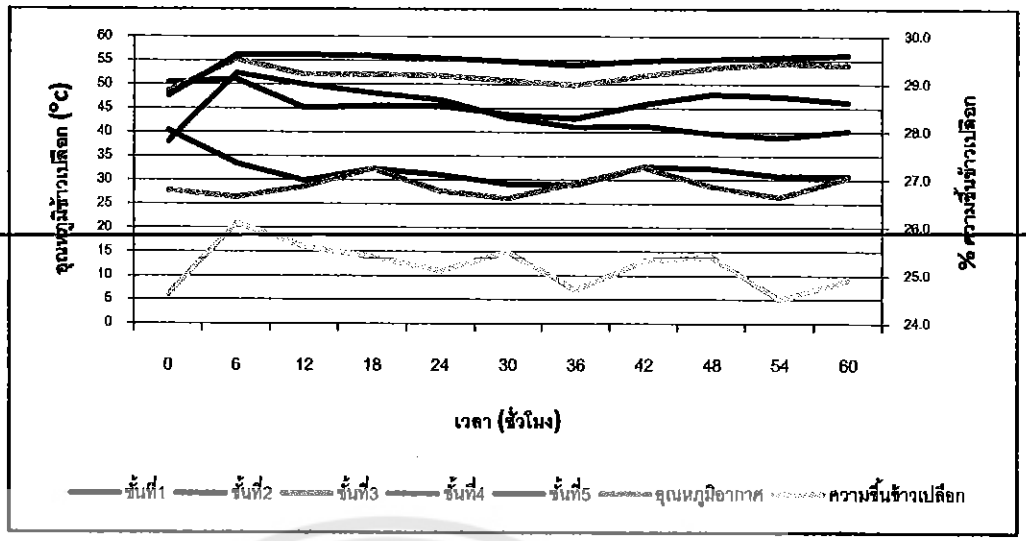
จากรูปที่ 4.10 อุณหภูมิของข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อนจะมีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ไม่มีการระบายความร้อนอย่างเห็นได้ชัด ในช่วงแรกอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อนและอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ไม่มีการระบายความร้อนจะมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิของข้าวเปลือกจะเริ่มแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าการระบายความร้อนในข้าวเปลือกมีผลทำให้อุณหภูมิของข้าวเปลือกลดลงตามระยะเวลาในการทดลอง

4.4 การทดลองเก็บข้าวเปลือกที่มีความชื้น 26% เก็บในสภาพปกติไม่มีการใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือก 26% มาตรฐานเปียกในถังเก็บที่ไม่มีการติดตั้งท่อความร้อนและพัดลมระบายอากาศ

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าหลักที่ 3 จะมีอุณหภูมิต่ำที่สุดเนื่องจากข้าวเปลือกที่อยู่ติดกับบริเวณผนังถังเก็บจะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการนำความร้อนระหว่างข้าวเปลือกในถังเก็บกับอุณหภูมิอากาศผ่านผนังท่อ ทำให้อุณหภูมิหลักที่ 3 สูญเสียความร้อนให้กับบรรยากาศมากที่สุด ตามด้วยหลักที่ 2 และ 1 ตามลำดับ โดยหลักที่ 1 และหลักที่ 2 จะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกันซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากเกิดความร้อนสะสมจากการหายใจของข้าวเปลือก ส่วนความชื้นของข้าวเปลือกจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงเล็กน้อยตามระยะเวลาที่ทำการทดลอง ถ้าอากาศมีอุณหภูมิสูงจะทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ลดลงทำให้ความชื้นจากข้าวระเหยสู่อากาศได้ทำให้ความชื้นข้าวเปลือกลดลงและถ้าอากาศมีอุณหภูมิต่ำจะทำให้ความชื้นสัมพัทธ์สูงทำให้ความชื้นในข้าวเปลือกไม่สามารถระเหยออกได้จึงทำให้เกิดการงอกของข้าวเปลือกอีกทั้งยังเกิดเชื้อราและเกิดการเน่าของข้าวเปลือกด้วย โดยใช้เวลาเก็บผล 60 ชั่วโมง จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 45°C และความชื้นข้าวเปลือกอยู่ที่ 25% มาตรฐานเปียก

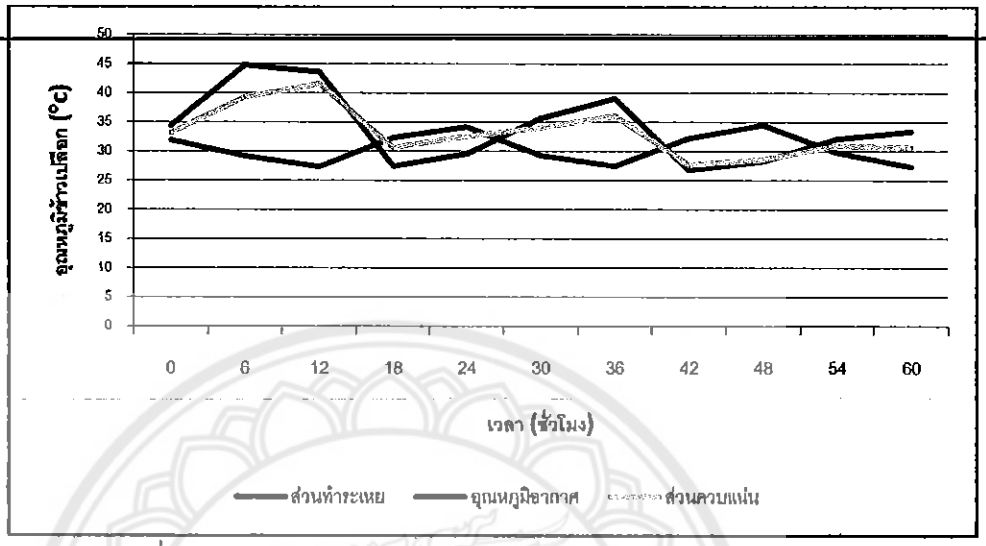


รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิข้าวเปลือก 26% มาตรฐานเปียกในถังเก็บในแต่ละชั้นที่ไม่มีการติดตั้งท่อความร้อนและพัดลมระบายอากาศ

จากรรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าอุณหภูมิข้าวเปลือกชั้นที่ 1 จะมีอุณหภูมิต่ำสุดเนื่องจากอยู่บริเวณด้านล่างของถังเก็บทำให้ความร้อนที่สะสมอยู่ในบริเวณชั้นที่ 1 เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติกับอากาศด้านล่างของถังเก็บ จึงทำให้มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอากาศ โดยชั้นที่ 5 ก็มีการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการพาแบบธรรมชาติเช่นกันแต่จะอยู่บริเวณผิวด้านบนของข้าวเปลือกในถังเก็บและอุณหภูมิจะสูงกว่าชั้นที่ 1 เพราะว่าความร้อนที่สะสมอยู่ในถังจะลอยตัวขึ้นมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศบริเวณผิวด้านบน ส่วนชั้นที่ 4,3,2 จะมีอุณหภูมิสูงในช่วงแรกและต่ำลงมาตามลำดับ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีการสะสมของความร้อนที่เกิดจากการหายใจของข้าวเปลือกค่อนข้างสูงและยังมีความร้อนที่ลอยตัวขึ้นมาจากชั้นด้านล่างมารวมอีกด้วยจึงทำให้ชั้นที่ 4 มีอุณหภูมิสูงสุด ส่วนเส้นความชื้นของข้าวเปลือกจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกเช่นเดียวกับอุณหภูมิข้าวเปลือกและจะลดลงตามระยะเวลาถ้าอากาศมีอุณหภูมิต่ำจะทำให้ความชื้นสัมพัทธ์สูงทำให้ความชื้นในข้าวเปลือกไม่สามารถระเหยออกได้จึงทำให้เกิดการงอกของข้าวเปลือกอีกทั้งยังเป็นสาเหตุของเชื้อราและการเน่าของข้าวเปลือก

4.5 การทดลองเก็บข้าวเปลือกที่มีความชื้น 26% มาตรฐานเปียก โดยมีการใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ

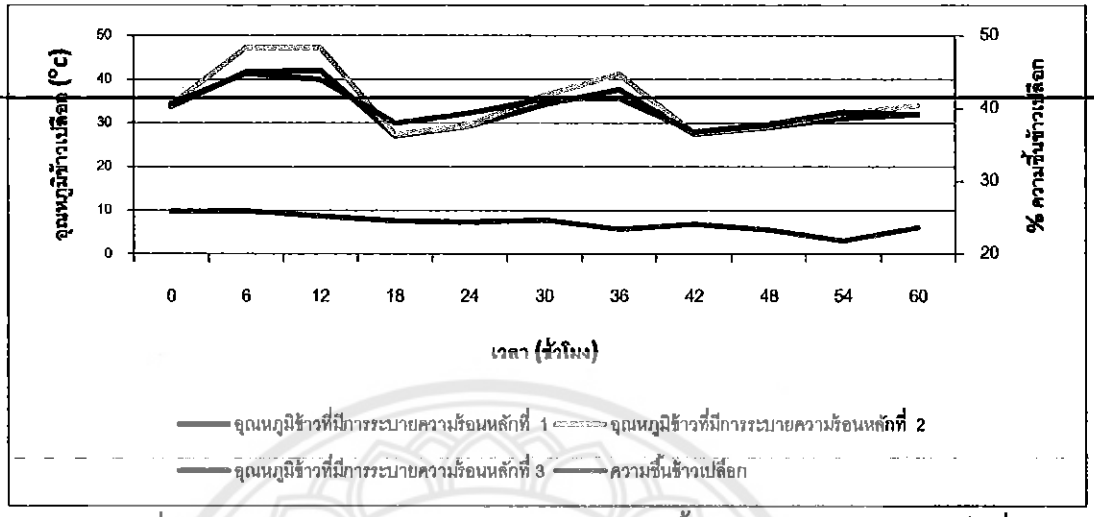
4.5.1 อุณหภูมิส่วนทำระเหยและอุณหภูมิส่วนควบแน่นที่ผิวท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ



รูปที่ 4.13 แสดงอุณหภูมิในส่วนทำระเหย และอุณหภูมิในส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

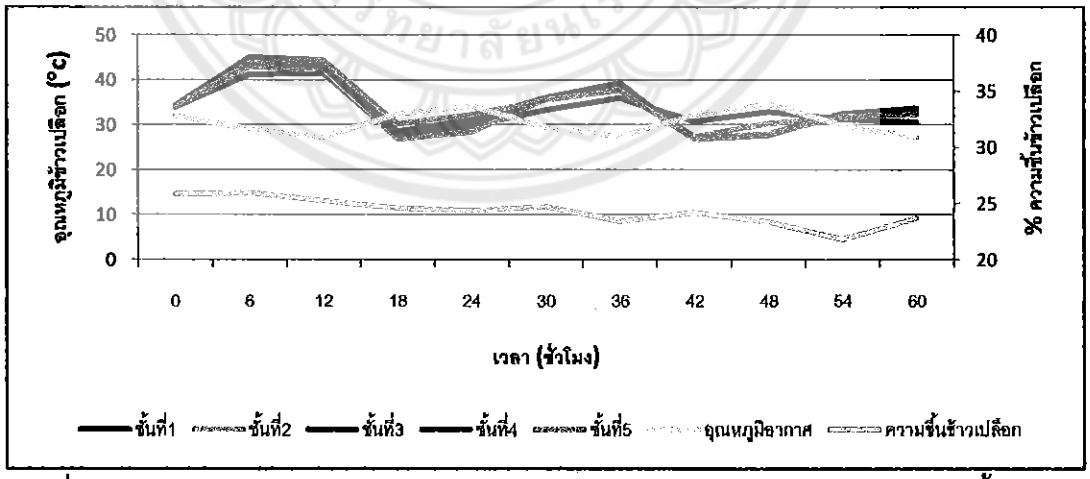
จากรูปที่ 4.13 เป็นการแสดงอุณหภูมิในส่วนทำระเหย และอุณหภูมิในส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ซึ่งมีการจัดวางท่อตามแนวรัศมีของถัง มีทั้งหมด 6 วง ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิส่วนควบแน่นและอุณหภูมิอากาศจะต่ำกว่าอุณหภูมิส่วนทำระเหย เนื่องจากข้าวเปลือกมีความร้อนสูง แสดงว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบมีการดึงเอาความร้อนของข้าวเปลือกมาถ่ายเทสู่อากาศภายนอก และอุณหภูมิในส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นจะมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบสามารถระบายความร้อนออกจากถังข้าวเปลือกได้ดี

4.5.2 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือก 26% ที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการใช้พัดลมระบายอากาศ



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความชื้นข้าวเปลือก 26% ในถังเก็บที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ

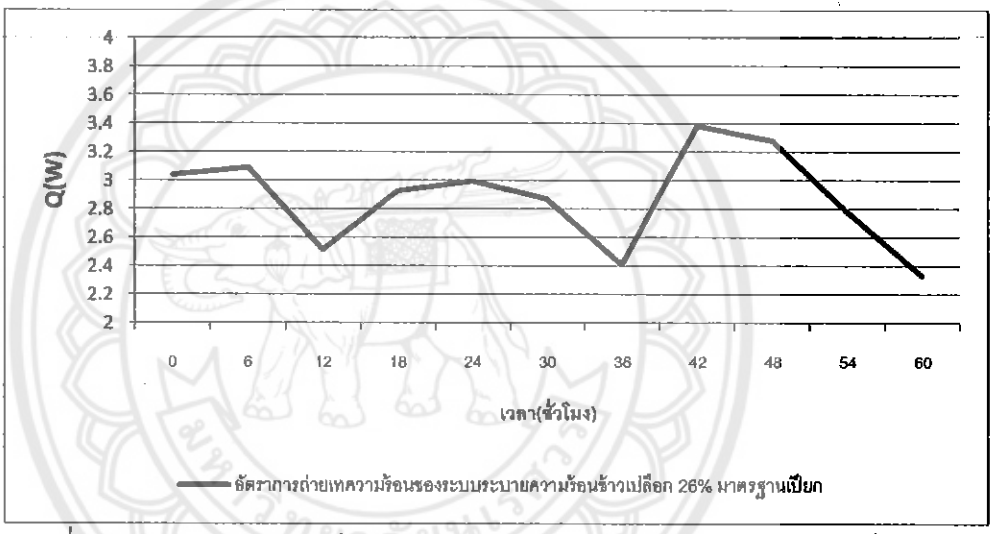
จากรูปที่ 4.14 จากกราฟอุณหภูมิของข้าวเปลือกและความชื้นของข้าวเปลือกจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกในแต่ละหลักจะมีใกล้เคียงกัน อุณหภูมิของข้าวเปลือกในช่วงแรกจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง อุณหภูมิของข้าวจะลดลงแบบไม่คงที่เช่นเดียวกับความชื้นของข้าวเปลือก และเมื่อเก็บไปจนถึง 60 ชั่วโมง สามารถเก็บอุณหภูมิของข้าวเปลือกเฉลี่ยได้ประมาณ 32.5 $^{\circ}C$ และความชื้นสามารถลดได้ถึง 23.67 % มาตรฐานเปียก



รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิข้าวเปลือก 26% ในถังเก็บในแต่ละชั้นโดยมีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับพัดลมระบายอากาศ

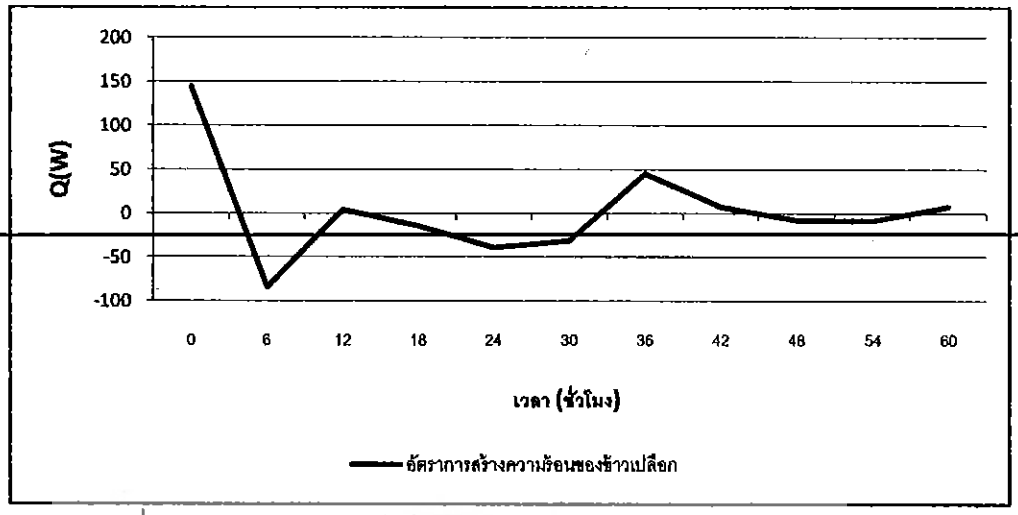
จากรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกในแต่ละชั้นมีแนวโน้มลดลงแบบไม่คงที่ ซึ่งอุณหภูมิของข้าวเปลือกในชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 จะมีค่าต่ำสุด จะอยู่ที่ประมาณ 27.8°C เนื่องจากชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 เกิดการพาความร้อนแบบธรรมชาติบริเวณพื้นของถังเก็บ และอุณหภูมิของข้าวเปลือกในชั้นที่ 4 และชั้นที่ 5 เนื่องจากจะมีค่าสูงสุดข้าวเปลือกในชั้นที่ 4 และชั้นที่ 5 เกิดการพาความร้อนแบบธรรมชาติบริเวณผิวด้านบนของถังเก็บ ส่วนอุณหภูมิของข้าวเปลือกในชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 จะมีค่าใกล้เคียงกัน ค่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกและจะมีค่าแปรผกผันกับและอุณหภูมิอากาศ คือ เมื่ออุณหภูมิของข้าวเปลือกและอุณหภูมิของอากาศสูงขึ้น ความชื้นของข้าวเปลือกจะมีค่าลดลง ซึ่งอุณหภูมิสุดท้ายของข้าวเปลือกจะอยู่ที่ประมาณ 27-32°C ความชื้นสุดท้ายจะอยู่ที่ประมาณ 23.6%

4.5.3 สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของระบบการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ความชื้น 26% มาตรฐานเปียก



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ความชื้น 26% มาตรฐานเปียกและเวลา

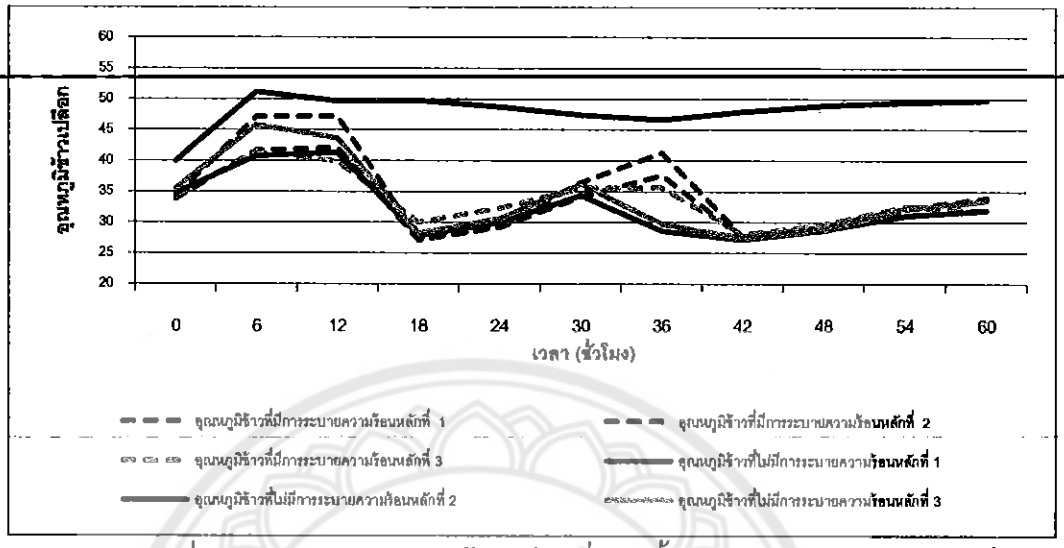
จากรูปที่ 4.16 แสดงอัตราการระบายความร้อนของระบบสู่อากาศภายนอก ซึ่งมีการระบายความร้อนเป็นแบบการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ที่ส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ร่วมกับการระบายความร้อนโดยใช้พัดลม ซึ่งจะเห็นว่าอัตราการระบายความร้อนของระบบจะมีระดับสูงต่ำสลับกันเนื่องจากช่วงเวลามีผลต่อการหายใจของข้าวซึ่งในเวลากลางวันจะมีการใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับพัดลมระบายอากาศจึงทำให้อัตราการระบายความร้อนมีค่าสูง และในช่วงเวลากลางคืนจะมีการใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบระบายอากาศเพียงอย่างเดียว จึงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าต่ำ ซึ่งค่าอัตราการระบายความร้อนเฉลี่ยของระบบเป็นเวลา 60 ชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 2.88 W



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสร้างความร้อนของข้าวเปลือกและเวลา

จากรูปที่ 4.17 แสดงอัตราการสร้างความร้อนของข้าวเปลือกที่ความชื้น 26% มาตรฐานเปียก จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกอัตราความร้อนของข้าวเปลือกจะสูงมากเนื่องจากข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้นสูง ทำให้ข้าวเปลือกมีการหายใจและคายความร้อนออกมาได้มาก และอัตราความร้อนของข้าวเปลือกจะลดต่ำลงในช่วงเวลากลางคืนเนื่องจากอากาศภายนอกมีอุณหภูมิต่ำและในช่วงเวลากลางวันมีอุณหภูมิสูงขึ้นจึงทำให้อัตราการสร้างความร้อนของข้าวเปลือกสูงขึ้นตามไปด้วย ดังจะเห็นได้จากกราฟที่มีช่วงสูงต่ำสลับกันไป จากการหาประสิทธิภาพของระบบการระบายความร้อนของข้าวเปลือกที่ความชื้น 26% มาตรฐานเปียกมีค่าเท่ากับ 24.1%

4.6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิในถังข้าวเปลือกที่ความชื้น 26% มาตรฐานเปียกโดยมีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ



รูปที่ 4.18 แสดงอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ความชื้น 26% มาตรฐานเปียกในถังเก็บข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อนและไม่มีการระบายความร้อน

จากรูปที่ 4.18 อุณหภูมิของอากาศที่มีการระบายความร้อนและไม่มีการระบายความร้อนนั้น อุณหภูมิจะไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งกราฟที่ไม่มีการระบายความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงกว่าและจากกราฟอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อน แสดงให้เห็นว่าการระบายความร้อนในข้าวเปลือกมีผลทำให้อุณหภูมิของข้าวเปลือกลดลงตามระยะเวลาในการทดลอง

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการเก็บผลการทดลองข้าวเปลือกที่ไม่มีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศและที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศทำให้สามารถทราบลักษณะการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกทั้งที่ไม่มีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศและที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศเพื่อหาสมรรถนะทางความร้อนของการระบายความร้อนในข้าวเปลือกโดยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 จากผลการทดลองของระบบที่ไม่มีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ ที่ความชื้น 14% ซึ่งทำการทดลองจำนวน 60 ชั่วโมงจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังมีค่าลดลงแบบไม่คงที่และมีค่าผกผันกับความชื้นของข้าวเปลือก อุณหภูมิเฉลี่ยของข้าวเปลือกทุกชั้นในถังจะมีอุณหภูมิสูงเฉลี่ยประมาณ 30.93$^{\circ}C$ และความชื้นจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 14.1%

5.1.2 จากผลการทดลองระบบที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ ที่ความชื้น 14% ซึ่งใช้เวลาเก็บ 60 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกมีค่าลดลงสามารถควบคุมอุณหภูมิได้อยู่ในช่วง 26–27$^{\circ}C$ และสามารถลดความชื้นได้ถึง 12.5% และมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนอยู่ที่ 35.09% เมื่อเปรียบเทียบกับการเก็บรักษาข้าวเปลือกในสภาพปกติ จะเห็นได้ว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบสามารถระบายความร้อนในชั้นข้าวเปลือกได้

5.1.3 จากผลการทดลองของระบบที่ไม่มีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ ที่ความชื้น 26% ซึ่งใช้เวลาในการเก็บ 60 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิจะลดลงอยู่ที่ประมาณ 45$^{\circ}C$ และความชื้นจะลดลงจนถึง 25%

5.1.4 จากผลการทดลองของระบบที่มีการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับการระบายอากาศ ที่ความชื้น 26% ซึ่งใช้เวลาในการเก็บ 60 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิในชั้นข้าวเปลือกได้ถึง 32.5$^{\circ}C$ และความชื้นลดลงถึง 23.67% มาตรฐานเปียก และมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนอยู่ที่ 24.1%

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมการข้าวกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, วิทยาการก่อนและหลังเก็บเกี่ยว (ออนไลน์) , แหล่งที่มาhttp://www.brrd.in.th/rkb/data_007/rice_xx2-07_gatherNew_004.html (วันที่ค้นข้อมูล 16 กันยายน 2554

[2] Nathawuth Dussadee , Tanongkiat Kiatsiriroat , Performance analysis and economic evaluation of thermosyphon paddy bulk storage , Applied Thermal Engineering Vol. 24 PP. 401–414 , 2004.

[3] Nathawuth Dussadee , Tammasak Punsaensri , Tanongkitat Kiatsiriroat ,Temperature control of paddy bulk storage with aeration-thermosyphon heat pipe , Energy Conversion and Management , Vol.48 , PP. 138-145 , 2007.

[4] พฤทธ์ สกุลช่างสัจจะทัย , แบบจำลองการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิดและแบบสั่นวงรอบ (ออนไลน์) , (2008),แหล่งที่มา http://library.cmu.ac.th/digital_collection/etheses/fulltext.php?id=9796#_(วันที่สืบค้นข้อมูล 16 กันยายน 2554)

[5] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท, หน้า 213-250, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540

[6] มนตรี พิรุณเกษตร, คู่มือ อุณหพลศาสตร์ 2 ของผสมอากาศชื้น, หน้า 359-363, (2540)

[7] Yunus A. Cengel , Michael A. Boles ,THERMODYNAMICS An Engineer Approach 6th edition , กฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ , หน้า 52-54

[8] คเณศ มูลเทพ, ณัฐพล รัตนะ, เอกชัย อักษรผดุงกุล, การควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ, 2553

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณปริมาณการเติมสารทำงาน

คำนวณปริมาณการเติมสารทำงานได้จากสมการดังต่อไปนี้

ปริมาตรการเติมสุทธิ= $V_{total} \times F$

โดย $L = 60cm \quad D_i = 1.4mm \quad D_o = 2.2mm$

ตัวแปรทำงานที่ $40^{\circ}C \quad \rho = 1187.2kg/m^3$

สูตรการคำนวณการเติมสารภายในท่อ คือ

$$V = \frac{\pi D^2 h}{4}$$

$$V = \frac{\pi D^2 L}{4} = 0.0000923601$$

ใช้อัตราการเติมสาร 50% ของปริมาตรท่อ

$V_{50\%} = 0.0000461814$

$$m = V_{50\%} \times \rho$$

$$m = 0.00004618 \times 1187.2 = 0.055kg$$

ดังนั้นจะได้อัตราการเติมสารทำงานเท่ากับ 55 g

ตัวอย่างการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

ผิวท่อที่คอนเดนเซอร์มีอุณหภูมิ 302 K ความยาว 0.9 m ท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2.2 mm ถูกพาความร้อนด้วยอากาศที่ 300 K

สมบัติของอากาศ $T_f = \left(\frac{302+300}{2}\right) = 301 \approx 300$

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

$K = 0.0263 W/m.K$

$\beta = \frac{1}{300} K^{-1}$

$\Pr = 0.707$

$Gr = \left(\frac{g\beta L^3 (T_{con} - T_a)}{V^2}\right) = 188824125.6$

$$Nu_{m,plate} = \left\{0.825 + \frac{0.387(Gr_L \Pr)^{\frac{1}{6}}}{\left[1+\left(\frac{0.492}{\Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}}}\right\}^2 = 66.535$$

จาก $h_m = \frac{Nu_m k}{L} = 6.99 W/m^2.K$

อัตราการสูญเสียความร้อนจากท่อ

$\dot{Q}_{loss} = A(T_{con} - T_a)h_m$

$\dot{Q}_{loss} = \pi DL(T_{con} - T_a)h_m = 0.51$

ตัวอย่างการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของข้าวเปลือก

เก็บข้าวเปลือกในถัง 500 kg อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 30.1 $^{\circ}C$ เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง อุณหภูมิของข้าวเปลือกลดลงเหลือ 29.6 $^{\circ}C$ และความชื้นของข้าวเปลือกอยู่ที่ 13.55%

หาค่า C_p จากตาราง ข.3

จะได้ $C_p = (3.1\times(W)+1.2648)\times 10^3$

ซึ่ง $W = 0.1355$

นำไปแทนในสมการ C_p จะได้

$$C_p = (3.1\times(0.1355)+1.2648)\times 10^3 = 1684.85\ KJ/Kg$$

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

$$Q_{paddy} = [500\times 1684.85\times(29.6-30.1]/(3600\times 6)$$

$$Q_{paddy} = -19.7\ W$$

ตัวอย่างการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศ

ถังบรรจุข้าวเปลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์ลาง 170 cm บรรจุข้าวเปลือกที่ความชื้น 14% มาตรฐานเปียกจำนวน 500 kg ลงในถัง ซึ่งสูงจากถัง 65 cm วัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศได้ 1.7 $m^3/min/m^3_{paddy}$ กำหนดค่าเอนทาลปีที่วัดค่าได้เท่ากับ 67.272 kJ/Kg

หาค่า $\dot{m} = \dot{V} \times \rho$

จะได้ $\dot{m} = \frac{1.7}{60} \times 0.65 \times \pi \times \frac{1.7^2}{4} \times 1.2$

ซึ่ง $\dot{m} = 0.05$

จากสมการ $\dot{Q} = \dot{m} \times h$

นำค่า $\dot{m} = 0.016$ ไปแทนในสมการ จะได้

$\dot{Q} = 0.05 \times 67.272$

$\dot{Q} = 3.374W$

ภาคผนวก ข

ตารางคุณสมบัติ

ตาราง ข.1 แสดงคุณสมบัติของอากาศ

Properties of air at 1 atm pressure

Temp. T, °C	Density ρ, kg/m^3	Specific Heat c_p, J/kg · K	Thermal Conductivity k, W/m · K	Thermal Diffusivity α, m^2/s^2	Dynamic Viscosity μ, kg/m · s	Kinematic Viscosity ν, m^2/s	Prandtl Number Pr
−150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
−100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}	0.7263
−50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
−40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
−30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
−20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
−10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935

ตาราง ข.2 แสดงคุณสมบัติของ R134a

Properties of saturated refrigerant-134a

Temp.	Saturation Pressure	Density ρ, kg/m^3		Enthalpy of Vaporization	Specific Heat c_p, J/kg · K		Thermal Conductivity k, W/m · K		Dynamic Viscosity μ, kg/m · s		Prandtl Number Pr		Volume Expansion Coefficient β, 1/K	Surface Tension,
T, °C	P, kPa	Liquid	Vapor	h_{fg}, kJ/kg	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	N/m
-40	51.2	1418	2.773	225.9	1254	748.6	0.1101	0.00811	4.878×10^{-4}	2.550×10^{-6}	5.558	0.235	0.00205	0.01760
-35	66.2	1403	3.524	222.7	1264	764.1	0.1084	0.00862	4.509×10^{-4}	3.003×10^{-6}	5.257	0.266	0.00209	0.01682
-30	84.4	1389	4.429	219.5	1273	780.2	0.1066	0.00913	4.178×10^{-4}	3.504×10^{-6}	4.992	0.299	0.00215	0.01604
-25	106.5	1374	5.509	216.3	1283	797.2	0.1047	0.00963	3.882×10^{-4}	4.054×10^{-6}	4.757	0.335	0.00220	0.01527
-20	132.8	1359	6.787	213.0	1294	814.9	0.1028	0.01013	3.614×10^{-4}	4.651×10^{-6}	4.548	0.374	0.00227	0.01451
-15	164.0	1343	8.288	209.5	1306	833.5	0.1009	0.01063	3.371×10^{-4}	5.295×10^{-6}	4.363	0.415	0.00233	0.01376
-10	200.7	1327	10.04	206.0	1318	853.1	0.0989	0.01112	3.150×10^{-4}	5.982×10^{-6}	4.198	0.459	0.00241	0.01302
-5	243.5	1311	12.07	202.4	1330	873.8	0.0968	0.01161	2.947×10^{-4}	6.709×10^{-6}	4.051	0.505	0.00249	0.01229
0	293.0	1295	14.42	198.7	1344	895.6	0.0947	0.01210	2.761×10^{-4}	7.471×10^{-6}	3.919	0.553	0.00258	0.01156
5	349.9	1278	17.12	194.8	1358	918.7	0.0925	0.01259	2.589×10^{-4}	8.264×10^{-6}	3.802	0.603	0.00269	0.01084
10	414.9	1261	20.22	190.8	1374	943.2	0.0903	0.01308	2.430×10^{-4}	9.081×10^{-6}	3.697	0.655	0.00280	0.01014
15	488.7	1244	23.75	186.6	1390	969.4	0.0880	0.01357	2.281×10^{-4}	9.915×10^{-6}	3.604	0.708	0.00293	0.00944
20	572.1	1226	27.77	182.3	1408	997.6	0.0856	0.01406	2.142×10^{-4}	1.075×10^{-5}	3.521	0.763	0.00307	0.00876
25	665.8	1207	32.34	177.8	1427	1028	0.0833	0.01456	2.012×10^{-4}	1.160×10^{-5}	3.448	0.819	0.00324	0.00808
30	770.6	1188	37.53	173.1	1448	1061	0.0808	0.01507	1.888×10^{-4}	1.244×10^{-5}	3.383	0.877	0.00342	0.00742
35	887.5	1168	43.41	168.2	1471	1098	0.0783	0.01558	1.772×10^{-4}	1.327×10^{-5}	3.328	0.935	0.00364	0.00677
40	1017.1	1147	50.08	163.0	1498	1138	0.0757	0.01610	1.660×10^{-4}	1.408×10^{-5}	3.285	0.995	0.00390	0.00613
45	1160.5	1125	57.66	157.6	1529	1184	0.0731	0.01664	1.554×10^{-4}	1.486×10^{-5}	3.253	1.058	0.00420	0.00550
50	1318.6	1102	66.27	151.8	1566	1237	0.0704	0.01720	1.453×10^{-4}	1.562×10^{-5}	3.231	1.123	0.00455	0.00489
55	1492.3	1078	76.11	145.7	1608	1298	0.0676	0.01777	1.355×10^{-4}	1.634×10^{-5}	3.223	1.193	0.00500	0.00429
60	1682.8	1053	87.38	139.1	1659	1372	0.0647	0.01838	1.260×10^{-4}	1.704×10^{-5}	3.229	1.272	0.00554	0.00372
65	1891.0	1026	100.4	132.1	1722	1462	0.0618	0.01902	1.167×10^{-4}	1.771×10^{-5}	3.255	1.362	0.00624	0.00315
70	2118.2	996.2	115.6	124.4	1801	1577	0.0587	0.01972	1.077×10^{-4}	1.839×10^{-5}	3.307	1.471	0.00716	0.00261
75	2365.8	964	133.6	115.9	1907	1731	0.0555	0.02048	9.891×10^{-5}	1.908×10^{-5}	3.400	1.612	0.00843	0.00209
80	2635.2	928.2	155.3	106.4	2056	1948	0.0521	0.02133	9.011×10^{-5}	1.982×10^{-5}	3.558	1.810	0.01031	0.00160
85	2928.2	887.1	182.3	95.4	2287	2281	0.0484	0.02233	8.124×10^{-5}	2.071×10^{-5}	3.837	2.116	0.01336	0.00114
90	3246.9	837.7	217.8	82.2	2701	2865	0.0444	0.02357	7.203×10^{-5}	2.187×10^{-5}	4.385	2.658	0.01911	0.00071
95	3594.1	772.5	269.3	64.9	3675	4144	0.0396	0.02544	6.190×10^{-5}	2.370×10^{-5}	5.746	3.862	0.03343	0.00033
100	3975.1	651.7	376.3	33.9	7959	8785	0.0322	0.02989	4.765×10^{-5}	2.833×10^{-5}	11.77	8.326	0.10047	0.00004

ตาราง ข.3 แสดงคุณสมบัติของข้าวเปลือก

Property	Unit	Reference
$C_p = (3.1 \times (W) + 1.2648) \times 10^3$	$J/kg^{\circ}C$	A. Iguaz
$Q_{paddy} = (mC_p \Delta T)/\Delta t$	W	Yunus A. Cengel

ภาคผนวก ค

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ตาราง ค 1 แสดงค่าความชื้นข้าวเปลือก 14% มาตรฐานเปียก

DATE	TIME	ความชื้นข้าวเปลือก 14% มาตรฐานเปียก									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13/1/55	6:00										
	12:00										
	18:00	13.3	13.6	13.9	13.7	13.3	13.5	13.3	13.7	13.8	13.4
	0:00	14.3	13.4	13.6	13.5	13.5	14.2	13.4	13.6	13.8	13.5
14/1/55	6:00	13.0	13.9	14.0	13.4	13.4	13.5	13.6	13.6	13.5	13.8
	12:00	13.2	13.4	13.8	13.7	13.2	13.2	13.4	13.3	13.5	13.6
	18:00	13.0	13.3	13.0	13.8	13.4	13.5	13.3	13.5	13.2	13.0
	0:00	13.6	14.0	13.5	13.9	13.9	13.8	12.7	13.3	13.4	13.5
15/1/55	6:00	13.0	13.2	13.2	13.1	13.1	13.5	13.6	13.5	12.8	13.1
	12:00	13.2	12.8	12.6	13.2	13.2	13.1	14.1	13.0	12.9	13.5
	18:00	12.4	13.0	12.8	12.5	12.9	12.5	12.4	12.5	13.1	12.6
	0:00	12.9	13.7	13.1	13.2	12.7	12.9	12.9	13.3	12.6	13.8
16/1/55	6:00	13.3	13.6	13.3	13.5	12.9	13.5	13.6	13.1	13.8	13.5
	12:00	13.2	13.0	12.9	13.1	12.5	13.0	13.4	13.0	13.3	12.6
	18:00	13.1	12.3	13.0	13.1	13.0	12.1	13.1	12.3	12.0	10.5
	0:00	12.4	12.7	12.6	12.8	12.6	12.6	12.2	12.8	12.5	13.2
17/1/55	6:00	13.1	12.2	13.2	13.2	12.6	12.8	13.6	13.1	13.5	13
	12:00	12.3	12.0	12.4	12.7	12.6	13.2	12.5	12.3	12.1	12.4
	18:00	11.9	11.9	12.1	12.0	12.8	12.2	12.3	12.1	12.4	12.3
	0:00	12.4	12.6	12.1	12.7	13.1	12.5	12.3	12.7	12.2	12.6

ตาราง ค 2 แสดงค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศในการทดลองข้าวเปลือก 14% มาตรฐานเปียก

DATE	TIME	ความชื้นสัมพัทธ์อากาศในการทดลองข้าวเปลือก 14% มาตรฐานเปียก								%RH แวดล้อม	%RHทางเข้า
		1	2	3	4	5	6	7	8		
13/1/55	6:00										
	12:00										
	18:00	55.9	55.5	54.6	52.8	58.3	56.7	53.8	53.9	53.6	56.4
	0:00	70.0	71.5	70.9	70.6	70.6	71.2	71.8	73.2	71.4	72.2
14/1/55	6:00	71.6	70.2	69.9	70.8	70.6	71.2	72.2	71.3	81.3	72.9
	12:00	64.8	64.3	65.1	64.9	66.3	66.2	65.5	65.4	65.1	66.8
	18:00	67.7	66.6	66.0	65.5	66.4	66.2	66.2	67.5	66.6	68.1
	0:00	75.2	75.2	75.5	76.1	76.0	76.0	76.1	76.1	76.3	76.9
15/1/55	6:00	71.1	74.0	77.6	77.7	77.1	77.1	77.3	77.7	77.6	78.4
	12:00	59.9	60.0	59.2	57.6	57.1	57.1	59.5	59.3	56.9	56.3
	18:00	47.8	46.2	44.4	44.5	44.2	47.3	44.5	45.3	43.2	46.3
	0:00	63.5	63.3	63.8	64.1	66.9	66.4	66.6	66.5	66.0	64.5
16/1/55	6:00	62.1	62.2	64.3	63.5	63.0	62.8	62.7	63.1	63.2	63.4
	12:00	58.1	57.2	54.3	53.6	50.9	51.0	51.1	51.0	50.5	50.4
	18:00	48.1	48.9	45.4	45.5	43.7	44.4	44.2	43.6	43.3	44.8
	0:00	63.4	63.8	64.3	64.8	65.1	65.1	65.8	65.8	65.9	66.1
17/1/55	6:00	58.9	59.8	60.8	59.2	59.8	59.2	59.1	60	59.8	59.3
	12:00	50.4	46.1	46.0	46.3	48.5	46.3	45.8	46.0	43.2	44.4
	18:00	47.6	46.4	50.1	47.8	46.1	45.9	45.3	44.8	44.6	44.6
	0:00	66.3	66.2	66.5	66.4	62.2	66.3	66.6	67.4	66.8	66.5

ตาราง ค 3 แสดงค่าความชื้นข้าวเปลือก 26% มาตรฐานเปียก

DATE	TIME	ความชื้นข้าวเปลือก 26% มาตรฐานเปียก									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13/2/55	6:00										
	12:00										
	18:00	26.6	25.6	27	24.6	26.2	25.8	25.2	27	26	24.6
	0:00	25.9	26.6	26.2	26.5	25	25	25.4	26.3	26.8	25.7
14/255	6:00	23.6	25.9	24.7	26.3	24.5	27	25.4	25.1	24.2	25.6
	12:00	26	24.7	21.6	26.4	23.9	23.8	25.4	24.1	25.5	24.2
	18:00	23.4	24.2	22.9	24	22.1	25.7	24.8	24.7	26.5	25.4
	0:00	23.3	22.1	26	25.7	25.1	25.6	26.3	23.6	24.8	25.1
15/2/55	6:00	24.6	26.4	26.1	25.4	23.9	24.9	23.1	20.7	18.5	20.5
	12:00	22.3	24.7	23.5	24.1	23.8	24.9	24.2	25.6	23.4	25.1
	18:00	22.4	25	22.3	24.2	24.2	23.2	23.8	22.2	22.3	23.8
	0:00	21.8	21.3	21.6	21.2	22	22.7	20.2	23.3	22	22.1
16/1/55	6:00	22.7	23.6	24.7	22.5	21.9	24.9	23.7	22.7	25.8	24.2
	12:00										
	18:00										
	0.00										

ตาราง ค 4 แสดงค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศในการทดลองข้าวเปลือก 26% มาตรฐานเปียก

DATE	TIME	ความชื้นสัมพัทธ์อากาศในการทดลองข้าวเปลือก 26% มาตรฐานเปียก								%RH แวดล้อม	%RHทางเข้า
		1	2	3	4	5	6	7	8		
13/2/55	6:00										
	12:00										
	18:00	69	69.4	75.4	71.1	68.3	67.8	66.5	61.2	64.9	73.5
	0:00	72.3	72.2	73.5	72.7	71.4	71.3	74.8	71.3	73.7	81.7
14/255	6:00	67	68.1	71.2	72.3	69.8	70.6	70.2	71.3	69	67.3
	12:00	80.2	87.6	92.8	72.8	76	84.8	80.3	81.6	66.1	71.4
	18:00	70.9	69.8	73.1	66.8	68.2	69.1	67.7	62.4	60.2	61.5
	0:00	70.7	71.2	71	70.8	70.5	70.8	70.5	72	73.2	75.1
15/2/55	6:00	72.2	97.2	90.4	95.3	95.5	95.2	86.1	86.2	71.5	72.6
	12:00	87.5	86.4	90.2	92.7	87.6	93.3	95.6	95.4	77.6	89.9
	18:00	74.9	71.2	73.6	69.9	69.4	73.8	71.1	68.3	68.2	69.9
	0:00	73.3	73.8	74.3	74	74.8	85.8	74.2	76.3	73.4	72.5
16/1/55	6:00	66.8	66.9	67.9	66.6	64.6	64.4	64	64.1	65.1	65.3
	12:00										
	18:00										
	0:00										

ประวัติผู้ดำเนินโครงงาน

ชื่อ : นายหิรัญ ปัญญาอ้าย

ภูมิลำเนา : 74 หมู่ 5 ต. แม่ใจ อ. แม่ใจ จ. พะเยา 56130

วัน/เดือน/ปีเกิด : 4 พฤศจิกายน 2532

ประวัติการศึกษา : จบระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนพะเยาพิทยาคม
ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
Mine20989_@hotmail.com

ชื่อ : นายประสพสันต์ เปลี่ยนศรี

ภูมิลำเนา : 240 หมู่ที่ 17 ต. ป่าหุ่ง อ. พาน จ. เชียงราย 57120

วัน/เดือน/ปีเกิด : 16 กันยายน 2532

ประวัติการศึกษา : จบระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนพานพิทยาคม
ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
prasobsun@hotmail.com