



ผลของการกระจายอุณหภูมิในข้าวเปลือกที่มีต่อสมรรถนะการระบายความร้อนในข้าวเปลือก
โดยใช้เทอร์โมไซฟอน

Effect of Temperature Distribution of Paddy Rice on Paddy Bulk Cooling

Performance with Using Thermosyphon

นายมนัส ดั่งท้วม

นายวันจักร เรืองสกุล

นายธนาพันธุ์ เพชรสัมฤทธิ์

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่รับ...../...../.....

เลขทะเบียน.....5200065.....

เลขเรียกหนังสือ.....

มหาวิทยาลัยนเรศวร

15090817

ปว.

ข164ค

2550

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2550



ใบรับรองโครงการงาน

หัวข้อโครงการงาน : ผลของการกระจายอุณหภูมิในข้าวเปลือกที่มีต่อสมรรถนะการระบายความร้อนในข้าวเปลือกโดยใช้เทอร์โมไซฟอน
(Effect of Temperature Distribution of Paddy Rice on Paddy Bulk Cooling Performance with Using Thermosyphon)

ผู้ดำเนินโครงการงาน : นายมนัส ค้างท้วม รหัส 47360839
นายวันจักร เรืองสกุล รหัส 47363031
นายชนานันต์ เพชรสัมฤทธิ์ รหัส 47360755

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงาน : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณค์

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา : 2550

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการการสอบโครงการงาน

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณค์)

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

.....
(อาจารย์ สุรัตน์ ปิณฑุญญแก้ว)

หัวข้อโครงการ	:	ผลของการกระจายอุณหภูมิในข้าวเปลือกที่มีต่อสมรรถนะการระบายความร้อนในข้าวเปลือกโดยใช้เทอร์โมไซฟอน
ผู้ดำเนินโครงการ	:	นายมนัส ค้างคาวม รหัส 47360839 นายวันจักร เรืองสกุล รหัส 47363031 นายชนานันต์ เพชรสัมฤทธิ์ รหัส 47360755
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ	:	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณค์
ภาควิชา	:	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	:	2550

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะจำลองโปรแกรมลักษณะการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกขนาด 1000 kg ที่บรรจุอยู่ในถังทรงปริมาตรสี่เหลี่ยมสูง 1 m และมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 1.357×1.357 m ที่มีเทอร์โมไซฟอนสำหรับระบายความร้อนให้กับข้าวเปลือก โดยเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ ทำจากท่อทองแดงมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.5 in มีความยาวส่วนทำระเหยเท่ากับ 1 m มีความยาวส่วนควบแน่นเท่ากับ 2 m และมี R134a เป็นสารทำงาน โดยการหาการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกจากการถ่ายเทความร้อนใน 2 มิติ ที่แต่ละหน้าตัดของถังเท่านั้น โดยสมมุติว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกไม่เปลี่ยนแปลงตามความสูงของถัง จากการศึกษาพบว่าเมื่อไม่มีการระบายความร้อนในข้าวเปลือกลักษณะการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกมีดังนี้ คือ ที่บริเวณกึ่งกลางของถังทุกๆหน้าตัดจะมีอุณหภูมิสูงที่สุด ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไป 1000 ชั่วโมง จะมีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 49 องศาเซลเซียส ส่วนที่บริเวณอื่นๆของถังจะมีอุณหภูมิต่ำลงเรื่อยๆ เมื่อเข้าใกล้ผนังของถังมากขึ้น และจะมีอุณหภูมิต่ำที่สุดที่บริเวณมุมล่างของทุกๆหน้าตัด ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไป 1000 ชั่วโมง จะมีอุณหภูมิอยู่ที่ ประมาณ 37 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าเมื่อไม่มีการระบายความร้อน ข้าวเปลือกจะมีอุณหภูมิสูงถึง 37-49 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเก็บข้าวเปลือก คือ 28-29 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องมีการระบายความร้อนให้แก่ข้าวเปลือกเพื่อการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้น ข้าวเปลือกที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 29 องศาเซลเซียส จะสามารถเก็บได้นานที่สุดเท่ากับ 722.4 ชั่วโมง โดยที่เปอร์เซ็นต์ความงอกลดลงน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ การระบายความร้อนในข้าวเปลือกโดยใช้เทอร์โมไซฟอนในระบบนี้ ที่มีความเหมาะสมที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อใช้จำนวนท่อเทอร์โมไซฟอนเท่ากับ 121 ท่อ โดยแต่ละท่อมีระยะห่างเท่ากับ 0.1357 m ซึ่งจะสามารถรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียส ได้ภายในเวลา 478 ชั่วโมง

A

Project Title : Effect of Temperature Distribution of Paddy Rice on
Paddy Bulk Cooling Performance with Using Thermosyphon

Name : Mr. Manat Dountoum Code 47360839
Mr. Wanjak Ruangsakul Code 47363031
Mr. Thananan Phetsamrit Code 47360755

Project Adviser : Asst. Prof. Dr. Piyanun Charoensawan

Department : Mechanical Engineering

Academic Year : 2007

Abstract

This Project aims to simulate the temperature distribution characteristic of 1000 kg paddy rice by using MATLAB program. The paddy rice is contained in the square prism bucket with 1 m high and cross sectional area of $1.357 \times 1.357 \text{ m}^2$. This paddy bulk is cooled by an array of Thermosyphons. These thermosyphons are made of copper tubes with 0.5 in nominal diameter, 1 m evaporator length and 2 m condenser length and the used working fluid is R134a. The temperature distribution inside paddy bulk is considered as two-dimensional heat transfer at each cross section of the bucket and the temperature of paddy rice is supposed to be uniform along the bucket height. First of all, the temperature distribution of paddy rice without cooling is investigated and it is found that the temperature at middle of cross sectional area of bucket is highest and reaches 49°C after 1000 hrs. For the other area of any section, when the paddy rice is closer to the bucket wall, its temperature is continuously lower. The lowest temperature occurs at corner of bucket and the value is 37°C after 1000 hrs. It is seen that when the paddy bulk is without cooled, the paddy rice temperature exists the high range of $37\text{-}49^\circ\text{C}$ whereas the proper temperature of paddy rice storage is about $28\text{-}29^\circ\text{C}$. Therefore, paddy bulk cooling is really needed to be able to store the paddy rice in a long time. For the paddy rice temperature higher than 29°C , the longest period of paddy rice storage with growing up lower than 10% is 722.4 hrs. This project applies this condition to design the paddy bulk storage cooling by thermosyphons. The optimum design of thermal performance of paddy bulk storage system is

obtain. The number of used thermosyphons are 121. For thermosyphons arrangement, a grid size or a distance between the adjacent thermosyphons is 0.1357 m. The time period at which the temperature of whole paddy rice can be lower than 29°C is only 478 hrs which is distinctly shorter than the value defined above.



กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีเพราะได้รับความช่วยเหลือในด้านการให้คำแนะนำ ในการทำโครงการจาก ดร.ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการให้คำปรึกษาแก่ กลุ่มของข้าพเจ้าตลอดมา กลุ่มของข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่ช่วยเหลืองานด้านการทำโครงการและด้านเอกสารให้เสร็จสิ้น โดยเรียบร้อย

สุดท้ายนี้กลุ่มของข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยสนับสนุน และคอยเป็น กำลังใจมาโดยตลอด



คณะผู้ดำเนินโครงการ

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงงาน	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญรูปภาพ	ฌ
ลำดับสัญลักษณ์	ฎ
 บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตการศึกษา	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 วิธีการดำเนินการ	4
1.6 ระยะเวลาและแผนการดำเนินงาน	6
1.7 สถานที่ปฏิบัติงาน	6
1.8 อุปกรณ์ที่ใช้	6
1.9 งบประมาณที่ใช้	6
 บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	
2.1 การเก็บรักษาข้าวเปลือก	7
2.2 เทอร์โมไฮฟอน	8
2.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการพาแบบอิสระหรือแบบธรรมชาติ	14
2.4 การนำความร้อนใน 2 มิติ	18
2.5 การทบทวนผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน	
3.1 การสำรวจและรวบรวมข้อมูล	25
3.2 แบบจำลองการทำงานของระบบการระบายความร้อนในข้าวเปลือก ที่ใช้ชุดเทอร์โมไซฟอน	25
3.3 สมมุติฐาน	26
3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือก ในถังเก็บ	27
3.5 ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	
4.1 การวิเคราะห์หาระยะกритของหน้าตัดของชั้นข้าวเปลือกที่เหมาะสม ต่อการนำมาคำนวณในระบบระบายความร้อน	44
4.2 การวิเคราะห์หาจำนวนท่อและลักษณะการวางท่อเทอร์โมไซฟอนใน ถังข้าวเปลือก	50
บทที่ 5 บทสรุป	
5.1 บทสรุป	64
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
บรรณานุกรม	66
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ตัวอย่างโปรแกรมจำลอง	68
ภาคผนวก ข. ตารางคุณสมบัติ	88
ภาคผนวก ค. อื่นๆ	91
ประวัติผู้ทำโครงการ	96

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงระยะเวลาและแผนการดำเนินการ	6
ตารางที่ ข.1 แสดงคุณสมบัติของอากาศ	89
ตารางที่ ข.2 แสดงคุณสมบัติของ R134 a	90
ตารางที่ ก.1 แสดงระยะเวลาที่ปลอดภัยในการเก็บรักษาข้าวเปลือก ที่ความชื้น และอุณหภูมิต่างๆ	92
ตารางที่ ก.2 ผลของความชื้นข้าวเปลือกต่อคุณภาพการสีข้าว	93
ตารางที่ ก.3 แสดงปริมาณการทำลายชั้นบรรยากาศของสารทำงานต่างๆ	94
ตารางที่ ก.4 แสดงขนาดของท่อทองแดง	95



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงการเก็บรักษาข้าวเปลือกโดยวิธีต่างๆ	2
รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของเทอร์โมไซฟอน	9
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างและหลักการทำงานของเทอร์โมไซฟอน	9
รูปที่ 2.3 แสดงวงจรความต้านทานความร้อนรวม	14
รูปที่ 2.4 แสดงขอบเขตของความร้อนและชั้นของของไหลบนแผ่นราบในแนวดิ่ง	15
รูปที่ 2.5 แสดงการพาความร้อนตามธรรมชาติบนทรงกระบอกแนวดิ่ง	17
รูปที่ 2.6 แสดงการนำความร้อนจากโนดข้างเคียงไปสู่โนดด้านใน	18
รูปที่ 2.7 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดภายใน	20
รูปที่ 2.8 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดมุมด้านในและมีการพาความร้อน	20
รูปที่ 2.9 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดบนพื้นผิวราบและมีการพาความร้อน	20
รูปที่ 2.10 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดมุมด้านนอกและมีการพาความร้อน	21
รูปที่ 2.11 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดบนพื้นผิวราบและมีฟลักซ์ความร้อนคงที่	21
รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะของถังเก็บข้าวเปลือกที่ติดตั้งชุดเทอร์โมไซฟอน	23
รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของถังเก็บข้าวเปลือกที่ติดตั้งชุดเทอร์โมไซฟอน	26
รูปที่ 3.2 แสดงหน้าตัดของถังใส่ข้าวเปลือกและการแยกคิดเป็นรูปสมมาตร	27
รูปที่ 3.3 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดภายใน	29
รูปที่ 3.4 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดด้านข้างและมีการพาความร้อน	29
รูปที่ 3.5 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดด้านบน	30
รูปที่ 3.6 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดด้านใน	30
รูปที่ 3.7 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดมุมด้านนอกและมีการพาความร้อน	31
รูปที่ 3.8 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดมุมด้านใน	31
รูปที่ 3.9 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดมุมด้านล่างที่มีการพาความร้อน	32
รูปที่ 3.10 แสดงปริมาตรควบคุมการระบายความร้อนของเทอร์โมไซฟอน	35
รูปที่ 3.11 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดต่างๆ ที่มีการใส่เทอร์โมไซฟอน	36
รูปที่ 4.1 แสดงโนดในตำแหน่งที่นำมาวิเคราะห์	43
รูปที่ 4.2 แสดงขนาดกริดต่างๆ ที่นำมาวิเคราะห์	44
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนดตำแหน่ง A	45
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนดตำแหน่ง B	45

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนคตำแหน่ง C	46
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนคตำแหน่ง D	47
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนคตำแหน่ง E	48
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนคตำแหน่ง F	49
รูปที่ 4.9 แสดงกริดขนาด 0.1696 m	50
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ที่ระยะกริดเท่ากับ 0.1696 m ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของแต่ละโนค โดยที่ไม่มีการใส่เทอร์โมไซฟอน	51
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ที่ระยะกริดเท่ากับ 0.1696 m ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของแต่ละโนค โดยที่มีการใส่เทอร์โมไซฟอนทุกโนค	51
รูปที่ 4.12 แสดงกริดขนาด 0.1357 m	53
รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ที่ระยะกริดเท่ากับ 0.1357 m ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนค 1-11 โดยที่ไม่มีการใส่เทอร์โมไซฟอน	53
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ที่ระยะกริดเท่ากับ 0.1357 m ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนค 12-21 โดยที่ไม่มีการใส่เทอร์โมไซฟอน	54
รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ที่ระยะกริดเท่ากับ 0.1357 m ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนค 1-11 โดยที่มีการใส่เทอร์โมไซฟอนทุกโนค	55
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ที่ระยะกริดเท่ากับ 0.1357 m ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนค 12-21 โดยที่มีการใส่เทอร์โมไซฟอนทุกโนค	55
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ที่ระยะกริดเท่ากับ 0.1357 m ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนค 1-11 โดยที่ไม่มีการใส่เทอร์โมไซฟอนที่โนค 21	57
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ที่ระยะกริดเท่ากับ 0.1357 m ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนค 12-21 โดยที่ไม่มีการใส่เทอร์โมไซฟอนที่โนค 21	57
รูปที่ 4.19 แสดงกริดขนาด 0.11308 m	59
รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ที่ระยะกริดเท่ากับ 0.11308 m ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนค 1-14 โดยที่ไม่มีการใส่เทอร์โมไซฟอน	59

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ที่ระยะกริดเท่ากับ 0.11308 m ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของ ข้าวเปลือกของ โนค 15-18 โดยที่ไม่มีการใส่เทอร์โมไซฟอน	60
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ที่ระยะกริดเท่ากับ 0.11308 m ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของ ข้าวเปลือกของ โนค 1-14 โดยที่มีการใส่เทอร์โมไซฟอนทุก โนค	61
รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ที่ระยะกริดเท่ากับ 0.11308 m ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของ ข้าวเปลือกของ โนค 15-28 โดยที่มีการใส่เทอร์โมไซฟอนทุก โนค	61
รูปที่ 5.1 แสดงพื้นที่หน้าตัดของถังเก็บข้าวเปลือกที่ระยะกริดเท่ากับ 0.1357 m และลักษณะ การกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกในกรณีที่ไม่มีการใส่เทอร์โมไซฟอนที่เวลา 1000 ชั่วโมง	64
รูปที่ 5.2 แสดงลักษณะการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกในกรณีที่มีการใส่เทอร์โมไซฟอนทุก โนคที่ระยะกริดเท่ากับ 0.1357 m ที่เวลา 478 ชั่วโมง	65

ลำดับสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
F	อัตราการเติมสาร	-
V_i	ปริมาณของของเหลวในเทอร์โมไซฟอนขณะยังไม่ได้ทำงาน	m^3
Δt	ค่าความแตกต่างของช่วงเวลาที่เก็บข้าว	ชั่วโมง
Q_{paddy}	ค่าความร้อนของข้าวเปลือก	kW
Q_{ts}	ค่าความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนที่ระบายออก	kW
$\dot{E}_{in}$	พลังงานเข้าสู่สถานะควบคุ่ม	-
$\dot{E}_{st}$	พลังงานที่ข้าวเก็บไว้	-
$\dot{E}_g$	พลังงานที่ข้าวผลิตขึ้น	-
$\dot{E}_{out}$	พลังงานออกจากสถานะควบคุ่ม	-
A	พื้นที่หน้าตัดภายในของเทอร์โมไซฟอน	m^2
A_x	พื้นที่หน้าตัดของผนังท่อ	m^2
C_p	ค่าความจุความร้อนของข้าวเปลือก	$kJ/kg.K$
D_i	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเทอร์โมไซฟอน	m
DML	ฟังก์ชันของเวลา	-
D_o	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อเทอร์โมไซฟอน	m
F	อัตราการเติมสารทำงาน	-
h_{∞}	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาที่พื้นที่ผิวของส่วนควบแน่น $W/m^2.K$	
h_{∞}	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาที่พื้นที่ผิวของส่วนทำระเหย $W/m^2.K$	
l_a	เป็นความยาวในส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน	m
l_c	เป็นความยาวในส่วนควบแน่น	m
l_e	เป็นความยาวในส่วนทำระเหย	m
M_w	ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก	-
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อนจริง	W
S_{∞}	พื้นที่ผิวของส่วนควบแน่น	m^2
S_{∞}	พื้นที่ผิวของส่วนทำระเหย	m^2
t	ช่วงเวลาในการเก็บข้าวเปลือก	ชั่วโมง
t_b	อุณหภูมิในข้าวเปลือก	องศาเซลเซียส

ลำดับสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$T_{b,new}$	อุณหภูมิข้าวเปลือกในชั่วโมงที่ทำการคำนวณ	องศาเซลเซียส
$T_{b,o}$	อุณหภูมิข้าวเปลือกในชั่วโมงที่ผ่านมา	องศาเซลเซียส
T_{si}	อุณหภูมิแหล่งระบายความร้อน	องศาเซลเซียส
T_{so}	อุณหภูมิแหล่งกำเนิดความร้อน	องศาเซลเซียส
V_t	ปริมาตรของของเหลวในเทอร์โมไซฟอนที่ขณะยังไม่ได้ทำงาน	m^3
Z	ความต้านทานความร้อนรวม	K/W
Z_1	ความต้านทานความร้อนระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อนและผิวข้างนอกของส่วนทำระเหย	K/W
Z_{10}	ความต้านทานความร้อนในแนวแกนตามผนังของท่อ	K/W
Z_2	ความต้านทานความร้อนโดยการนำผ่านความหนาของผนังท่อเทอร์โมไซฟอนในส่วนของส่วนทำระเหย	K/W
Z_3	ความต้านทานความร้อนภายในของของไหลที่กำลังเดือด	K/W
Z_{3f}	ความต้านทานความร้อนฟิล์มของเหลว	K/W
Z_{3p}	ความต้านทานความร้อนในแอ่งเดือด	K/W
Z_4	ความต้านทานความร้อนระหว่างหน้าสัมผัสไอกับผิวของของเหลวในส่วนของส่วนทำระเหย	K/W
Z_5	ค่าความต้านทานความร้อนของ Pressure drop ระหว่างทางจากส่วนทำระเหยไปส่วนควบแน่น	K/W
Z_6	ความต้านทานความร้อนระหว่างหน้าสัมผัสไอกับผิวของของเหลวในส่วนของส่วนควบแน่น	K/W
Z_7	ความต้านทานความร้อนภายในของของไหลที่กำลังควบแน่น	K/W
Z_8	ความต้านทานความร้อนโดยการนำผ่านความหนาของผนังท่อเทอร์โมไซฟอนในส่วนควบแน่น	K/W
Z_9	ความต้านทานความร้อนระหว่างผิวของส่วนควบแน่นกับแหล่งระบายความร้อน	K/W
ρ_l	ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะของเหลว	kg/m^3
ρ_v	ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะก๊าซ	kg/m^3

ลำดับสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
λ_f	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารทำงาน	W/m.K
h_{fg}	ค่าความร้อนแฝงของสารทำงาน	J/kg
c_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารทำงาน	J/kg.K
μ_f	สัมประสิทธิ์ความหนืดของสารทำงาน	m ² /s
P_v	ความดันไอของสารทำงาน	Pa
P_a	ความดันของบรรยากาศ	Pa
ΔT	ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อน กับแหล่งระบายความร้อน	องศาเซลเซียส

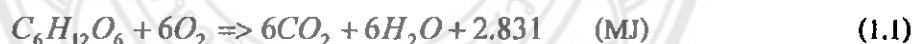
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ประเทศไทยมีสังคมและเศรษฐกิจอยู่บนพื้นฐานของภาคเกษตรกรรมเป็นหลัก และผลผลิตของประเทศไทยนั้นมีมากมายหลายอย่าง และผลผลิตที่สำคัญและมีมากที่สุดภายในประเทศนั้นก็ คือ ข้าว ซึ่งเป็นอาหารหลักของคนไทย และยังมีการส่งออกสู่สากลเป็นอันดับต้นๆของโลก ดังนั้นในปัจจุบันการผลิตข้าวของประเทศไทย จึงได้มีการใช้เครื่องจักรกลการเกษตรเข้ามาแทนที่การใช้กำลังคนเหมือนในอดีตที่ผ่านมา ข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวและนวดโดยใช้เครื่องจักรจะสามารถเก็บเกี่ยวได้ในเวลาสั้นๆ และได้ในปริมาณมาก ข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวด้วยเครื่องนวดจะมีปริมาณความชื้นสูงอยู่ที่ระหว่าง 20-24% ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการลดความชื้นให้แก่ข้าวเปลือก มิเช่นนั้นแล้วจะเกิดการเสื่อมสภาพจากยีสต์และเชื้อรา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงฤดูฝนที่จะมีความชื้นมาก ซึ่งจะทำให้การลดความชื้นในข้าวเปลือกได้ยาก โดยทั่วไปแล้วการเก็บรักษาข้าวเปลือกจะเก็บที่ความชื้น 12-14%

ปริมาณความชื้นในข้าวเปลือกนั้นมีผลมาจากปริมาณความร้อนในข้าวเปลือก ซึ่งเกิดจากการหายใจของข้าวเปลือกและสามารถแสดงได้โดยสมการทางปฏิกิริยาเคมีได้, [1] คือ



ซึ่งจากปฏิกิริยาเคมีข้างต้นจะเห็นได้ว่ามีความร้อนออกมาจำนวนหนึ่งหลังจากมีการทำปฏิกิริยาเคมีของกลูโคสและออกซิเจน ซึ่งจะพบว่าความร้อนจำนวนนี้เป็นตัวกำหนดปริมาณไอน้ำในข้าวเปลือกหรือที่เรียกว่า ความชื้น นั่นเอง ดังนั้นเพื่อเป็นการลดความชื้นในข้าวเปลือกในสถานการณ์เก็บข้าวเปลือกจึงต้องมีการระบายความร้อนจำนวนนี้ออกจากข้าวเปลือกนั่นเอง วิธีการเก็บรักษาข้าวเปลือกนั้นโดยทั่วไปทำได้หลายวิธี คือ การเก็บในสภาพปกติ โดยที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ หมายถึง การเก็บข้าวเปลือกไว้ในโรงเก็บปกติที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเก็บ เป็นวิธีที่นิยมใช้อยู่เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากการลงทุนและเสียค่าใช้จ่ายต่ำ แต่โอกาสที่จะเกิดความเสียหายในระหว่างการเก็บรักษาสูง การเก็บในสภาพที่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ได้แก่ การเก็บข้าวเปลือกไว้ในภาชนะเก็บที่มิดชิด สามารถป้องกันการเคลื่อนที่เข้าออกของอากาศได้ เช่น การเก็บเมล็ดพันธุ์ไว้ในถังสังกะสี เป็นต้น การเก็บข้าวเปลือกไว้ในสภาพปิดเช่นนี้ ความชื้นของข้าวเปลือกจะเป็นตัวกำหนดความชื้น

สัมพัทธ์ของอากาศภายในภาชนะที่เก็บ ถ้าความชื้นของข้าวเปลือกต่ำ ความชื้นสัมพัทธ์ภายในภาชนะบรรจุก็จะต่ำ ข้าวเปลือกที่เก็บจะเกิดการเสียหายน้อย แต่ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ของข้าวเปลือกสูง ข้าวเปลือกที่เก็บก็จะเกิดความเสียหายสูงได้เช่นกัน การเก็บในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว เช่น การเก็บข้าวเปลือกไว้ในตู้แช่หรือตู้เย็น ในไซโลเก็บข้าวที่มีการเป่าลมเย็น หรือการเก็บข้าวเปลือกที่มีเทอร์โมไซฟอนระบายความร้อน ส่วนการเก็บในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ วิธีนี้เป็นวิธีที่ดีที่สุด สามารถป้องกันและลดความเสียหายของข้าวเปลือกได้ดีสามารถเก็บรักษาข้าวเปลือกให้คงคุณภาพได้เป็นเวลานาน แต่มีการลงทุนและเสียค่าใช้จ่ายในการดูแลสูง เช่น การเก็บอนุรักษ์เชื้อพันธุ์ข้าวในธนาคารเชื้อพันธุ์



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

รูปที่ 1.1 แสดงการเก็บรักษาข้าวเปลือกโดยวิธีต่างๆ, [8]

- 1.1 (ก) การเก็บข้าวเปลือกโดยที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ
- 1.1 (ข) การเก็บข้าวเปลือกในสภาพที่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ
- 1.1 (ค) การเก็บข้าวเปลือกในสภาพที่มีการอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว
- 1.1 (ง) การเก็บข้าวเปลือกในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

วิธีการเก็บรักษาข้าวเปลือกในยุ้งฉางในสภาพปกติและเก็บในภาชนะปิดมิดชิดเพื่อควบคุมความชื้นเป็นวิธีที่ลงทุนต่ำก็จริง แต่มีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนเพื่อลดความชื้นไม่ดีมากนัก ส่วนการเก็บข้าวเปลือกในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดแต่ก็ต้องมีการลงทุนสูงที่สุดด้วยเหมือนกัน ส่วนการเก็บข้าวเปลือกในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเก็บรักษาข้าวเปลือกโดยทั่วไป เพราะมีประสิทธิภาพที่ดีและมีการลงทุนที่ไม่สูงมากนักเมื่อมีการเก็บรักษาข้าวเปลือกในปริมาณมากๆ สำหรับการเก็บรักษาข้าวเปลือกในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว มีวิธีการระบายความร้อนที่นิยมใช้กันมาก คือ วิธีใช้พัดลมเป่า วิธีนี้สามารถใช้ลดความชื้นได้ แต่ต้องการการลงทุนที่สูงและยังต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนของการไฟฟ้าในแต่ละเดือนอีกด้วย ดังนั้นจึงมีการนำท่อเทอร์โมไซฟอนที่มีสารทำงานไหลเวียนอยู่ภายใน ความร้อนในข้าวเปลือกจะถูกถ่ายเทให้กับสารทำงาน และสารทำงานที่มีอุณหภูมิสูงจะระเหยและเคลื่อนที่ไปด้านบนของท่อที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศ และกลั่นตัวเป็นหยดน้ำไหลตามผนังท่อลงสู่ด้านล่างของท่อเทอร์โมไซฟอน วิธีนี้อาจต้องลงทุนสูงในขั้นแรก แต่ไม่มีค่าใช้จ่ายระหว่างการดำเนินการ และยังมีความสามารถในการระบายความร้อนในข้าวเปลือกได้อย่างทั่วถึง จึงได้มีการศึกษาวิจัยเปรียบเทียบผลเชิงสมรรถนะและเชิงเศรษฐศาสตร์ระหว่างการระบายความร้อนแบบใช้ลมเป่า กับการระบายความร้อนโดยใช้เทอร์โมไซฟอนของโครงการการวิเคราะห์สมรรถนะและผลเชิงเศรษฐศาสตร์ของการระบายความร้อนในข้าวเปลือกโดยใช้เทอร์โมไซฟอน ซึ่งผลปรากฏว่า การระบายความร้อนในข้าวเปลือกโดยใช้เทอร์โมไซฟอน สามารถรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกได้ใกล้เคียงกับแบบใช้ลมเป่า และมีระยะเวลาคืนทุนที่สูงกว่า และอัตราผลตอบแทนภายในต่ำกว่าแบบใช้ลมเป่า, [1]

โดยทั่วไปแล้ว ในการวิเคราะห์หรือคำนวณระบบระบายความร้อนโดยเทอร์โมไซฟอนจะตั้งสมมติฐานว่าการกระจายอุณหภูมิในข้าวเปลือกนั้นคงที่ ดังนั้นในการจัดเรียงท่อนั้นจึงมีการจัดเรียงโดยมิได้คำนึงถึงการกระจายอุณหภูมิในข้าวเปลือกแต่อย่าง ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว การกระจายอุณหภูมิในข้าวเปลือกนั้นไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากบริเวณของพื้นผิวของข้าวเปลือกที่อยู่ใกล้กับผนังของถังเก็บจะมีการพาความร้อนโดยธรรมชาติเกิดขึ้น

ดังนั้นกลุ่มผู้จัดทำจึงเห็นว่า ควรจะทำการศึกษาถึงลักษณะการกระจายอุณหภูมิในข้าวเปลือก เพื่อเพิ่มความถูกต้องและแม่นยำในการวิเคราะห์ระบบการระบายความร้อนในข้าวเปลือกโดยใช้เทอร์โมไซฟอนให้มากขึ้น โดยใช้วิธีการจัดเรียงท่อให้มีความเหมาะสมกับลักษณะการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้มากขึ้น โดยจะวิเคราะห์จากโปรแกรมจำลองที่สร้างขึ้นมา เพื่อหาการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกและการระบายความร้อนออกจากข้าวเปลือกโดยใช้เทอร์โมไซฟอน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 สร้างโปรแกรมจำลองการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือก ในถังเก็บข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อนโดยเทอร์โมไซฟอน

1.2.2 ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อนโดยเทอร์โมไซฟอน คือ ขนาดของกริด (Grid size) จำนวนท่อเทอร์โมไซฟอน และการจัดเรียงของท่อเทอร์โมไซฟอน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ระบายความร้อนข้าวเปลือกขนาด 1000 กิโลกรัม

1.3.2 มีการระบายความร้อนของข้าวเปลือกในส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอน โดยใช้การพาความร้อนแบบธรรมชาติของอากาศ

1.3.3 ถังเก็บข้าวเปลือกเป็นถังทรงปริมาตรสี่เหลี่ยม มีความสูง 1 m และมีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1.357×1.357 m

1.3.4 ใช้โปรแกรม MATLAB ในการสร้างโปรแกรมจำลอง

1.3.5 เทอร์โมไซฟอนสร้างมาจากท่อทองแดงเนื่องจากทองแดงเกิดสนิมและผุกร่อนได้ยากจึงมีโอกาสน้อยมากที่จะเกิดการรั่วของสารทำงาน อีกทั้งทองแดงยังไม่เป็นสารแผ่รังสีจึงไม่ก่อให้เกิดสารปนเปื้อนในข้าวเปลือก ซึ่งท่อทองแดงที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.5 in โดยที่มีขนาดความยาวส่วนทำระเหยเท่ากับ 1 m และมีขนาดความยาวส่วนควบแน่นเท่ากับ 2 m และใช้ R134a เป็นสารทำงาน เนื่องจากมีช่วงอุณหภูมิการทำงานที่เหมาะสมกับระบบที่ต้องการศึกษา และไม่เป็นสารที่ทำลายชั้นบรรยากาศ [1]

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้โปรแกรมทำนายการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บ ที่มีการระบายความร้อนโดยเทอร์โมไซฟอน

1.4.2 ได้ระบบการระบายความร้อนในข้าวเปลือกโดยเทอร์โมไซฟอนที่เหมาะสมที่สุดในเชิงสมรรถนะทางความร้อน นั่นคือ ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสม่ำเสมอและคงที่ที่ประมาณ 28-29 องศาเซลเซียส

1.5 วิธีการดำเนินงาน

1.5.1 ศึกษาและรวบรวมทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบการระบายความร้อนในข้าวเปลือกที่ใช้ชุดเทอร์โมไซฟอนแบบท่อเดี่ยว

1.5.2 ออกแบบแบบจำลองการทำงานของระบบระบายความร้อนในข้าวเปลือกที่ใช้ชุดเทอร์โมไซฟอน

1.5.3 รวบรวมข้อมูลแต่ละส่วนเพื่อใช้ในการสร้างโปรแกรม

1.5.3.1 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับข้าวเปลือก อาทิเช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ค่าความหนาแน่น เป็นต้น

1.5.3.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาวส่วนทำระเหย และความยาวส่วนควบแน่น ของเทอร์โมไซฟอนที่นำมาใช้ในการคำนวณ

1.5.3.3 ขนาดของถังที่ใช้ในการเก็บข้าวเปลือก

1.5.4 ออกแบบสมการที่จำเป็นต่อการคำนวณของโปรแกรม เช่น สมการพลังงานความร้อนในข้าวเปลือก สมการการถ่ายเทความร้อนในเทอร์โมไซฟอน สมการสมดุลพลังงาน เป็นต้น

1.5.5 ออกแบบการเรียงตัวของท่อเทอร์โมไซฟอนในถังเก็บข้าวเปลือก

1.5.6 เขียนแผนผังลำดับโปรแกรม โดยการเขียนภาพแสดงขั้นตอนของการทำงานตามลำดับก่อนหลังเพื่อความสะดวกในการทำความเข้าใจ

1.5.7 เขียนโปรแกรม

เริ่มจากการเขียนสมการต่างๆ ที่ออกแบบไว้แล้ว ลงในโปรแกรม MATLAB ตามลำดับ ในแผนผังการทำงาน

1.5.8 การทดสอบโปรแกรม

ตรวจสอบความถูกต้องและความสมบูรณ์ของคำสั่งต่างๆ หรือโปรแกรมที่เขียนเพื่อหาข้อผิดพลาดที่จะทำให้ไม่สามารถทำงานได้และทำการแก้ไขให้ถูกต้อง ทำการตรวจสอบโปรแกรมมีลำดับขั้นตอนการทำงานดังนี้ คือ

- ตรวจสอบความถูกต้องทางไวยากรณ์ เพราะการเขียนคำสั่งผิดไปจากไวยากรณ์ของภาษาแต่ละภาษา ย่อมก่อให้เกิดความผิดพลาดทางไวยากรณ์

- ตรวจสอบโปรแกรมกับข้อมูล หลังจากตรวจสอบความถูกต้องทางไวยากรณ์แล้ว ทำโดยส่งโปรแกรมและข้อมูลให้เครื่องคอมพิวเตอร์ประมวลผล

1.5.9 ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อนโดยเทอร์โมไซฟอน

1.5.10 จัดทำรูปเล่มรายงาน

1.6 ระยะเวลาและแผนการดำเนินงาน

ตาราง 1.1 ระยะเวลาและแผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	2550									2551	
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	พ.ค.	เม.ย.
1.ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีพื้นฐาน											
2.เขียนโปรแกรมจำลองระบบ											
3.ทดสอบและปรับปรุงแก้ไขโปรแกรม											
4.ศึกษาผลกระทบของตัวแปร											
5.วิเคราะห์ผลการกระจายอุณหภูมิในข้าวเปลือก											
6.สรุป											
7.จัดทำรูปเล่มรายงาน											

1.7 สถานที่ปฏิบัติงาน

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

1.8 อุปกรณ์ที่ใช้

1.8.1 คอมพิวเตอร์

1.8.2 โปรแกรม MATLAB

1.9 งบประมาณที่ใช้

1.9.1 ค่ากระดาษพิมพ์	200 บาท
1.9.2 ค่าถ่ายเอกสาร	100 บาท
1.9.3 ค่าหมึกพิมพ์	300 บาท
1.9.4 ค่าหนังสือประกอบการทำโครงการ	1000 บาท
1.9.5 ค่าจัดทำรูปเล่มรายงาน	900 บาท
1.9.6 ค่าปกจัดทำโครงการ	500 บาท

รวม 3000 บาท

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 การเก็บรักษาข้าวเปลือก

เป้าหมายหลักของการเก็บรักษาข้าวเปลือก คือ ต้องมีการสูญเสียของข้าวเปลือกในขณะที่เก็บรักษาน้อยที่สุดทั้งด้านปริมาณและคุณภาพ หลักการเก็บรักษาโดยทั่วไป คือ ควรเก็บรักษาข้าวไว้ในสภาพหรือโรงเก็บที่มีความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศต่ำ (ในที่แห้งและที่เย็น)

2.1.1 วิธีการเก็บรักษาข้าวเปลือก

การเก็บรักษาข้าวเปลือกโดยทั่วไป แบ่งออกได้เป็น 4 วิธี ได้แก่

1. การเก็บรักษาในสภาพปกติ ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ หมายถึง การเก็บข้าวเปลือกไว้ในโรงเก็บปกติที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเก็บ เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอยู่ส่วนใหญ่ เพราะมีการลงทุนน้อยและเสียค่าใช้จ่ายต่ำ แต่โอกาสที่จะเกิดความเสียหายในระหว่างการเก็บรักษามีสูง เช่น การเก็บรักษาในโรงเก็บหรือยุ้งฉางของเกษตรกร โรงสีหรือโกดังส่งออกข้าวเปลือกขนาดใหญ่

2. การเก็บในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว เช่น การเก็บข้าวเปลือกไว้ในตู้แช่ ตู้เย็น หรือในไซโลที่มีการเป่าลมเย็น เป็นต้น

3. การเก็บในสภาพที่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ได้แก่ การเก็บข้าวเปลือกไว้ในภาชนะที่มิดชิด สามารถป้องกันการเคลื่อนที่เข้าออกของอากาศได้ เช่น การเก็บเมล็ดพันธุ์ไว้ในถังสังกะสี เป็นต้น การเก็บข้าวเปลือกในสภาพปิดเช่นนี้ ความชื้นของข้าวเปลือกจะเป็นตัวกำหนดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในภาชนะที่เก็บ ถ้าค่าความชื้นของข้าวเปลือกต่ำ ความชื้นสัมพัทธ์ภายในภาชนะบรรจุก็จะต่ำ ข้าวเปลือกที่เก็บจะเกิดความเสียหายน้อย ถ้าค่าความชื้นสัมพัทธ์ของข้าวเปลือกสูง ความชื้นสัมพัทธ์ภายในภาชนะบรรจุก็จะสูง ข้าวที่เก็บจะเกิดความเสียหายสูง ดังนั้น การเก็บรักษาข้าวเปลือกด้วยวิธีนี้ ข้าวเปลือกควรมีความชื้นก่อนเก็บต่ำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ต้องการเก็บรักษา อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วจะเก็บที่ความชื้นเท่ากับ 12-14% วิธีนี้เป็นวิธีที่ได้ผลดีและมีค่าใช้จ่ายต่ำ

4. การเก็บในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ วิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด สามารถป้องกันและลดความเสียหายของข้าวเปลือกได้ดี เก็บรักษาให้คงคุณภาพเป็นเวลานาน แต่มีการลงทุนและเสียค่าใช้จ่ายในการดูแลสูง เช่น การเก็บอนุรักษเชื้อพันธุ์ข้าวในธนาคารเชื้อพันธุ์

จากวิธีการเก็บรักษาข้าวเปลือกทั้ง 4 วิธีข้างต้น พบว่าการเก็บรักษาข้าวเปลือกในถังเก็บที่มีเทอร์โมไซฟอน จะจัดอยู่ในวิธีที่ 2 คือ การเก็บในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว โดยจะรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกไว้ที่ประมาณ 28-29 องศาเซลเซียส

2.1.2 วิธีปฏิบัติในการเก็บรักษาข้าวเปลือก

สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงในการเก็บรักษาข้าวเปลือก คือ การรักษาปริมาณและคุณภาพข้าวเปลือกที่เก็บให้คงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเก็บรักษาข้าวเปลือก ได้แก่

1. ความชื้นของข้าวเปลือกที่เก็บ โดยทั่วไปความชื้นของข้าวเปลือกไม่ควรสูงเกิน 14% ถ้าเป็นเมล็ดพันธุ์ ความชื้นไม่ควรเกิน 10%

2. ความสะอาด ข้าวเปลือกที่จะเก็บต้องสะอาด ไม่มีสิ่งเจือปน เช่น เศษฟาง คอซัง วัชพืช กรวด หิน ดิน ทราย เพราะสิ่งเหล่านี้ลดความชื้นได้ดี ทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นมากขึ้นในขณะที่เก็บรักษา

3. การปลอดจากโรค แมลง ศัตรูต่างๆ ข้าวเปลือกที่จะนำเข้ามาเก็บต้องปลอดจากโรค แมลง และศัตรูต่างๆ หากพบควรหาวิธีป้องกัน กำจัดที่ถูกต้องและเหมาะสม

4. การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเก็บให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม

5. ลักษณะและสถานที่ตั้งของโรงเก็บ โรงเก็บที่ดีควรตั้งอยู่บนที่ดอนและแห้ง มีการระบายน้ำที่ดีเพื่อป้องกันน้ำท่วม รอบๆบริเวณโรงเก็บต้องสะอาด โปร่ง ไม่มีต้นไม้ใหญ่ปกคลุม สภาพโรงเก็บต้องมีผนังปิดมิดชิด แฉ่นหนา มีหลังคา กันแดด กันฝน กันน้ำค้าง ครอบยกพื้นสูงเพื่อให้มีการถ่ายเทอากาศด้านล่าง ตามช่องเปิดต่างๆควรมีตาข่ายป้องกัน นก หนู และสัตว์ศัตรูต่างๆ

6. การจัดการในขณะที่เก็บรักษา ควรมีการตรวจสอบข้าวเปลือกที่เก็บและโรงเก็บเป็นระยะๆ

2.2 เทอร์โมไซฟอน

2.2.1 ลักษณะของเทอร์โมไซฟอน

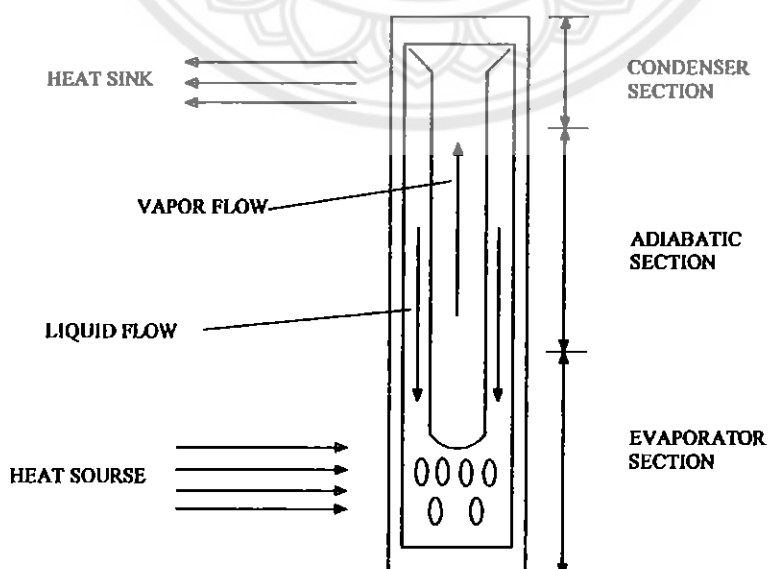
เทอร์โมไซฟอนเป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายความร้อนชนิดหนึ่งที่มีความสามารถในการส่งถ่ายความร้อนได้สูงมาก ประมาณ 100 เท่า เมื่อเทียบกับค่าการนำความร้อนของท่อทองแดงที่มีมิติเท่ากัน (Dunn P.D. and Reay D.A., 1981) ท่อที่ใช้ทำจากท่อปลายปิดทั้งสองด้าน ภายในเป็นสุญญากาศบรรจุด้วยสารทำงาน (Working fluid) ใ้จำนวนหนึ่ง ซึ่งแสดงดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของเทอร์โมไซฟอน

2.2.2 โครงสร้างของเทอร์โมไซฟอน

เทอร์โมไซฟอนมีส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ ส่วนทำระเหย (Evaporator) ซึ่งเป็นส่วนที่รับความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อน ส่วนควบแน่น (Condenser) เป็นส่วนที่ระบายความร้อนออกจากสารทำงานไปสู่บรรยากาศ ส่วนกั้นความร้อน (Adiabatic) เป็นส่วนที่อุณหภูมิคงที่ ภายในท่อจะบรรจุสารทำงานปริมาณหนึ่งไว้ โดยสารทำงานจะเคลื่อนที่จากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นเพื่อระบายความร้อนออกที่ส่วนนี้ ชนิดของสารทำงานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่จะนำเทอร์โมไซฟอนไปใช้งาน ซึ่งโครงสร้างของเทอร์โมไซฟอนแสดงดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างและหลักการทำงานของเทอร์โมไซฟอน, [1]

2.2.3 หลักการทำงานของเทอร์โมไซฟอน

การทำงานของเทอร์โมไซฟอนจะอาศัยหลักการของการเปลี่ยนสถานะของสารทำงาน เมื่อสารทำงานรับความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนจะทำให้สารทำงานเกิดการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอทำให้เคลื่อนที่ขึ้นไปตามท่อจนถึงส่วนควบแน่นและทำให้เกิดการระบายความร้อนระหว่างสารทำงานกับบรรยากาศภายนอกจนทำให้สารทำงานเกิดการเปลี่ยนสถานะกลับเป็นของเหลวอย่างเดิม และไหลกลับลงสู่ส่วนทำระเหยโดยแรงโน้มถ่วงของโลกเพื่อกลับไปรับความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนอีกครั้งหนึ่งซึ่งถือว่าเป็นการทำงานแบบวัฏจักร

2.2.4 ข้อดีของเทอร์โมไซฟอน

1. ง่ายต่อการสร้าง
2. สามารถนำความร้อนสูง
3. สามารถถ่ายเทความร้อนได้เมื่อแหล่งรับและระบายความร้อนอยู่ห่างกัน
4. สามารถใช้เป็นอุปกรณ์ระบายความร้อนในบริเวณที่มีพื้นที่เล็กและแคบได้
5. ไม่ต้องการแหล่งกำเนิดงานจากภายนอกสำหรับใช้ในการทำงาน

2.2.5 อัตราการเติมสารทำงาน

ควรหลีกเลี่ยงการเติมสารทำงานที่มากเกินไป เพราะสารทำงานจะไปลดพื้นที่ในส่วนควบแน่น และทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง แต่ถ้าเติมสารทำงานไม่เพียงพอ จะเกิดการแห้ง (Dry out) ขึ้นที่ผิวนอกของส่วนทำระเหย อัตราการเติมสารทำงานแทนด้วยสัญลักษณ์ F เป็นสัดส่วนกับปริมาตรของๆเหลวในเทอร์โมไซฟอนที่ขณะยังไม่ได้ทำงาน (V_f) กับปริมาตรในส่วนทำระเหย คือ

$$F = V_f / A l_e \quad (2.1)$$

โดยที่ V_f คือ ปริมาตรของของเหลวในเทอร์โมไซฟอนขณะยังไม่ได้ทำงาน, m^3

A คือ พื้นที่หน้าตัดภายในของเทอร์โมไซฟอนมีค่าเท่ากับ $\pi D_i^2 / 4$, m^2

l_e คือ ความยาวในส่วนทำระเหย, m

D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเทอร์โมไซฟอน, m

สำหรับเทอร์โมไซฟอนที่วางตัวอยู่ในแนวตั้ง โดยปกติจะเติมของเหลวมากกว่าครึ่งหนึ่งของส่วนทำระเหยเพื่อให้ความหนาฟิล์มมากกว่า 0.3 mm ตลอดความยาวท่อ ซึ่งจะอยู่ในช่วง 40% ถึง 60% ของส่วนทำระเหยและ

$$V_l \geq 0.001D_o(l_e + l_a + l_c) \quad (2.2)$$

เมื่อ D_o เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อเทอร์โมไซฟอน, m

l_e เป็นความยาวในส่วนทำระเหย, m

l_a เป็นความยาวในส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน, m

l_c เป็นความยาวในส่วนควบแน่น, m

2.2.6 การถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอน

ความสัมพันธ์ของค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจริง (Q_{Ts}) ค่าความต้านทานความร้อนรวม (Z) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อนกับแหล่งระบายความร้อน ($\Delta T = T_{so} - T_{si}$) คือ

$$Q_{Ts} = \Delta T / Z \quad (2.3)$$

โดยที่ T_{so} คือ อุณหภูมิแหล่งกำเนิดความร้อน, องศาเซลเซียส

T_{si} คือ อุณหภูมิแหล่งระบายความร้อน, องศาเซลเซียส

ค่าความต้านทานความร้อนรวมประกอบด้วยค่าความต้านทานต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3

Z_1 คือ ค่าความต้านทานความร้อนโดยการพาระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อนและผิวด้านนอกของส่วนทำระเหย

Z_9 คือ ค่าความต้านทานความร้อนโดยการพาระหว่างผิวของส่วนควบแน่นกับแหล่งระบายความร้อน

ค่า Z_1 และ Z_9 หาได้จากสมการดังนี้

$$Z_1 = 1/(h_{eo}S_{eo}) \text{ and } Z_9 = 1/(h_{co}S_{co}) \quad (2.4)$$

โดยที่ h_{eo} คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาที่พื้นผิวของส่วนทำระเหย, W/m^2K

S_{eo} คือ พื้นที่ผิวของส่วนทำระเหย, m^2

h_{co} คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาที่พื้นผิวของส่วนควบแน่น, W/m^2K

S_{co} คือ พื้นที่ผิวของส่วนควบแน่น, m^2

Z_2 คือ ค่าความต้านทานความร้อนโดยการนำ ผ่านความหนาของผนังท่อเทอร์โมไซฟอน
ในส่วนทำระเหย

Z_8 คือ ค่าความต้านทานความร้อนโดยการนำ ผ่านความหนาของผนังท่อเทอร์โมไซฟอน
ในส่วนควบแน่น

ค่า Z_2 และ Z_8 หาได้จากสมการดังนี้

$$Z_2 = \ln(D_o / D_i) / 2\pi l_c \lambda_x \text{ และ } Z_8 = \ln(D_o / D_i) / 2\pi l_c \lambda_x \quad (2.5)$$

โดยที่ D_o คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเทอร์โมไซฟอน, m

D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเทอร์โมไซฟอน, m

λ_x คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน, W/m.K

Z_3 คือ ค่าความต้านทานความร้อนภายในของของไหลที่กำลังเดือดในเทอร์โมไซฟอน

Z_7 คือ ค่าความต้านทานความร้อนภายในของของไหลที่กำลังควบแน่นในเทอร์โมไซฟอน

ค่า Z_3 และ Z_7 จะขึ้นอยู่กับสมบัติของของไหล ขนาดของเทอร์โมไซฟอน และอัตราการ
ถ่ายเทความร้อน ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$Z_{3f} = (cQ^{\frac{1}{3}}) / (D^{\frac{4}{3}} g^{\frac{1}{3}} l_c \phi^{\frac{4}{3}}) \quad (2.6)$$

$$\text{โดยที่ } \phi_2 = (h_{fg} \lambda_l^3 \rho_l / \mu_l)^{\frac{4}{3}} \quad (2.7)$$

$$Z_{3p} = 1 / (\phi_3 g^{0.2} Q^{0.4} (\pi D l_c)^{0.6}) \quad (2.8)$$

$$\text{โดยที่ } \phi_3 = \frac{\rho_l^{0.65} \lambda_l^{0.3} c_p^{0.7}}{\rho_v^{0.25} h_{fg}^{0.4} \mu_l^{0.1}} \left[\frac{Pv}{Pa} \right]^{0.23} \times 0.32 \quad (2.9)$$

โดยที่ ρ_l คือ ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะของเหลว, kg/m³

ρ_v คือ ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะก๊าซ, kg/m³

λ_l คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารทำงาน, W/m.K

h_{fg} คือ ค่าความร้อนแฝงของสารทำงาน, J/kg

c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารทำงาน, J/kg.K

μ_i คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดของสารทำงาน, m^2/s

P_v คือ ความดันไอของสารทำงาน, Pa

P_a คือ ความดันของบรรยากาศ, Pa

ถ้า $Z_{3p} < Z_{3f}$ ให้ $Z_3 = Z_{3p}$

ถ้า $Z_{3p} > Z_{3f}$ คำนวณ Z_3 จากสมการ

$$Z_3 = Z_{3p}F + Z_{3f}(1 - F) \quad (2.10)$$

และ Z_7 สามารถหาได้ดังนี้

$$\text{Re}_f = (4Q)/(h_{fg}\mu_i\pi D_i) \quad (2.11)$$

ถ้า $50 < \text{Re}_f < 1300$ คำนวณ Z_7 จากสมการ

$$Z_7 = (cQ^{\frac{1}{3}})/(D_i^{\frac{4}{3}}g^{\frac{1}{3}}l_e\phi_2^{\frac{4}{3}}) \quad (2.12)$$

ถ้า $\text{Re}_f > 1300$ คำนวณ Z_7 จากสมการ

$$Z_7 = ((cQ^{\frac{1}{3}})/(D_i^{\frac{4}{3}}g^{\frac{1}{3}}l_e\phi_2^{\frac{4}{3}})) \times 191\text{Re}_f^{-0.733} \quad (2.13)$$

โดยที่ $c = 0.235$

Z_4 และ Z_6 เป็นความต้านทานความร้อนระหว่างหน้าสัมผัสไอกับผิวของของเหลวในส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่น ตามลำดับ ซึ่งน้อยมาก ดังนั้นสามารถไม่นำมาพิจารณาได้

Z_5 เป็นความต้านทานความร้อนของ Pressure drop ระหว่างทางจากส่วนทำระเหยไปส่วนควบแน่น แต่มีค่าน้อยมาก ดังนั้นสามารถไม่นำมาพิจารณาได้

Z_{10} เป็นความต้านทานความร้อนในแนวแกนตามผนังท่อ หาได้จาก

$$Z_{10} = (0.5l_e + l_a + 0.5l_c)/(A_x\lambda_x) \quad (2.14)$$

โดยที่ A_x เป็นพื้นที่หน้าตัดของผนังท่อ, m^2

สำหรับตำแหน่งการทำงานปกติ เมื่อส่วนทำระเหยอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่นการนำความร้อนผ่านผนังตามแนวแกนท่อนจะมีผลน้อยมากต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอน

เงื่อนไขของการออกแบบเมื่อไม่พิจารณาการนำความร้อนในแนวแกน คือ

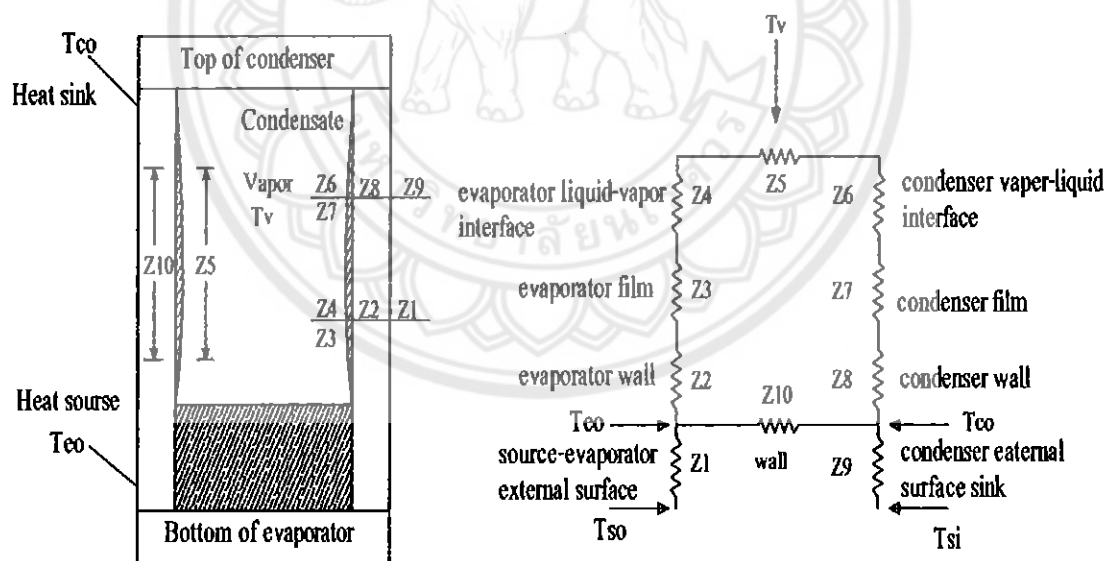
$$Z_{10} / (Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8) > 20 \quad (2.15)$$

ถ้าเป็นไปตามสมการ (2.15) ค่าความต้านทานความร้อนรวม คือ

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8 + Z_9 \quad (2.16)$$

ถ้าไม่เป็นไปตามสมการ (2.15) ค่าความต้านทานความร้อนรวม คือ

$$Z = Z_1 + [(Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8)^{-1} + (1/Z_{10})]^{-1} + Z_9 \quad (2.17)$$

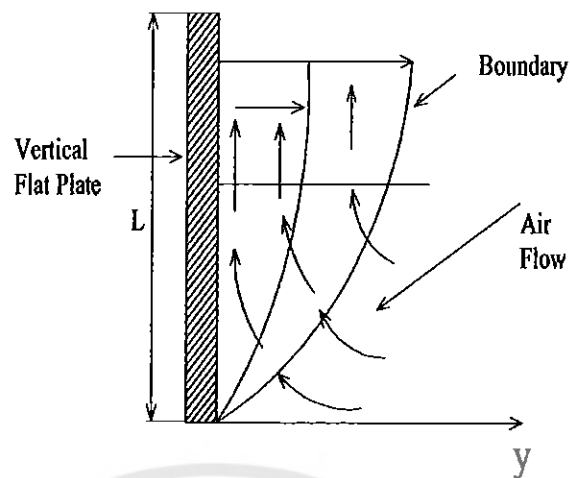


รูปที่ 2.3 แสดงวงจรความต้านทานความร้อนรวม, [1]

2.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนแบบอิสระหรือแบบธรรมชาติ

2.3.1 การถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติบนแผ่นราบในแนวตั้ง[]

พิจารณาแผ่นราบร้อนวางอยู่ในแนวตั้งซึ่งประกอบด้วยการเคลื่อนที่ของของไหลขึ้นผ่านไปยังแผ่นราบ โดยที่ความร้อนเคลื่อนที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูป (2.4)



รูปที่ 2.4 แสดงขอบเขตของความร้อนและชั้นของของไหลบนแผ่นราบในแนวดิ่ง, [7]

กลุ่มมิติไร้มิติชุดใหม่ที่มีความสำคัญในการถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติ นั่นก็คือ Grashof Number โดยมีค่าดังนี้

$$Gr_x \equiv \frac{g\beta(T_w - T_\infty)x^3}{\nu^2} \propto \frac{\text{buoyancy forces}}{\text{viscous forces}} \quad (2.18)$$

หรือคิดความยาวทั้งหมดของแผ่นราบ

$$Gr_x \equiv \frac{g\beta(T_w - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (2.19)$$

สำหรับแก๊สอุดมคติ $\beta = 1/T$ เมื่อ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ $(T_w - T_\infty)/2$ ในหน่วย R หรือ K

Grashof number สำหรับการพาโดยธรรมชาติ เหมือนค่าตัวเลข Reynold number ในการพาแบบบังคับ ส่วนค่า Nusselt number เป็นฟังก์ชันของ Grashof และ Prandtl number ในการพาโดยธรรมชาติ กลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ใช้สำหรับหาความสัมพันธ์ของการพาแบบธรรมชาติ เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงจากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน คือ Rayleigh number Ra คือ ผลคูณของ Grashof กับ Prandtl number ดังสมการ

$$Ra_x = Gr_x Pr \text{ or } Gr_L Pr \quad (2.20)$$

หมายเหตุ

ค่า Rayleigh และ Grashof number เกิดจาก characteristic length สำหรับแผ่นราบวางในแนวตั้ง การเปลี่ยนแปลงจากการไหลแบบราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วนเกิดขึ้นเมื่อ $Ra_x = 10^9$

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ

$$Nu_x = 0.68 + 0.503[Ra_x \Psi(Pr)]^{1/4} \quad (2.21)$$

และ

$$Nu_x = 0.68 + 0.67[Ra_x \Psi(Pr)]^{1/4} \quad (2.22)$$

โดยที่

$$\Psi(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9} \quad (2.23)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

$$\bar{Nu} = Nu_x = 0.15[Ra_L \Psi(Pr)]^{1/3} \quad (2.24)$$

คุณสมบัติต่างๆ ของของไหล หาได้จากอุณหภูมิเฉลี่ย $(T_w + T_\infty)/2$

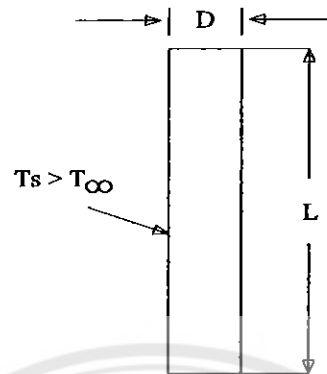
ดังนั้น หาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติ ($\bar{h}$) หาได้จากสมการ

$$\bar{h} = \bar{Nu} k / L \quad (2.25)$$

อัตราการสูญเสียความร้อน (Q_{loss}) จากแผ่นราบหาได้จากสมการ

$$Q_{loss} = \bar{h} A (T_w - T_\infty) \quad (2.26)$$

2.3.2 การพาความร้อนแบบธรรมชาติบนทรงกระบอกแนวดิ่ง[]



รูปที่ 2.5 แสดงการพาความร้อนตามธรรมชาติบนทรงกระบอกแนวดิ่ง, [6]

พิจารณาทรงกระบอกแนวดิ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D และสูง L ภายในของไหล ที่มี $Pr \geq 0.7$ เกบฮาร์ท (Gebhart) สเปร์โรว์และเกรก์ พบว่าถ้า

$$(D/L) < (35/(Gr_L)^{1/4}) \quad (2.27)$$

หากเป็นตามสมการ (2.25) แสดงว่าทรงกระบอกที่ใช้เป็นทรงกระบอกเรียวยาวหรือเส้น ลวดเซเบซี (Cebeci) มิน โควิกซ์ (Minkowyes) และสเปร์โรว์แนะนำให้พิจารณาสัมประสิทธิ์การพา ความร้อนเฉลี่ยจาก

$$Nu_{m,plate} = \left[0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/0.7)^{9/16}]^{8/27}} \right] \quad (2.28)$$

$$Ra_L = Gr_L \times Pr \quad (2.29)$$

$$\zeta = \frac{L/D}{Ra_L^{1/4}} \quad (2.30)$$

$$Nu_{m,Cylinder} = Nu_{m,Plate} (1 + 1.3\zeta^{0.9}) \quad (2.31)$$

สำหรับอากาศ $\zeta < 0.024$ ตัวเลขนัสเซลท์ที่คำนวณได้จากสมการ (2.29) นั้นให้คูณด้วย 0.94 จึงเป็นคำตอบ

ดังนั้น หาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติ (h_m) หาได้จากสมการ

$$h_m = Nu_m k / L \quad (2.32)$$

อัตราการสูญเสียความร้อน (Q_{loss}) จากท่อหาได้จากสมการ

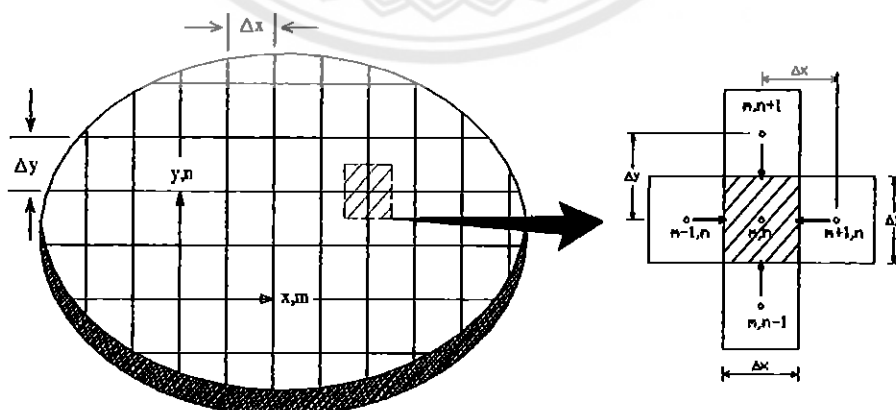
$$Q_{loss} = \pi D L h_m (T_s - T_\infty) \quad (2.33)$$

การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Free convection) บนทรงกระบอกแนวดิ่งสามารถหาค่าอัตราการสูญเสียความร้อน (Q_{loss}) ได้จากสมการข้างต้น

2.4 การนำความร้อนใน 2 มิติ

ในการหาสมการ Finite-Difference สำหรับโนดแต่ละโนดนั้น จะต้องใช้ในการประยุกต์จาก การอนุรักษ์พลังงานของปริมาตรควบคุมของโนดนั้นๆ สำหรับการนำความร้อนในสภาวะคงตัว และมีแหล่งกำเนิดความร้อน สามารถเริ่มต้นพิจารณาจากสมการการสมดุลพลังงานได้ดังนี้

$$\dot{E}_m + \dot{E}_g = 0 \quad (2.34)$$



รูปที่ 2.6 แสดงการนำความร้อนจากโนดข้างเคียงไปสู่โนดด้านใน, [5]

พิจารณาสมการ (2.32) และปริมาตรควบคุมของโนคภายใน m,n ดังรูป 2.6 สำหรับการนำความร้อนใน 2 มิติ จะมีความร้อนถ่ายเทจากโนคข้างเคียงให้แก่โนคภายใน และมีแหล่งกำเนิดความร้อนที่โนคภายใน จะได้สมการดังนี้

$$\sum_{i=1}^4 q_{(i) \rightarrow (m,n)} + \dot{q}(\Delta x, \Delta y, 1) = 0 \quad (2.35)$$

โดยที่ i แสดงถึงสัญลักษณ์ของโนคข้างเคียงทั้งสิ้น

จากกฎของฟูเรียร์จะได้รับการถ่ายเทความร้อนโดยการนำของโนคข้างเคียงทั้งสิ้นไปสู่โนคภายในได้ดังนี้

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y, 1) \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (2.36)$$

$$q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y, 1) \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (2.37)$$

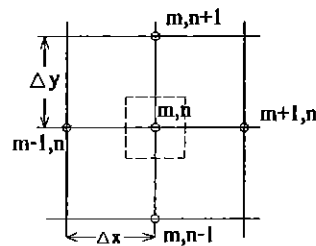
$$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta x, 1) \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y} \quad (2.38)$$

$$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta x, 1) \frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y} \quad (2.39)$$

นำสมการที่ (2.34)-(2.37) แทนในสมการการสมดุลพลังงาน โดยที่ $\Delta x = \Delta y$ ดังนั้นจะได้สมการ Finite-Difference ดังนี้

$$T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + T_{m+1,n} + T_{m-1,n} \frac{\dot{q}(\Delta x)^2}{k} - 4T_{m,n} = 0 \quad (2.40)$$

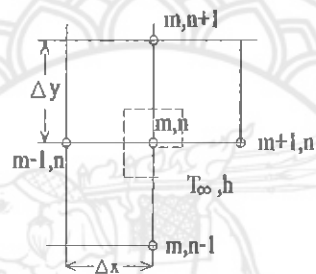
สมการ Finite-Difference ของโนคในรูปแบบต่างๆ โดยที่ไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อน สามารถสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 2.7 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดภายใน, [5]

จากรูปที่ 2.7 สามารถหาสมการ Finite-Difference ได้ดังนี้

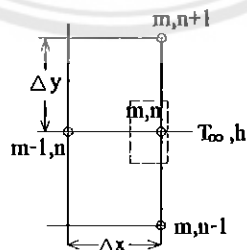
$$T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 4T_{m,n} = 0 \quad (2.41)$$



รูปที่ 2.8 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดมุมด้านในและมีการพาความร้อน, [5]

จากรูปที่ 2.8 สามารถหาสมการ Finite-Difference ได้ดังนี้

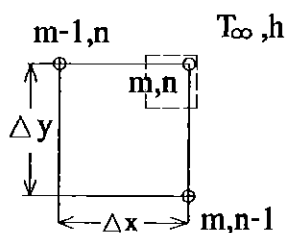
$$2(T_{m-1,n} + T_{m,n+1}) + (T_{m+1,n} + T_{m,n-1}) + 2\frac{h\Delta x}{k}T_{\infty} - 2(3 + \frac{h\Delta x}{k})T_{m,n} = 0 \quad (2.42)$$



รูปที่ 2.9 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดบนพื้นผิวราบและมีการพาความร้อน, [5]

จากรูปที่ 2.9 สามารถหาสมการ Finite-Difference ได้ดังนี้

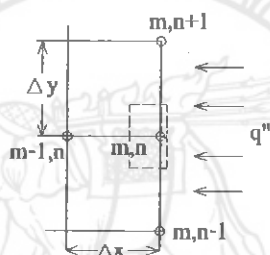
$$(2T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1}) + 2\frac{h\Delta x}{k}T_{\infty} - 2(\frac{h\Delta x}{k} + 2)T_{m,n} = 0 \quad (2.43)$$



รูปที่ 2.10 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดมุมด้านนอกและมีการพาความร้อน, [5]

จากรูปที่ 2.10 สามารถหาสมการ Finite-Difference ได้ดังนี้

$$(T_{m,n-1} + T_{m-1,n}) + 2\frac{h\Delta x}{k}T_{\infty} - 2\left(\frac{h\Delta x}{k} + 1\right)T_{m,n} = 0 \quad (2.44)$$



รูปที่ 2.11 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดบนพื้นผิวราบและมีฟลักซ์ความร้อนคงที่, [5]

จากรูปที่ 2.11 สามารถหาสมการ Finite-Difference ได้ดังนี้

$$(2T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1}) + \frac{2q''\Delta x}{k} - 4T_{m,n} = 0 \quad (2.45)$$

2.5 การทบทวนผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากผลงานวิจัยของ Mohammad Izadifar, Oon-Doo Baik, Carey J.Simonson (2006)

เรื่อง Modeling of packed bed drying of paddy rice using the local volume averaging (LVa)

ผลงานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือกที่บรรจุอยู่ในถัง โดยใช้อากาศแห้งเป่า ซึ่งจากการศึกษาดังกล่าวได้มีการจัดทำคุณสมบัติของข้าวเปลือก ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อโครงการนี้เป็นอย่างมาก ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของข้าวเปลือก, [3]

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^2 / s	Istadi and Sitompul(2002)

โดยที่ ρ_{paddy} = ความหนาแน่นของข้าวเปลือก
 $C_{p,paddy}$ = ความจุความร้อนจำเพาะของข้าวเปลือก
 k_{paddy} = ความนำความร้อนของข้าวเปลือก
 x = ค่าฟังก์ชันของอุณหภูมิข้าวเปลือกและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ
 T = อุณหภูมิของข้าวเปลือก
 RH = ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ
 H_v = ความร้อนแฝงของการกลายเปลี่ยนไอ
 D_{eff} = diffusivity
 M = ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก

จากผลงานวิจัยของ Dussadee et al.(2003)

เรื่อง การวิเคราะห์สมรรถนะ และเศรษฐศาสตร์ของถังเก็บข้าวเปลือกที่ใช้เทอร์โมไซฟอน
 การวิเคราะห์สมรรถนะ และเศรษฐศาสตร์ของถังเก็บข้าวเปลือกที่ใช้เทอร์โมไซฟอนที่ใช้
 R22 เป็นสารทำงานเพื่อระบายความร้อนออกจากถังข้าวเปลือก

โดยที่ถังเหล็กทรงกระบอกขนาด 1250 mm และมีความยาว 1500 mm ซึ่งบรรจุข้าวเปลือก
 ขนาด 1000 kg ในส่วนทำระเหยของเทอร์โมไซฟอนอยู่ในข้าวเปลือก ซึ่งทำมาจากชุดท่อทองแดง

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 in และมีพื้นที่ถ่ายเทความร้อน 8.5 m^2 และส่วนควบแน่นมีพื้นที่ 12.2 m^2 โดยใช้อากาศในบรรยากาศระบายความร้อน การวิเคราะห์สมรรถนะ และเศรษฐศาสตร์ของถังเก็บข้าวเปลือกที่ใช้เทอร์โมไซฟอน จะวิเคราะห์เปรียบเทียบกับถังที่มีการระบายความร้อนแบบใช้อากาศไหลผ่านข้าวเปลือก

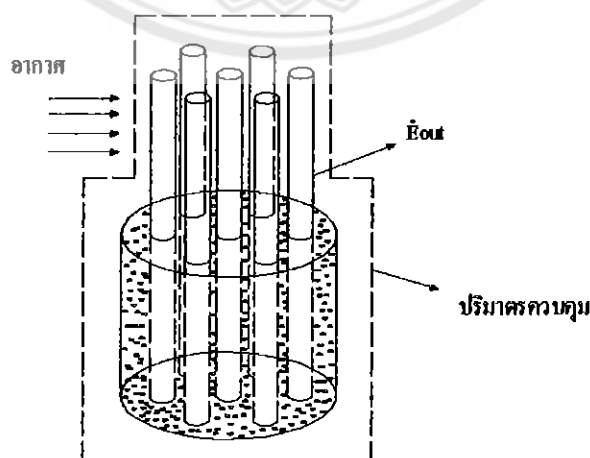
จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้เทอร์โมไซฟอนมีศักยภาพสูงในการควบคุมอุณหภูมิในข้าวเปลือกและสามารถรักษาอุณหภูมิเหลือเพียง 28-29 องศาเซลเซียส

เมื่อเทียบกับการ ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ ข้าวเปลือกจะมีอุณหภูมิ 31-32 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ยิ่งไปกว่านั้น เทอร์โมไซฟอนยังสามารถใช้ได้กับช่วงอุณหภูมิแตกต่างเพียงเล็กน้อยได้อีกด้วย ด้านคุณภาพของข้าวจะใกล้เคียงกันสำหรับการใช้เทอร์โมไซฟอนเมื่อเทียบกับการระบายความร้อนที่ใช้ลมเป่า แบบจำลองระบบนี้ยังสามารถทำนายว่าสำหรับข้าวเปลือก 1000 kg ส่วนทำระเหยควรมีพื้นที่อย่างน้อยที่สุด 16 m^2 และส่วนควบแน่นควรมีพื้นที่ 12.2 m^2 จากการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์พบว่าระยะคืนทุน คือ 8.2 ปี และอัตราผลตอบแทน คือ 8.6% เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้พัดลมขนาด 1/8 แรงม้าในการระบายความร้อนสัดส่วนเวลาทำงานของพัดลมคือ 20% ต่อปี

จากผลงานวิจัย ทวิช อุณหิต, ศิธา แสนชนะ, สาคร โพนนอก (2007)

เรื่อง การวิเคราะห์สมรรถนะและผลเชิงเศรษฐศาสตร์ของการระบายความร้อนในข้าวเปลือกโดยใช้เทอร์โมไซฟอน

ผลงานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ผลเชิงสมรรถนะและผลเชิงเศรษฐศาสตร์ ของการระบายความร้อนในข้าวเปลือกโดยใช้เทอร์โมไซฟอน ดังแสดงในรูปที่ (2.6)



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะของถังเก็บข้าวเปลือกที่ติดตั้งชุดเทอร์โมไซฟอน, [1]

โดยการใช้โปรแกรมจำลองระบบระบายความร้อนในข้าวเปลือกโดยใช้เทอร์โมไซฟอนที่สร้างขึ้น สามารถประมาณค่าสมรรถนะการทำงานของระบบและวิเคราะห์ผลเชิงเศรษฐศาสตร์ได้ คือ ระบบ การระบายความร้อนในข้าวเปลือกที่ใช้ชุดเทอร์โมไซฟอนแบบท่อเดี่ยวที่เหมาะสมที่สุด จะเกิดขึ้น เมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเทอร์โมไซฟอนเล็กสุดเท่ากับ 0.5 in ขนาดความยาวส่วนทำ ระบายสิ้นสุดเท่ากับ 1 m ขนาดความยาวส่วนควมแน่นยาวสุดเท่ากับ 2 m และจำนวนท่อเทอร์โมไซ ฟอนสูงสุดเท่ากับ 160 ท่อ จะสามารถรักษาอุณหภูมิในถังเก็บข้าวเปลือกให้อยู่ที่ 29.7 องศา เซลเซียส จากระบบระบายความร้อนในข้าวเปลือกที่ใช้ชุดเทอร์โมไซฟอนที่ศึกษานี้มีระยะเวลาการ คืนทุน 11.5 ปี และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เท่ากับ 3.508% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พัด ลมเป่าทำงาน 20% ของเวลาการทำงานของพัดลม



5200065

15090817

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

๒๕.

๒164๗

2550

3.1 การสำรวจและรวบรวมข้อมูล

การสำรวจและรวบรวมข้อมูล เป็นการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบที่ใช้เทอร์โมไซฟอนจากแหล่งข้อมูลต่างๆ เช่น บทความ วารสาร หนังสือ เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

3.1.1 ศึกษาการทำงานของเทอร์โมไซฟอนและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ประกอบไปด้วย

- ลักษณะการทำงานของเทอร์โมไซฟอน
- วัสดุที่ใช้ทำท่อเทอร์โมไซฟอน สารทำงาน และอัตราการเติมสารทำงาน
- ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านท่อเทอร์โมไซฟอน

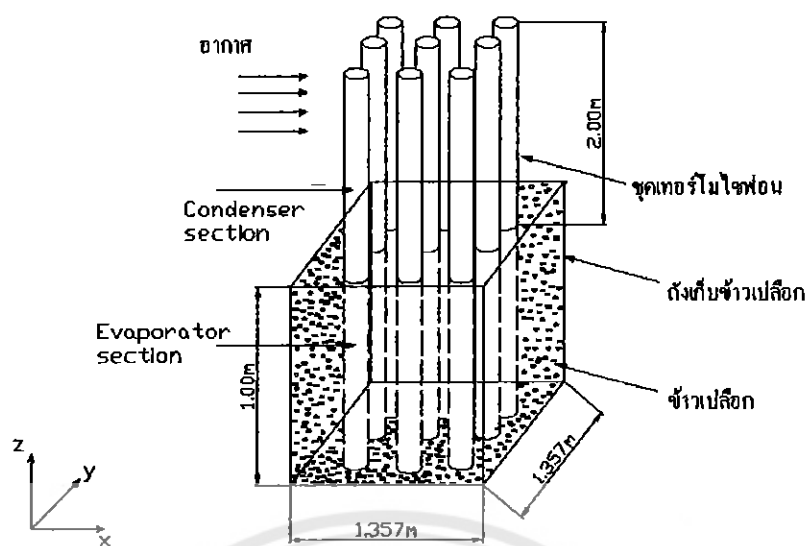
3.1.2 รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับข้าวเปลือก คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ค่าความหนาแน่น ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

3.1.3 รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับอากาศที่ใช้ในการระบายความร้อนให้แก่เทอร์โมไซฟอน คือ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

3.1.4 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับขนาดของถังที่เก็บข้าวเปลือกขนาด 1000 kg

3.2 แบบจำลองการทำงานของระบบการระบายความร้อนในข้าวเปลือกที่ใช้ชุดเทอร์โมไซฟอน

การทำงานของระบบระบายความร้อนที่ใช้ชุดเทอร์โมไซฟอนจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.1 คือ เมื่อมีการเก็บข้าวเปลือกไว้ในถังเก็บข้าวเปลือก ข้าวเปลือกในถังจะมีการหายใจทำให้เกิดความร้อน ความร้อนดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้สารทำงานในส่วนทำระเหยมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนเกิดการเดือดและระเหยกลายเป็นไอ และลอยขึ้นไปยังส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอนที่สัมผัสกับอากาศในบรรยากาศ และจะทำให้สารทำงานในส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอนเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศภายนอกโดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติจากผิวที่ส่วนควบแน่นไปยังอากาศ สารทำงานในท่อเทอร์โมไซฟอนก็จะเกิดการควบแน่นและไหลลงตามผนังของท่อเทอร์โมไซฟอนด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ลงสู่ส่วนทำระเหยเพื่อไปรับความร้อนจากข้าวเปลือกอีกครั้ง



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของถังเก็บข้าวเปลือกที่ติดตั้งชุดเทอร์โมไซฟอน

3.3 สมมุติฐาน

เนื่องจากการทำงานจริงของระบบที่ใช้เทอร์โมไซฟอนจะมีปัจจัยหลายอย่างที่เกี่ยวข้อ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความสะดวกและง่ายต่อการคำนวณ จึงกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ออกเป็นดังนี้

3.3.1 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศที่ระบายความร้อนให้กับเทอร์โมไซฟอนเป็นอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 27.9 องศาเซลเซียส และ 73% ตามลำดับ ซึ่งได้จากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 10 ปี ย้อนหลังของจังหวัดพิษณุโลก, [10]

3.3.2 มวลของข้าวเปลือกในถังที่ใช้เทอร์โมไซฟอนระบายความร้อน คือ 1000 kg และมีความชื้น 13.5% เนื่องจากที่ความชื้นดังกล่าวมีผลต่อคุณภาพการสีที่ดี [9]

3.3.3 ถังเก็บข้าวเปลือกเป็นถังทรงปริมาตร สูง 1 m มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1.357×1.357 m และมีความหนาของผนังบางมาก จึงไม่พิจารณาค่าการนำความร้อนผ่านผนัง

3.3.4 การกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกในแนวแกน Z คงที่

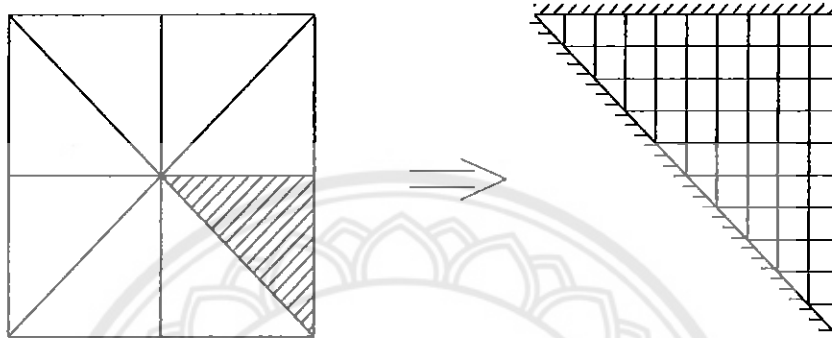
3.3.5 ส่วนทำระเหยของเทอร์โมไซฟอนอยู่ติดกับส่วนควบแน่นจึงไม่มีส่วนกันความร้อน

3.3.6 เทอร์โมไซฟอนสร้างจากท่อทองแดง วางในแนวตั้ง โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.5 in มีความยาวของส่วนทำระเหยเท่ากับ 1 m และมีความยาวของส่วนควบแน่นเท่ากับ 2 m สารทำงานที่ใช้เป็น R134a อัตราการเติมสารทำงานเป็น 50% ของส่วนทำระเหย เนื่องจากโดยปกติอัตราการเติมสารทำงานจะอยู่ในช่วง 40-60% ของส่วนทำระเหย, [1]

3.3.7 ความต้านทานความร้อนระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อนและผิวข้างนอกของส่วนทำระเหย (Z_1) มีค่าน้อยมาก เนื่องจากผิวข้างนอกของส่วนทำระเหยอยู่ติดกับแหล่งกำเนิดความร้อน จึงมีการสัมผัสอากาศน้อยมากทำให้ความต้านทานมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงสามารถไม่นำมาคิดได้

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บ

เนื่องถังเก็บข้าวเปลือกเป็นถังทรงปริมาตรหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสและพิจารณาว่าเป็นการถ่ายเทความร้อนใน 2 มิติ ดังนั้นจึงสามารถแยกคิดได้เป็นรูปสมมาตรเท่ากับหนึ่งในแปดส่วนของรูปสี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ (3.2)



รูปที่ 3.2 แสดงหน้าตัดของถังใส่ข้าวเปลือกและการแยกคิดเป็นรูปสมมาตร

จากรูปที่ 3.2 นำรูปสมมาตรที่ได้มาพิจารณาปริมาตรควบคุมในแต่ละเอลิเมนต์ได้ดังนี้

$$\dot{E}_g + \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \quad (3.1)$$

โดยที่ $\dot{E}_g$ คือ พลังงานที่ข้าวเปลือกผลิตขึ้น, W

$\dot{E}_{in}$ คือ พลังงานที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม, W

$\dot{E}_{out}$ คือ พลังงานที่ออกจากปริมาตรควบคุม, W

$\dot{E}_{st}$ คือ พลังงานที่ข้าวเปลือกเก็บไว้, W

พลังงานที่ข้าวผลิตขึ้น ($\dot{E}_g$) คือ ความร้อนของข้าวเปลือก (Q_{paddy}) ที่เกิดการหายใจของข้าวเปลือกดังจะแสดงได้ดังสมการปฏิกิริยาที่ 1.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อข้าวเปลือกมีการหายใจเกิดขึ้นจะมีความร้อนในข้าวเปลือกซึ่งเป็นความสัมพันธ์กับฟังก์ชันของเวลาสามารถแสดงดังสมการ

$$Term = A \left(\frac{t}{1000} \right)^C \exp[D(1.8T_b - 28)] \exp[E(M_w - 0.14)] \quad (3.2)$$

โดยที่ $A = 0.000914$, $D = 0.03756$, $C = 0.654$, $E = 33.61$

M_w คือ ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก, %

T_b คือ อุณหภูมิในข้าวเปลือก, องศาเซลเซียส

t คือ ช่วงเวลาในการเก็บข้าวเปลือก, ชั่วโมง

ความเสียหายเนื่องจากความร้อนในข้าวเปลือก จะหาได้จากสมการดังนี้

$$DML = 1 - \exp(-Term) \quad (3.3)$$

โดยที่ DML คือ ฟังก์ชันของเวลา

ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิในข้าวเปลือกสามารถหาได้จากสมการ

$$\Delta T = \frac{15778(DML)}{C_p} \quad (3.4)$$

โดยที่ C_p คือ ค่าความจุความร้อนของข้าวเปลือก, kJ/kg.K

ΔT คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิในข้าวเปลือก, องศาเซลเซียส

ความร้อนของข้าวเปลือก (Q_{Paddy}) มีความสัมพันธ์กับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิหาได้จาก

$$\dot{E}_g = Q_{Paddy} = (mC_p\Delta T)/t \quad (3.5)$$

โดยที่ Q_{Paddy} คือ ค่าความร้อนของข้าวเปลือก, kW

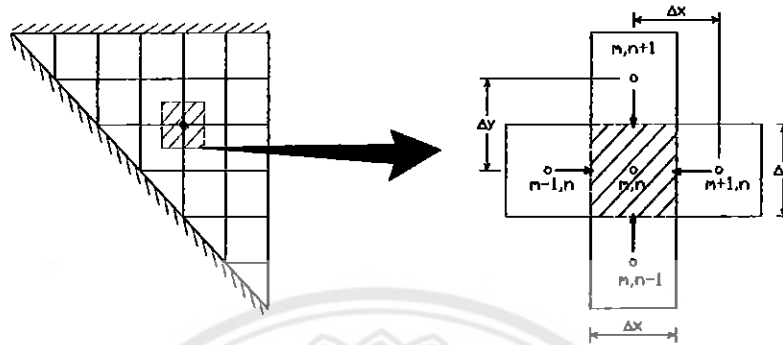
m คือ มวลของข้าวเปลือกในปริมาตรควบคุม, kg

t คือ เวลาในการเกิดความร้อน, วินาที

ในการพิจารณาเอลิเมนต์ของข้าวเปลือกแต่ละอันจะพบว่ามีเทอร์โมไซฟอนบรรจุในบางเอลิเมนต์เท่านั้นดังนั้นจึงสามารถแบ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ 2 แบบ คือ

- สำหรับเอลิเมนต์ที่ไม่มีเทอร์โมไซฟอน
- สำหรับเอลิเมนต์ที่มีเทอร์โมไซฟอน

สำหรับเอลิเมนต์ที่ไม่มีเทอร์โมไซฟอนสามารถใช้หลักการการสมดุลพลังงานของปริมาตรควบคุมที่พิจารณาเพื่อหาอุณหภูมิของข้าวเปลือกได้ดังนี้

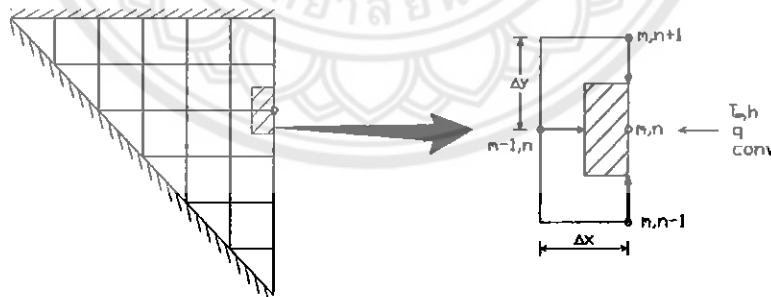


รูปที่ 3.3 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดภายใน

จากรูปที่ 3.3 สามารถหาอุณหภูมิของข้าวเปลือกได้ดังนี้

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} + q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} + Q_{paddy} = \rho v c \frac{dT}{dt} \quad (3.6)$$

$$T_{m,n}^{p+1} = F_o [T_{m-1,n}^p + T_{m+1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p - 4T_{m,n}^p + \frac{Q_{paddy}}{k}] + T_{m,n}^p \quad (3.7)$$

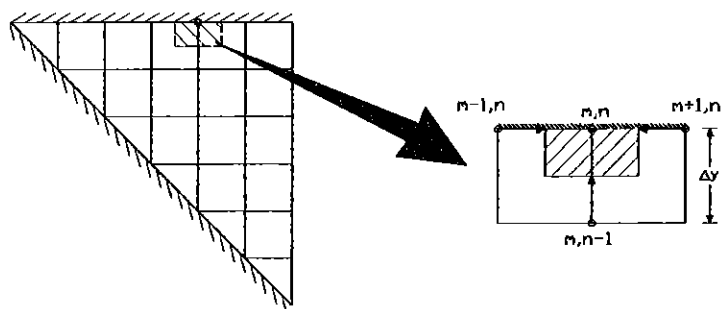


รูปที่ 3.4 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดด้านข้างและมีการพาความร้อน

จากรูปที่ 3.4 สามารถหาอุณหภูมิของข้าวเปลือกได้ดังนี้

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} + q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} + q_{convection} + Q_{paddy} = \rho v c \frac{dT}{dt} \quad (3.8)$$

$$T_{m,n}^{p+1} = F_o [2T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p - 4T_{m,n}^p + 2Bi(T_\infty - T_{m,n}^p) + \frac{2Q_{paddy}}{k}] + T_{m,n}^p \quad (3.9)$$

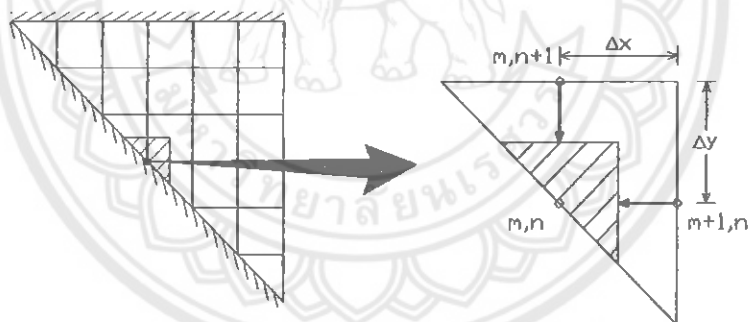


รูปที่ 3.5 แสดงปริมาตรควบคุมของโน้ตด้านบน

จากรูปที่ 3.5 สามารถหาอุณหภูมิของข้าวเปลือกได้ดังนี้

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} + Q_{paddy} = \rho v c \frac{dT}{dt} \quad (3.10)$$

$$T_{m,n}^{p+1} = F_o [T_{m-1,n}^p + T_{m+1,n}^p + 2T_{m,n-1}^p - 4T_{m,n}^p + \frac{2Q_{paddy}}{k}] + T_{m,n}^p \quad (3.11)$$

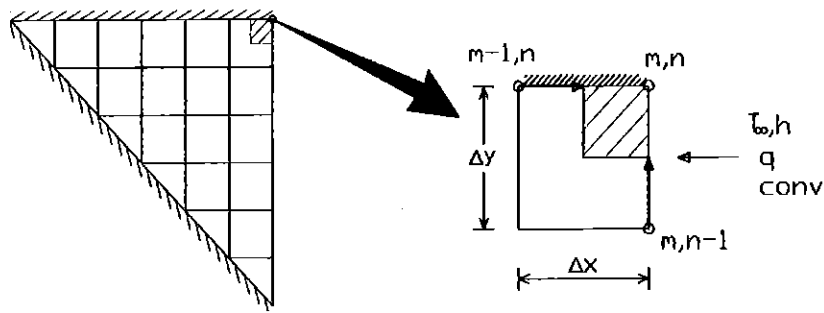


รูปที่ 3.6 แสดงปริมาตรควบคุมของโน้ตด้านใน

จากรูปที่ 3.6 สามารถหาอุณหภูมิของข้าวเปลือกได้ดังนี้

$$q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} + Q_{paddy} = \rho v c \frac{dT}{dt} \quad (3.12)$$

$$T_{m,n}^{p+1} = 2F_o [T_{m+1,n}^p + T_{m,n+1}^p - 2T_{m,n}^p + \frac{Q_{paddy}}{k}] + T_{m,n}^p \quad (3.13)$$

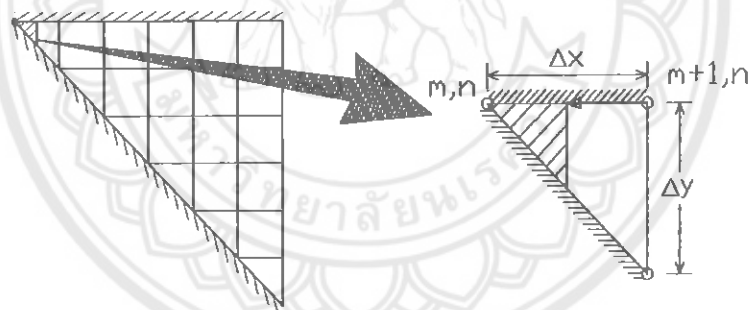


รูปที่ 3.7 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดมุมด้านนอกและมีการพาความร้อน

จากรูปที่ 3.7 สามารถหาอนุสมการของข้อเปลี่ยนได้ดังนี้

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} + q_{convection} + Q_{paddy} = \rho v c \frac{dT}{dt} \quad (3.14)$$

$$T_{m,n}^{p+1} = 2F_o [2T_{m-1,n}^p + T_{m,n-1}^p - 2T_{m,n}^p + Bi(T_\infty - T_{m,n}^p) + \frac{2Q_{paddy}}{k}] + T_{m,n}^p \quad (3.15)$$

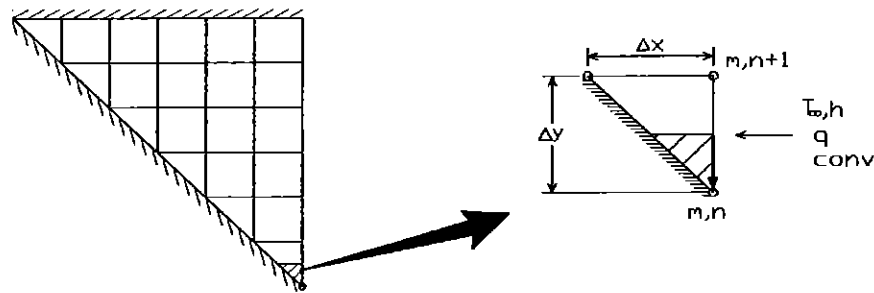


รูปที่ 3.8 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดมุมด้านใน

จากรูปที่ 3.8 สามารถหาอนุสมการของข้อเปลี่ยนได้ดังนี้

$$q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} + Q_{paddy} = \rho v c \frac{dT}{dt} \quad (3.16)$$

$$T_{m,n}^{p+1} = 4F_o [T_{m+1,n}^p + T_{m,n}^p + \frac{2Q_{paddy}}{k}] + T_{m,n}^p \quad (3.17)$$



รูปที่ 3.9 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดมุมด้านล่างที่มีการพาความร้อน

จากรูปที่ 3.9 สามารถหาอุณหภูมิของข้าวเปลือกได้ดังนี้

$$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} + q_{convection} + Q_{paddy} = \rho v c \frac{dT}{dt} \quad (3.18)$$

$$T_{m,n}^{p+1} = 4F_o [T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p + Bi(T_\infty - T_{m,n}^p) + \frac{2Q_{paddy}}{k}] + T_{m,n}^p \quad (3.19)$$

โดยที่ $F_o = \frac{k\Delta t}{\rho c \Delta x^2}$ (3.20)

$$Bi = \frac{h\Delta x}{k} \quad (3.21)$$

ค่าการพาความร้อน โดยธรรมชาติ ($q_{convection}$) สามารถหาได้จากการถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติบนแผ่นราบในแนวดิ่งซึ่งอยู่ในบทที่ 2 โดยแทนค่าตัวแปรต่างๆได้ดังนี้
คำนวณค่า Grashof Number (Gr) จากสมการที่ (2.19) ได้ดังนี้

$$Gr \equiv \frac{g\beta(T_b - T_a)\Delta y^3}{\nu^2} \quad (3.22)$$

โดยที่ $\beta = 1/T$ เมื่อ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ $(T_b - T_a)/2$

คำนวณค่า Rayleigh number (Ra) จากสมการที่ (2.20) ได้ดังนี้

$$Ra = Gr \ Pr \quad (3.23)$$

คำนวณค่า Nusselt number (Nu) จากสมการ (2.21) ในกรณีการไหลแบบราบเรียบ และสมการ 2.22 สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน ได้ดังนี้

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ

$$Nu = 0.68 + 0.67[Ra \Psi(Pr)]^{1/4} \quad (3.24)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

$$Nu = 0.15[Ra_L \Psi(Pr)]^{1/3} \quad (3.25)$$

โดยที่

$$\Psi(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9} \quad (3.26)$$

คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้จากสมการที่ (2.25) ได้ดังนี้

$$h = Nuk / \Delta y \quad (3.27)$$

คำนวณค่าการพาความร้อนโดยธรรมชาติได้จากสมการที่ (2.26) ได้ดังนี้

$$q_{convection} = hA(T_a - T_b) \quad (3.28)$$

โดยที่ $A = \Delta y \cdot 1$

T_b คือ อุณหภูมิของข้าวเปลือก, องศาเซลเซียส

T_a คือ อุณหภูมิของบรรยากาศ, องศาเซลเซียส

พิจารณาปริมาตรควบคุมของเทอร์โมไซฟอน แสดงดังรูป (3.10) และใช้หลักการสมดุลพลังงาน สามารถหาค่าความร้อนที่ระบายออกจากข้าวเปลือกสู่บรรยากาศผ่านท่อเทอร์โมไซฟอนได้จาก

$$\dot{E}_{out} = Q_{Ts} = \Delta T / Z_i \quad (3.29)$$

โดยที่

$$\Delta T = T_b - T_a$$

Q_{Ts} คือ ค่าความร้อนที่ระบายออกผ่านท่อเทอร์โมไซฟอน, W

Z_i คือ ความต้านทานความร้อนรวม, K/W

ค่าความต้านทานความร้อนรวม (Z_1) เป็นผลรวมของค่าความต้านทานความร้อนที่ส่วนต่างๆ ของเทอร์โมไซฟอนซึ่งแสดงไว้ในบทที่ 2 โดยแทนค่าตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้
คำนวณค่า Z_9 จากสมการที่ (2.4) ได้ดังนี้คือ

$$Z_9 = 1/(h_{co} S_{co}) \quad (3.30)$$

โดยที่ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่พื้นผิวของส่วนควบแน่นหาได้จากหัวข้อการพาความร้อนแบบธรรมชาติบนทรงกระบอกแนวตั้งในบทที่ 2
คำนวณค่า Z_2 และ Z_8 จากสมการที่ (2.5) ได้ดังนี้

$$Z_2 = \ln(D_o / D_i) / 2\pi l_e \lambda_x \text{ และ } Z_8 = \ln(D_o / D_i) / 2\pi l_e \lambda_x \quad (3.31)$$

หาค่า Z_3 โดยการคำนวณค่า Z_{3f} , ϕ_2 , Z_{3p} และ ϕ_3 จากสมการ (2.6), (2.7), (2.8) และ (2.9) ตามลำดับ แล้วพิจารณาตามเงื่อนไขดังนี้
ถ้า $Z_{3p} < Z_{3f}$ ให้ $Z_3 = Z_{3p}$
ถ้า $Z_{3p} > Z_{3f}$ คำนวณ Z_3 จากสมการที่ (2.10) ได้ดังนี้

$$Z_3 = Z_{3p} F + Z_{3f} (1 - F) \quad (3.32)$$

โดยที่ F คือ อัตราการเติมสารทำงาน

หาค่า Z_7 โดยการคำนวณค่า Re_f จากสมการ (2.11) แล้วพิจารณาตามเงื่อนไขดังนี้
ถ้า $50 < Re_f < 1300$ คำนวณ Z_7 จากสมการที่ (2.12) ได้ดังนี้

$$Z_7 = (cQ^{\frac{1}{3}}) / (D_i^{\frac{4}{3}} g^{\frac{1}{3}} l_e \phi_2^{\frac{4}{3}}) \quad (3.33)$$

ถ้า $Re_f > 1300$ คำนวณ Z_7 จากสมการที่ (2.13) ได้ดังนี้

$$Z_7 = ((cQ^{\frac{1}{3}}) / (D_i^{\frac{4}{3}} g^{\frac{1}{3}} l_e \phi_2^{\frac{4}{3}})) \times 191 Re_f^{-0.733} \quad (3.34)$$

โดยที่ $c = 0.235$

คำนวณค่า Z_{10} จากสมการ (2.14) โดยที่ไม่มีส่วนกันความร้อนได้ดังนี้

$$Z_{10} = (0.5l_e + 0.5l_c) / (A_x \lambda_x) \quad (3.35)$$

นำค่าความต้านทานความร้อนทุกค่ามาพิจารณาตามเงื่อนไขดังนี้
เงื่อนไขของการออกแบบเมื่อไม่พิจารณาการนำความร้อนในแนวแกน คือ

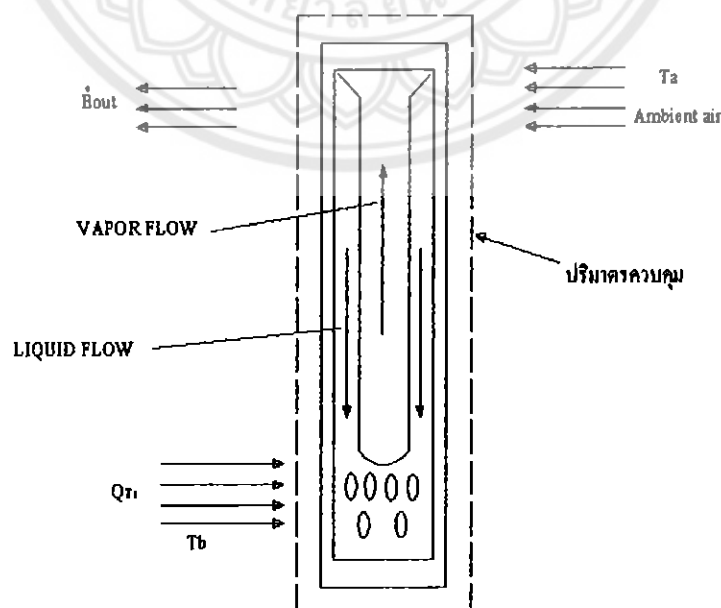
$$Z_{10} / (Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8) > 20 \quad (3.36)$$

ถ้าเป็นไปตามสมการ (3.29) ค่าความต้านทานความร้อนรวม คือ

$$Z_t = Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8 + Z_9 \quad (3.37)$$

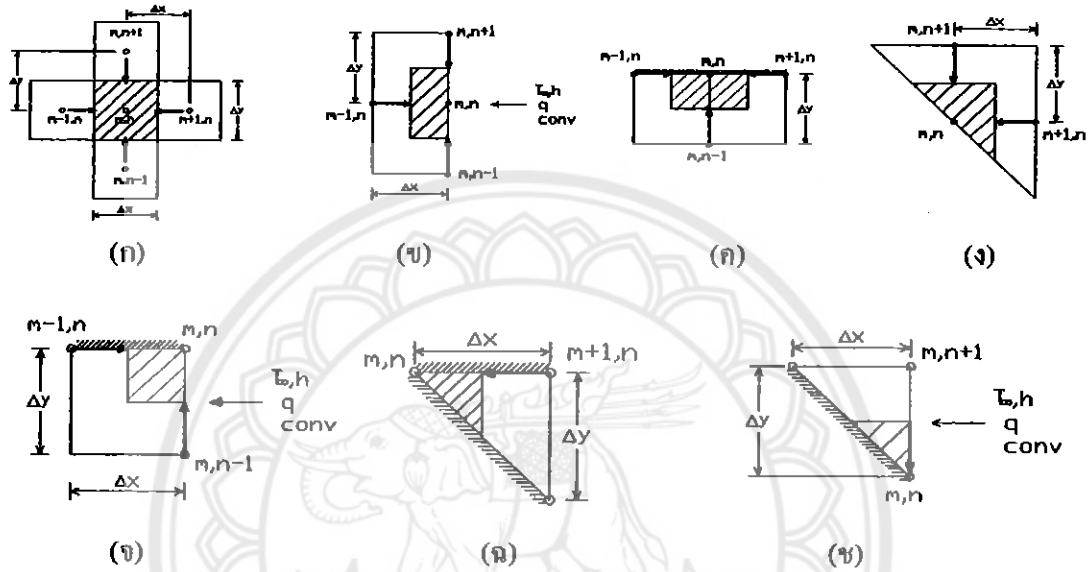
ถ้าไม่เป็นไปตามสมการ (3.29) ค่าความต้านทานความร้อนรวม คือ

$$Z_t = [(Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8)^{-1} + (1/Z_{10})]^{-1} + Z_9 \quad (3.38)$$



รูปที่ 3.10 แสดงปริมาณควบคุมการระบายความร้อนของเทอร์โมไซฟอน, [1]

สำหรับเอลิเมนต์ที่มีการใส่เทอร์โมไซฟอนเพื่อระบายความร้อนออกจากข้าวเปลือกแสดง
 ดังรูปที่ 3.11 ทำได้โดยการเพิ่มเทอมของค่าความร้อนที่ระบายออกผ่านท่อเทอร์โมไซฟอน (Q_{Ts})
 เข้าไปในสมการที่ (3.7), (3.9), (3.11), (3.13), (3.15), (3.17), (3.19) โดยอยู่ในเทอมของความร้อนที่
 ข้าวเปลือกสร้างขึ้นมา ซึ่งจะได้สมการดังนี้



รูปที่ 3.11 แสดงปริมาตรควบคุมของโนดต่างๆ ที่มีการใส่เทอร์โมไซฟอน

จากรูปที่ 3.11ก สามารถหาอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อน โดยเทอร์โมไซฟอนได้
 ดังนี้

$$T_{m,n}^{p+1} = F_o [T_{m-1,n}^p + T_{m+1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p - 4T_{m,n}^p + \frac{Q_{paddy} - Q_{Ts}}{k}] + T_{m,n}^p \quad (3.39)$$

จากรูปที่ 3.11ข สามารถหาอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อน โดยเทอร์โมไซฟอนได้
 ดังนี้

$$T_{m,n}^{p+1} = F_o [2T_{m-1,n}^p + T_{m+1,n}^p + T_{m,n+1}^p - 4T_{m,n}^p + 2Bi(T_\infty - T_{m,n}^p) + \frac{2Q_{paddy} - Q_{Ts}}{k}] + T_{m,n}^p \quad (3.40)$$

จากรูปที่ 3.11ค สามารถหาอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อน โดยเทอร์โมไซฟอนได้
 ดังนี้

$$T_{m,n}^{p+1} = F_o [T_{m-1,n}^p + T_{m+1,n}^p + 2T_{m,n-1}^p - 4T_{m,n}^p + \frac{2Q_{paddy} - Q_{Ts}}{k}] + T_{m,n}^p \quad (3.41)$$

จากรูปที่ 3.11ง สามารถหาอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อนโดยเทอร์โมไซฟอนได้ดังนี้

$$T_{m,n}^{p+1} = 2F_o [T_{m+1,n}^p + T_{m,n+1}^p - 2T_{m,n}^p + \frac{Q_{paddy} - Q_{Ts}}{k}] + T_{m,n}^p \quad (3.42)$$

จากรูปที่ 3.11จ สามารถหาอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อนโดยเทอร์โมไซฟอนได้ดังนี้

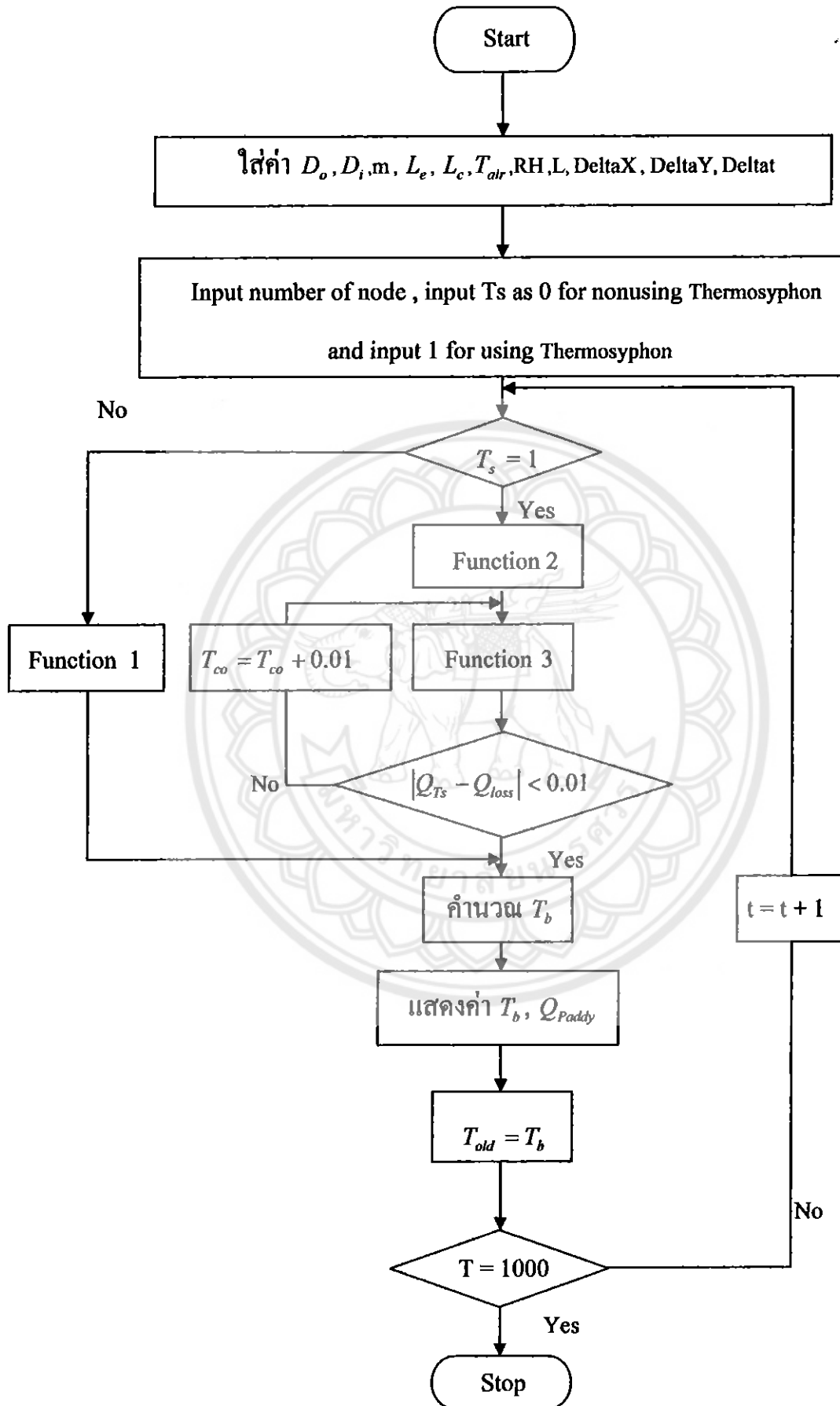
$$T_{m,n}^{p+1} = 2F_o [2T_{m-1,n}^p + T_{m,n-1}^p - 2T_{m,n}^p + Bi(T_\infty - T_{m,n}^p) + \frac{2Q_{paddy} - Q_{Ts}}{k}] + T_{m,n}^p \quad (3.43)$$

จากรูปที่ 3.11ฉ สามารถหาอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อนโดยเทอร์โมไซฟอนได้ดังนี้

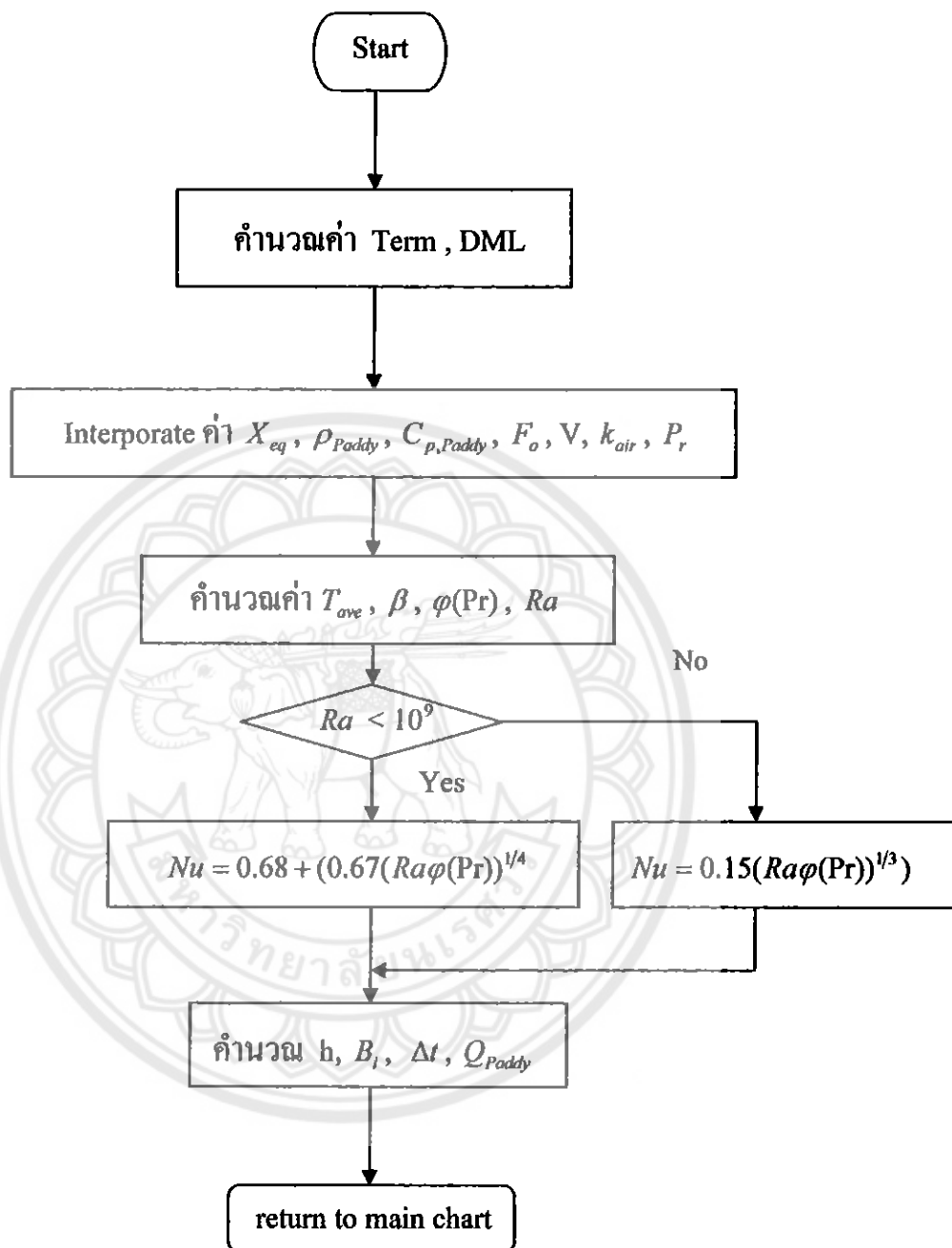
$$T_{m,n}^{p+1} = 4F_o [T_{m+1,n}^p + T_{m,n}^p + \frac{2Q_{paddy} - Q_{Ts}}{k}] + T_{m,n}^p \quad (3.44)$$

จากรูปที่ 3.11ช สามารถหาอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อนโดยเทอร์โมไซฟอนได้ดังนี้

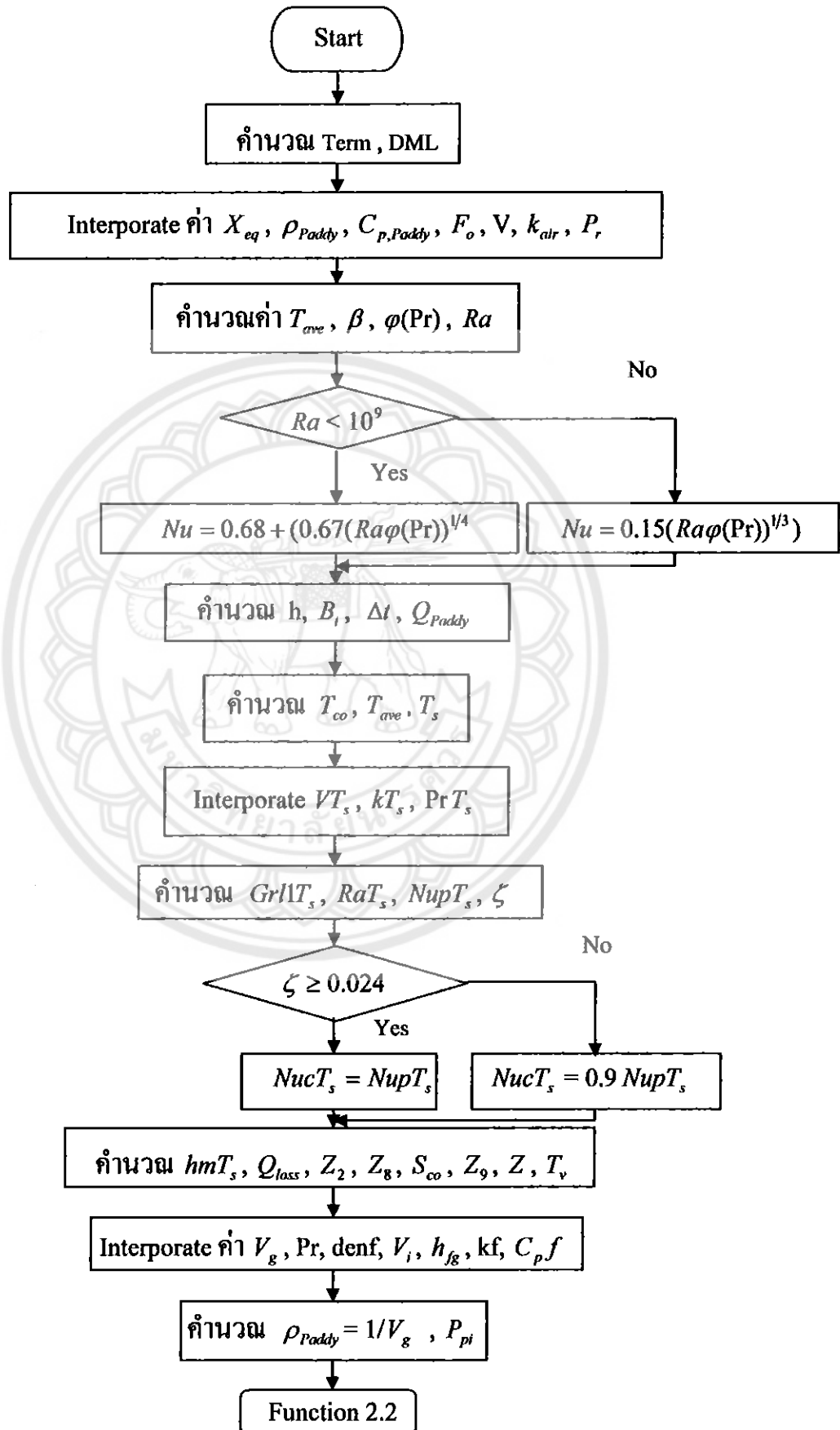
$$T_{m,n}^{p+1} = 4F_o [T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p + Bi(T_\infty - T_{m,n}^p) + \frac{2Q_{paddy} - Q_{Ts}}{k}] + T_{m,n}^p \quad (3.45)$$



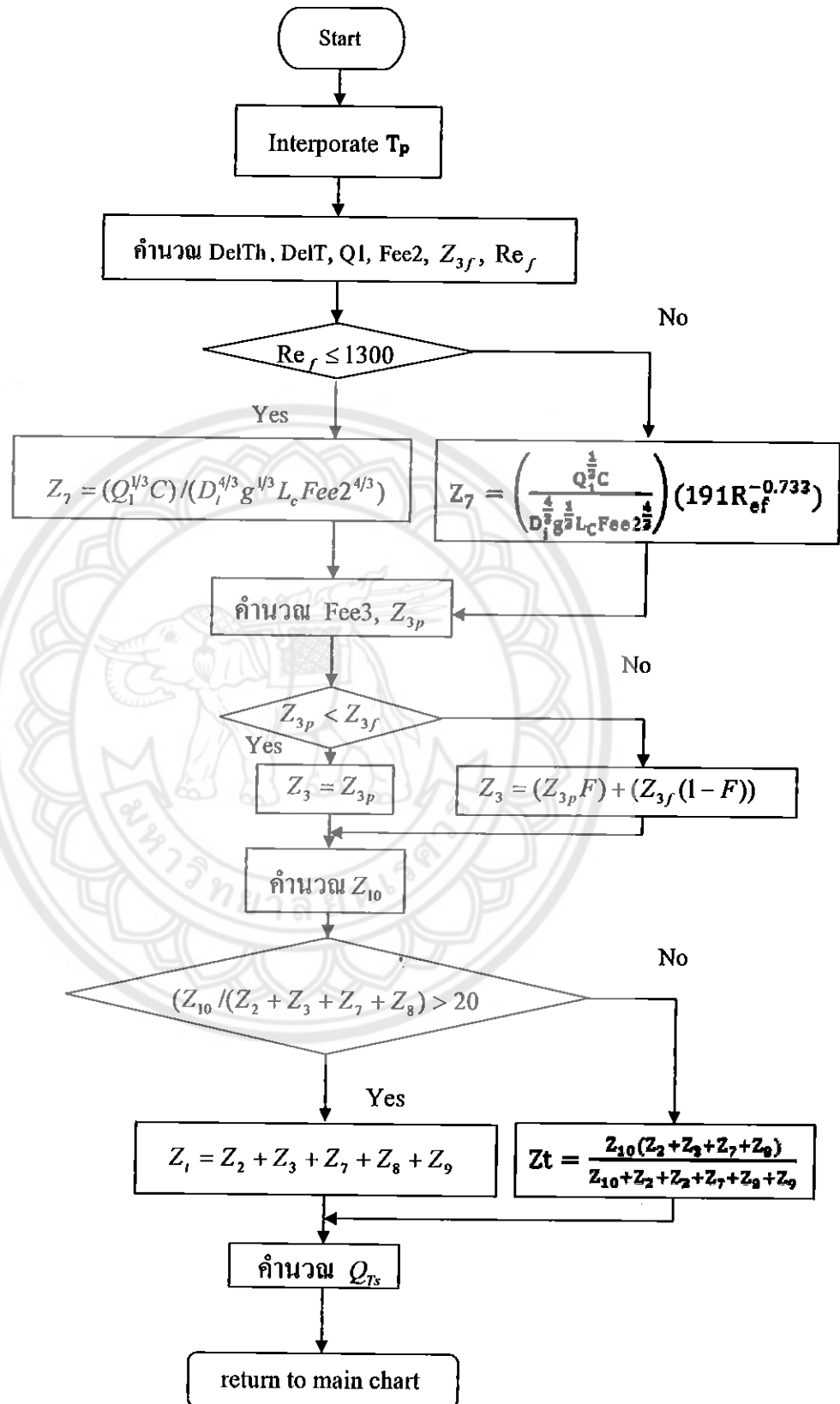
Function 1

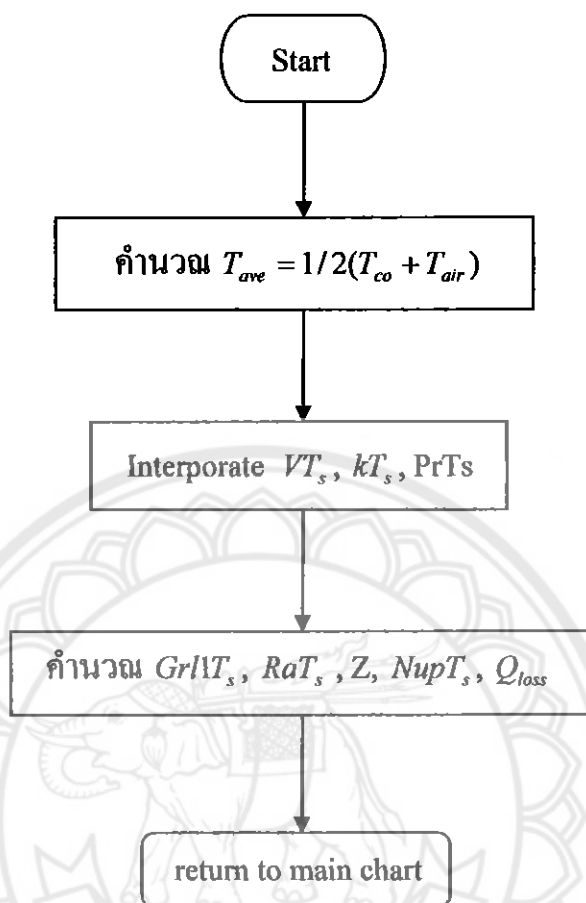


Function 2



Function 2.2



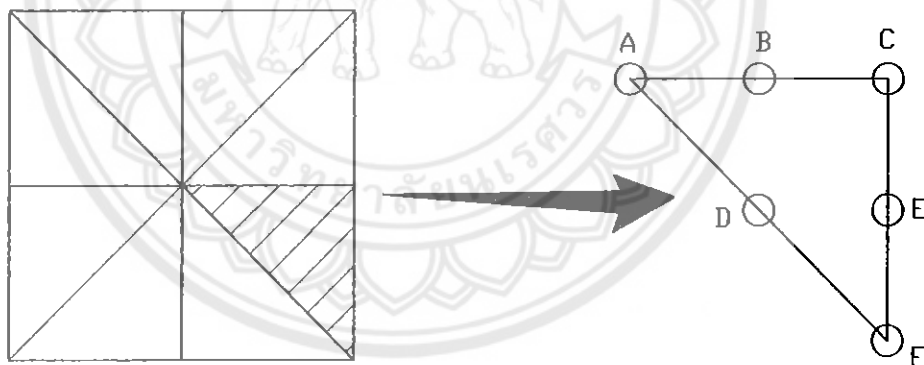
Function 3

บทที่ 4

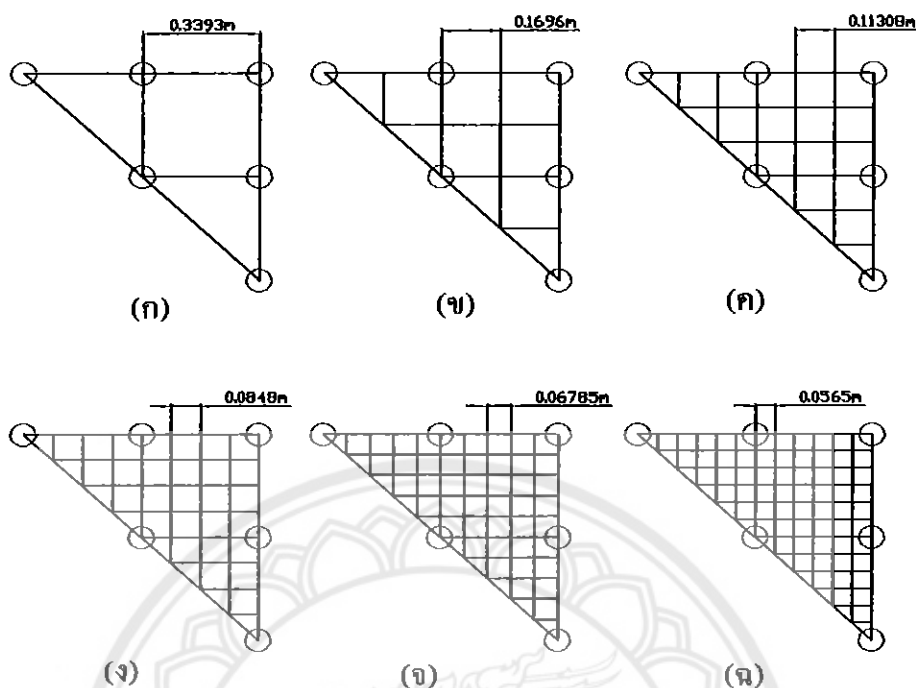
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

จากการสร้างแบบจำลองการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังที่ไม่มีเทอร์โมไซด์ฟอนและที่มีเทอร์โมไซด์ฟอนระบบความร้อน โดยใช้โปรแกรม MATLAB และได้ทำการใช้โปรแกรมคำนวณ โดยเปลี่ยนตัวแปรที่จะศึกษามีดังนี้ คือ

1. วิเคราะห์หาระยะกิริตของหน้าตัดของชั้นข้าวเปลือกที่เหมาะสมต่อการนำมำคำนวณในระบบระบบความร้อน เนื่องจากกิริตที่มีจำนวนแถวของกิริตที่เป็นจำนวนคู่และเป็นจำนวนคี่นั้นจะมีชุดตำแหน่งข้อมูลของโนดที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงเลือกกระยะกิริตที่มีจำนวนแถวของกิริตเป็นจำนวนคู่และมีระยะกิริตที่แตกต่างกันเพื่อต้องการเลือกโนดที่อยู่ในตำแหน่งเดียวกันมาวิเคราะห์ คือ โนด A, B, C และ D ดังรูปที่ (4.1) แล้วคว่ำมีแนวโนม้การถูเข้าหรือถูออกของอุณหภูมิของข้าวเปลือกอยู่ในช่วงกิริตใด ระยะกิริตที่นำมาวิเคราะห์มีดังนี้ คือ 0.3393 m, 0.1696 m, 0.11308 m, 0.0848 m, 0.06785 m และ 0.0565 m ซึ่งแสดงดังรูปที่ (4.2)



รูปที่ 4.1 แสดงโนดในตำแหน่งที่นำมาวิเคราะห์

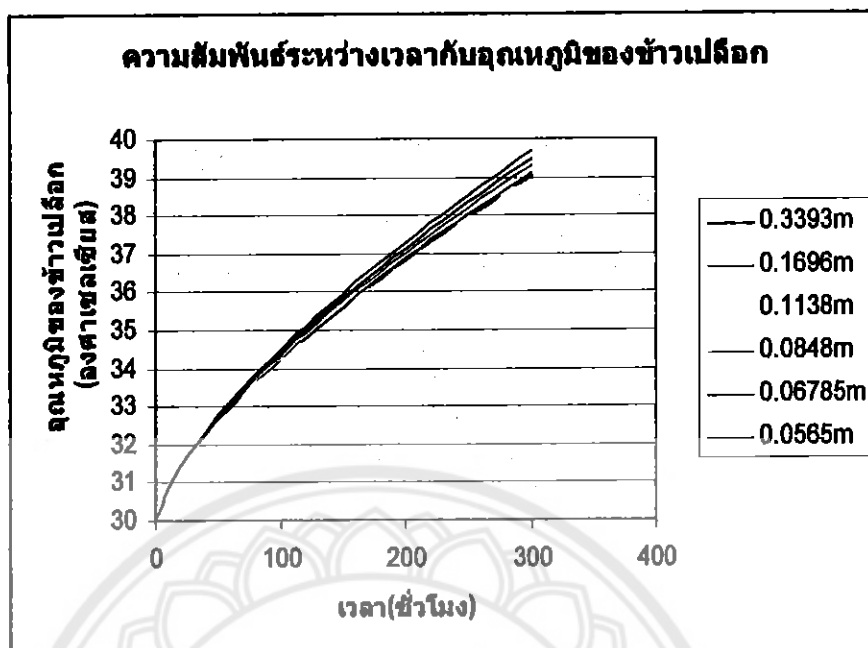


รูปที่ 4.2 แสดงขนาดกริดต่างๆ ที่นำมาวิเคราะห์ (ก) กริดขนาด 0.3393m (ข) กริดขนาด 0.1696m (ค) กริดขนาด 0.1138m (ง) กริดขนาด 0.0848m (จ) กริดขนาด 0.06785m (ฉ) กริดขนาด 0.0565m

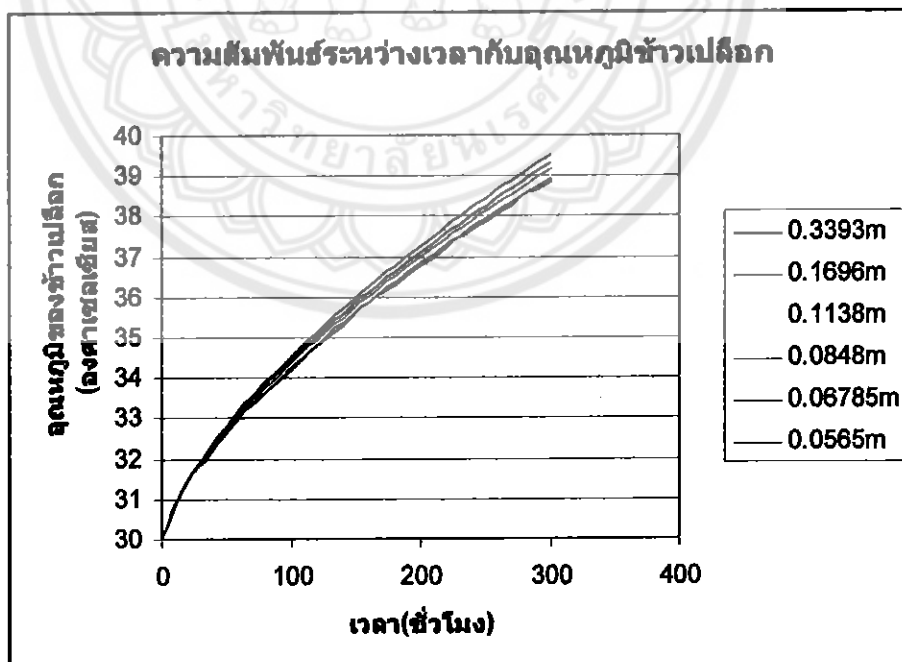
2. วิเคราะห์หาจำนวนท่อและลักษณะการจัดเรียงท่อที่ทำให้ลักษณะการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อนนั้นมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด และสามารถรักษาอุณหภูมิไว้ที่ 28-29 องศาเซลเซียส ภายในเวลาที่กำหนด โดยจำนวนท่อและลักษณะการวางท่อนั้นจะมีความสอดคล้องกับระยะกริดที่หาได้จากการวิเคราะห์ในข้อที่ 1

4.1 การวิเคราะห์หาระยะกริดของหน้าตัดของชั้นข้าวเปลือกที่เหมาะสมต่อการนำมาคำนวณในระบบระบายความร้อน

การวิเคราะห์หาระยะกริดของหน้าตัดของชั้นข้าวเปลือกที่เหมาะสมต่อการนำมาคำนวณในระบบระบายความร้อนโดยเทอร์โมไซฟอน สามารถนำมาสร้างกราฟ แสดงดังรูปที่ (4.2)-(4.7) ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนดที่นำมาวิเคราะห์โดยมีระยะกริดที่แตกต่างกันเทียบกับเวลา โดยที่แกนนอนเป็นเวลา (ชั่วโมง) และแกนตั้งเป็นอุณหภูมิของข้าวเปลือก (องศาเซลเซียส) ซึ่งแสดงได้ดังนี้



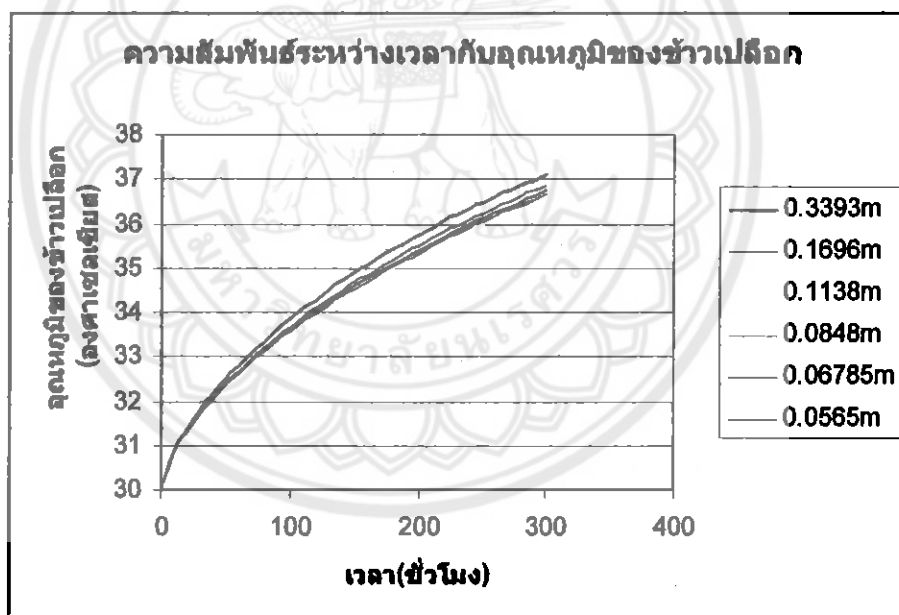
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนคตำแหน่ง A



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนคตำแหน่ง B

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนค A ที่ระยะกริดที่แตกต่างกัน นั้น สามารถเรียงระยะกริดจากเส้นที่มีอุณหภูมิสูงสุดไปสู่เส้นที่มีอุณหภูมิต่ำสุดได้ดังนี้ คือ 0.0565 m, 0.06785 m, 0.0848 m, 0.1138 m, 0.1696 m และ 0.3393 m นั่นคือ เรียงจากระยะกริดที่ละเอียดที่สุดไปสู่ระยะกริดที่หยาบที่สุด โดยเมื่อเวลาผ่านไป 300 ชั่วโมง เส้นของอุณหภูมิที่ถักกันในแต่ละเส้นมีความแตกต่างของอุณหภูมิไม่เกิน 0.2 องศาเซลเซียส

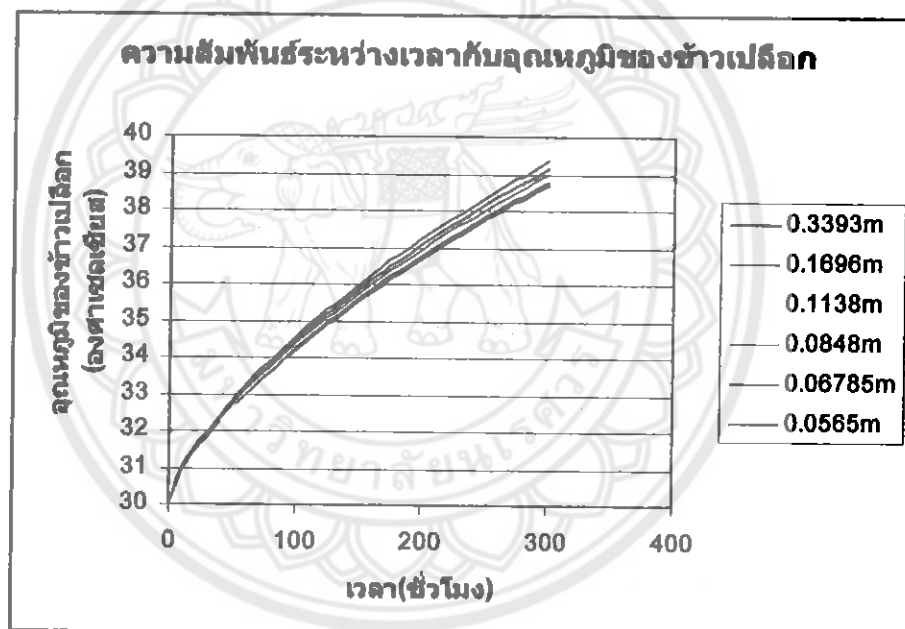
จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนค B ที่ระยะกริดที่แตกต่างกัน นั้น สามารถเรียงระยะกริดจากเส้นที่มีอุณหภูมิสูงสุดไปสู่เส้นที่มีอุณหภูมิต่ำสุดได้ดังนี้ คือ 0.0565 m, 0.06785 m, 0.0848 m, 0.1138 m, 0.1696 m และ 0.3393 m นั่นคือ เรียงจากระยะกริดที่ละเอียดที่สุดไปสู่ระยะกริดที่หยาบที่สุด โดยเมื่อเวลาผ่านไป 300 ชั่วโมง เส้นของอุณหภูมิที่ถักกันในแต่ละเส้นมีความแตกต่างของอุณหภูมิไม่เกิน 0.2 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ อุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนคตำแหน่ง C

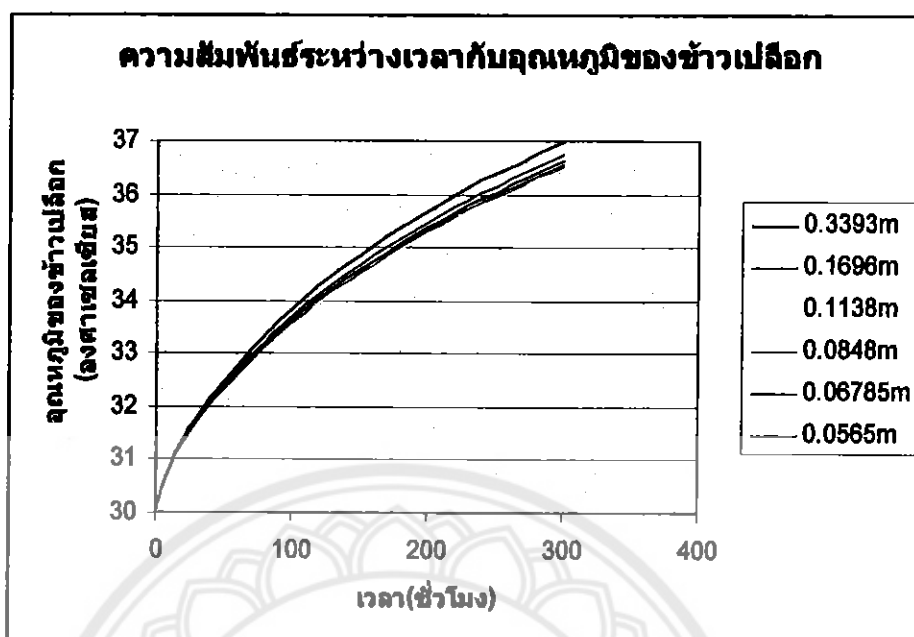
จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนค C ที่ระยะกริดที่แตกต่างกัน นั้น สามารถเรียงระยะกริดจากเส้นที่มีอุณหภูมิสูงสุดไปสู่เส้นที่มีอุณหภูมิต่ำสุดได้ดังนี้ คือ 0.3393 m, 0.0565 m, 0.06785 m, 0.1695 m, 0.0848 m และ 0.1138 m พบว่าเส้นอุณหภูมิที่ระยะกริด 0.1696 m จากเดิมซึ่งถ้าเรียงตามอุณหภูมิและความละเอียดของกริดจากรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะเป็นเส้นที่ 2

นับจากเส้นที่มีอุณหภูมิและความเค็มของกริดต่ำสุด ซึ่งจะเริ่มเกิดการลู่ออก โดยเมื่อเวลาผ่านไป 300 ชั่วโมง จะมีอุณหภูมิเป็นเส้นที่ 3 นับจากเส้นที่มีอุณหภูมิต่ำสุด ซึ่งจะอยู่ระหว่างอุณหภูมิของกริดขนาด 0.06785 m และ 0.0848 m โดยจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ขนาดกริด 0.06785 m เท่ากับ 0.08 องศาเซลเซียส และจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ขนาดกริด 0.0845 m เท่ากับ 0.009 องศาเซลเซียส ส่วนเส้นอุณหภูมิที่ระยะกริด 0.3393 m จากเดิมซึ่งถ้าเรียงตามอุณหภูมิและความเค็มของกริดจากรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะเป็นเส้นแรกที่มีอุณหภูมิต่ำสุด ซึ่งจะเริ่มเกิดการลู่ออกอย่างเห็นได้ชัด โดยจะเป็นเส้นที่มีอุณหภูมิสูงที่สุด โดยมากกว่าเส้นอุณหภูมิของขนาดกริด 0.0565 m และมีความแตกต่างของอุณหภูมิเท่ากับ 0.26 องศาเซลเซียส



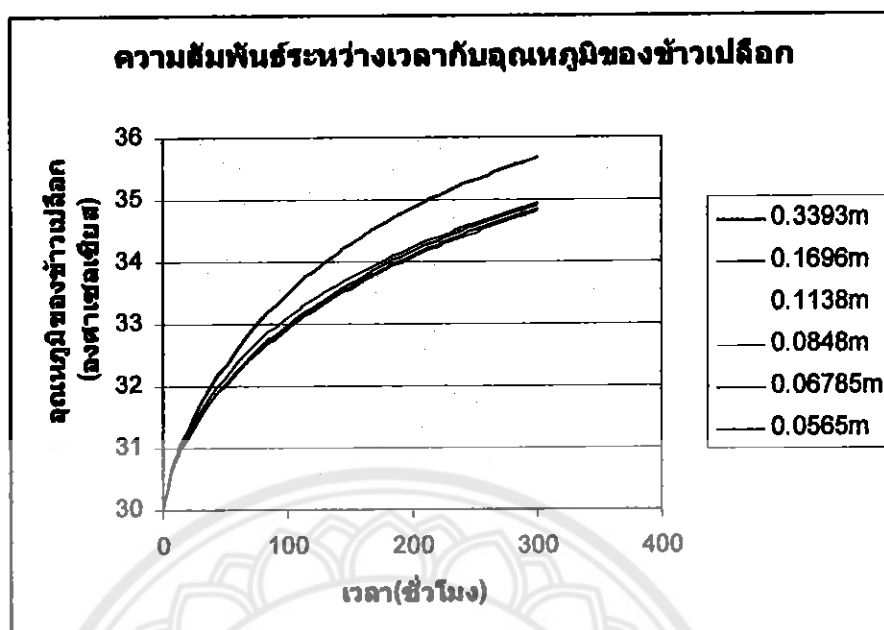
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนดตำแหน่ง D

จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกของ โนด D ที่ระยะกริดที่แตกต่างกัน นั้น สามารถเรียงระยะกริดจากเส้นที่มีอุณหภูมิสูงที่สุด ไปสู่เส้นที่มีอุณหภูมิต่ำสุดได้ดังนี้ คือ 0.0565 m, 0.06785 m, 0.0848 m, 0.1138 m, 0.1696 m และ 0.3393 m นั่นคือ เรียงจากระยะกริดที่เค็มที่สุด ไปสู่ระยะกริดที่ค้ำที่สุด โดยเมื่อเวลาผ่านไป 300 ชั่วโมง เส้นของอุณหภูมิที่ถัดกันในแต่ละเส้นมีความแตกต่างของอุณหภูมิไม่เกิน 0.2 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ อุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนดตำแหน่ง E

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกของ โหนด E ที่ระยะกริดที่แตกต่างกัน นั้น สามารถเรียงระยะกริดจากเส้นที่มีอุณหภูมิสูงสุดไปสู่เส้นที่มีอุณหภูมิต่ำสุด ได้ดังนี้ คือ 0.3393 m, 0.0565 m, 0.06785 m, 0.1696 m, 0.0848 m และ 0.1138 m พบว่าเส้นอุณหภูมิที่ระยะกริด 0.1696 m จากเดิมซึ่งถ้าเรียงตามอุณหภูมิและความละเอียดของกริดจากรูปที่ 4.3, 4.4 และ 4.6 จะเป็นเส้นที่ 2 นับจากเส้นที่มีอุณหภูมิและความละเอียดของกริดต่ำสุด ซึ่งจะเกิดการรบกวน โดยเมื่อเวลาผ่านไป 300 ชั่วโมง จะมีอุณหภูมิเป็นเส้นที่ 3 นับจากเส้นที่มีอุณหภูมิต่ำสุด ซึ่งจะอยู่ระหว่างอุณหภูมิของกริดขนาด 0.06785 m และ 0.0848 m โดยจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ขนาดกริด 0.06785 m เท่ากับ 0.08 องศาเซลเซียส และจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ขนาดกริด 0.0845 m เท่ากับ 0.007 องศาเซลเซียส ส่วนเส้นอุณหภูมิที่ระยะกริด 0.3393 m จากเดิมซึ่งถ้าเรียงตามอุณหภูมิและความละเอียดของกริดจากรูปที่ 4.3 , 4.4 และ 4.6 จะเป็นเส้นแรกที่มีอุณหภูมิต่ำสุด ซึ่งจะเกิดการรบกวนอย่างเห็นได้ชัด โดยจะเป็นเส้นที่มีอุณหภูมิสูงสุดโดยมากกว่าเส้นอุณหภูมิของขนาดกริด 0.0565 m และมีความแตกต่างของอุณหภูมิเท่ากับ 0.25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ อุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนดตำแหน่ง F

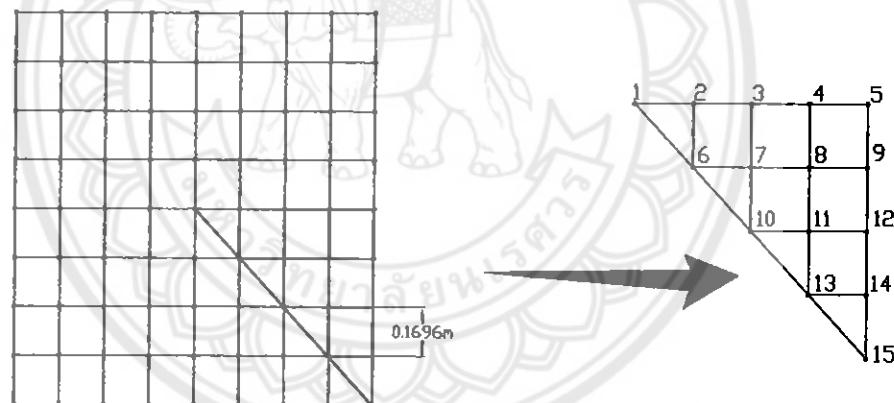
จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนด E ที่ระยะกริดที่แตกต่างกัน นั้น สามารถเรียงระยะกริดจากเส้นที่มีอุณหภูมิสูงสุด ไปสู่เส้นที่มีอุณหภูมิต่ำสุดได้ดังนี้ คือ 0.3393 m, 0.1696 m, 0.0565 m, 0.06785 m, 0.0848 m และ 0.1138 m พบว่าเส้นอุณหภูมิที่ระยะกริด 0.1696 m จากเค็มซึ่งถ้าเรียงตามอุณหภูมิและความละเอียดของกริดจากรูปที่ 4.3, 4.4 และ 4.6 จะเป็นเส้นที่ 2 นับจากเส้นที่มีอุณหภูมิและความละเอียดของกริดต่ำสุด ซึ่งจะเกิดการถูออก โดยเมื่อเวลาผ่านไป 300 ชั่วโมง จะมีอุณหภูมิเป็นเส้นที่ 5 นับจากเส้นที่มีอุณหภูมิต่ำสุด ซึ่งจะมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง อุณหภูมิของกริดขนาด 0.3393 m และ 0.0565 m โดยจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ขนาดกริด 0.3393 m เท่ากับ 0.74 องศาเซลเซียส และจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ขนาดกริด 0.0565 m เท่ากับ 0.02 องศาเซลเซียส ส่วนเส้นอุณหภูมิที่ระยะกริด 0.3393 m จากเค็มซึ่งถ้าเรียงตามอุณหภูมิและความละเอียดของกริดจากรูปที่ 4.3, 4.4 และ 4.6 จะเป็นเส้นแรกที่มีอุณหภูมิต่ำสุด ซึ่งจะเกิดการถูออกอย่างเห็นได้ชัด โดยจะเป็นเส้นที่มีอุณหภูมิสูงที่สุด โดยมากกว่าเส้นอุณหภูมิของขนาดกริด 0.1696 m และ 0.0565 m และมีความแตกต่างของอุณหภูมิเท่ากับ 0.74 และ 0.76 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ อุณหภูมิของข้าวเปลือกข้างต้น พบว่า ที่ระยะกริด 0.1696 m มีแนวโน้มการถูออกของอุณหภูมิของข้าวเปลือกออกจากอุณหภูมิของระยะกริดที่ต่ำกว่า แต่ยังคงอยู่ในแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของระยะกริดที่ต่ำกว่า ซึ่งมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิมากที่สุดเท่ากับ 0.02 องศาเซลเซียส แต่ที่ระยะกริด 0.3393 m มี

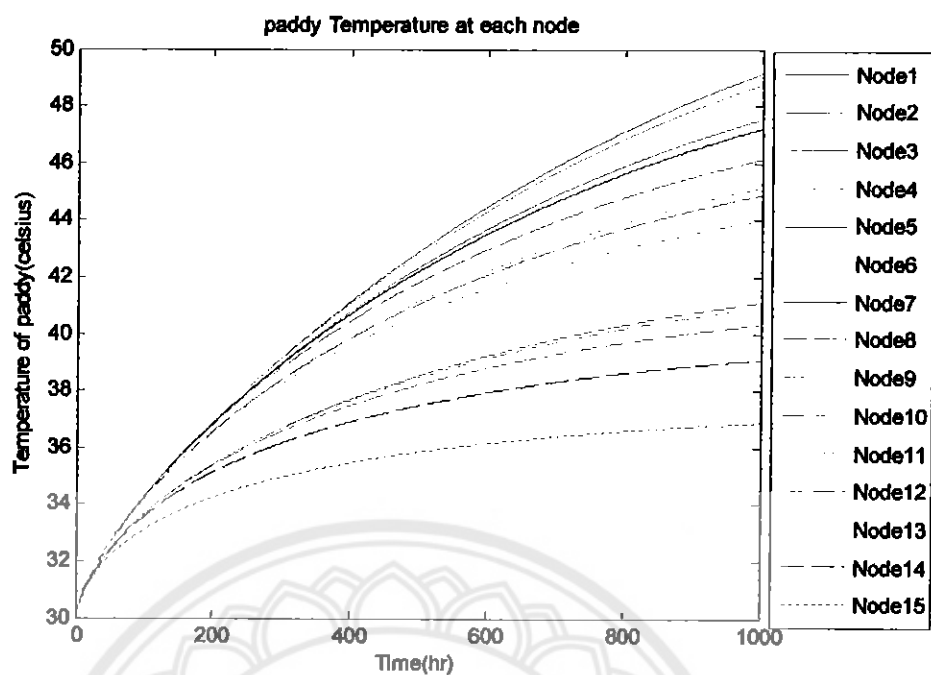
แนวโน้มการปล่อยของอุณหภูมิของข้าวเปลือกออกจากอุณหภูมิของระยะกริดที่ต่ำกว่าอย่างมาก ซึ่งมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิมากที่สุดเท่ากับ 0.74 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงเลือกระยะกริดเริ่มต้นที่จะนำมาวิเคราะห์หาจำนวนท่อและลักษณะการวางท่อได้ คือ ระยะกริดที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.1696 m

4.2 การวิเคราะห์หาจำนวนท่อและลักษณะการวางท่อเทอร์โมไซฟอนในถังข้าวเปลือก

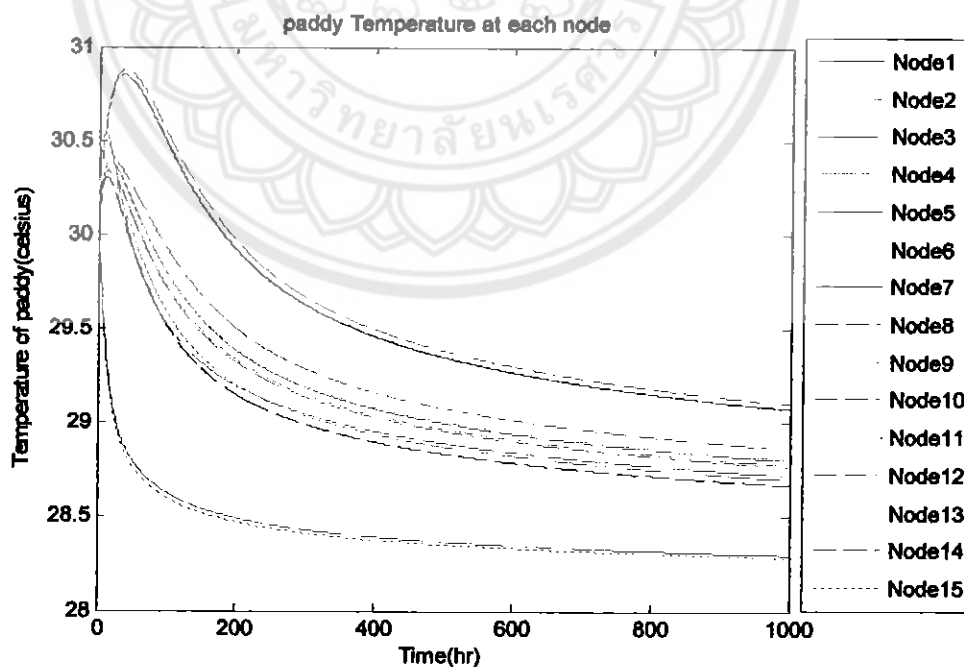
การวิเคราะห์หาจำนวนท่อและลักษณะการวางท่อสามารถแสดงดังรูปที่ (4.9)-(4.23) ซึ่งเป็นแสดงกริดที่นำมาวิเคราะห์พร้อมกับกราฟการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกในกรณีที่ไม่มีเทอร์โมไซฟอนและกราฟการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกในกรณีที่มีเทอร์โมไซฟอน โดยแกนนอนเป็นเวลา(ชั่วโมง) และแกนตั้งเป็นอุณหภูมิของข้าวเปลือก(องศาเซลเซียส) โดยเริ่มต้นวิเคราะห์จากระยะกริดเท่ากับ 0.1696 m ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.1



รูปที่ 4.9 แสดงกริดขนาด 0.1696 m



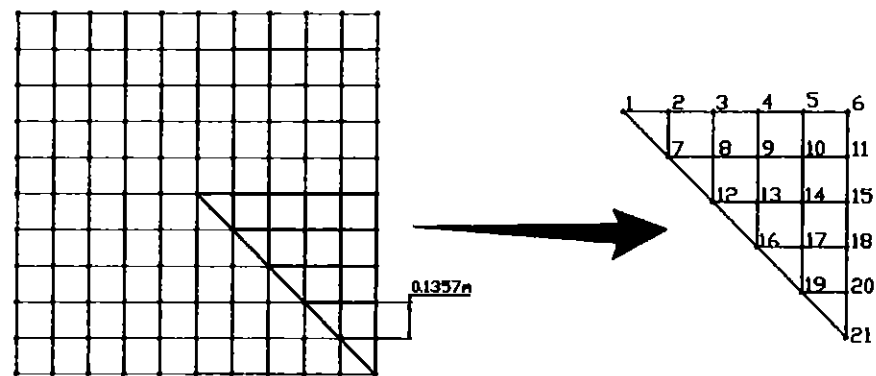
รูปที่ 4.10 แสดงความผันแปรที่ระยะกริดเท่ากับ 0.1696 m ระหว่างเวลาเก็บอุณหภูมิของข้าวเปลือกของแต่ละโนดโดยที่ไม่มีการใส่เทอร์โมไซฟอน



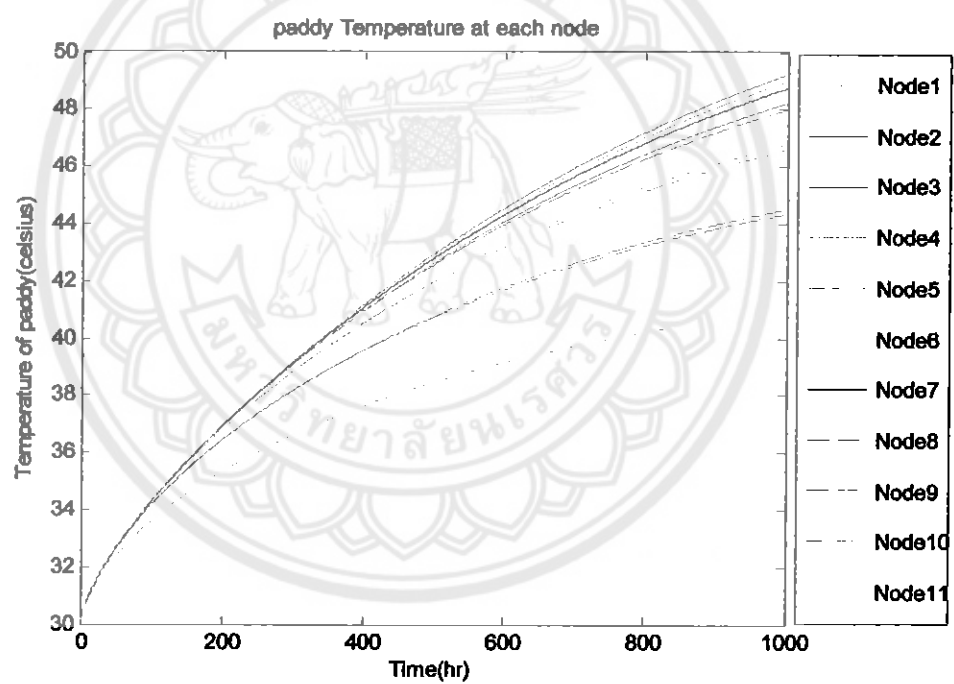
รูปที่ 4.11 แสดงความผันแปรที่ระยะกริดเท่ากับ 0.1696 m ระหว่างเวลาเก็บอุณหภูมิของข้าวเปลือกของแต่ละโนดโดยที่มีการใส่เทอร์โมไซฟอนทุกโนด

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่แต่ละโนคนั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งสามารถเรียงจากโนคที่มีอุณหภูมิสูงสุดไปสู่โนคที่มีอุณหภูมิต่ำสุดได้ดังนี้ คือ โนคที่ 1, 2, 6, 3, 7, 10, 4, 8, 11, 13, 5, 9, 12, 14, 15 ตามลำดับ โดยโนคที่มีอุณหภูมิสูงที่สุด คือ โนคที่ 1 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ตรงกึ่งกลางของทุกๆ หน้าตัดของถัง และโนคที่มีอุณหภูมิน้อยที่สุด คือ โนคที่ 15 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ตรงมุมถังของทุกๆ หน้าตัด ส่วนโนคอื่นๆ จะมีแนวโน้มของอุณหภูมิดังนี้ คือ อุณหภูมิจะต่ำลงเมื่อเข้าใกล้ผนังของถังมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากที่บริเวณผนังของถังจะมีการพาความร้อนเนื่องจากธรรมชาติเกิดขึ้น จึงทำให้ข้าวเปลือกบริเวณใกล้กับผนังถังมีการสูญเสียความร้อนที่ข้าวเปลือกสร้างขึ้นมาให้กับบรรยากาศ และจะเห็นว่าถ้าปราศจากการระบายความร้อนแล้ว อุณหภูมิของข้าวเปลือกเมื่อเวลาผ่านไป 1000 ชั่วโมง จะสูงถึง 37-49 องศาเซลเซียส เลย์ที่เดียว ซึ่งถือว่าข้าวเปลือกที่มีอุณหภูมิสูงถึงขนาดนี้ จะทำให้ข้าวเปลือกเสื่อมคุณภาพลงอย่างรวดเร็ว เพราะการเก็บรักษาข้าวเปลือกให้คงคุณภาพดีนั้นจะต้องรักษาอุณหภูมิให้คงที่ที่ 28-29 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องมีการระบายความร้อนให้กับข้าวเปลือกเพื่อรักษาคุณภาพของข้าวเปลือก

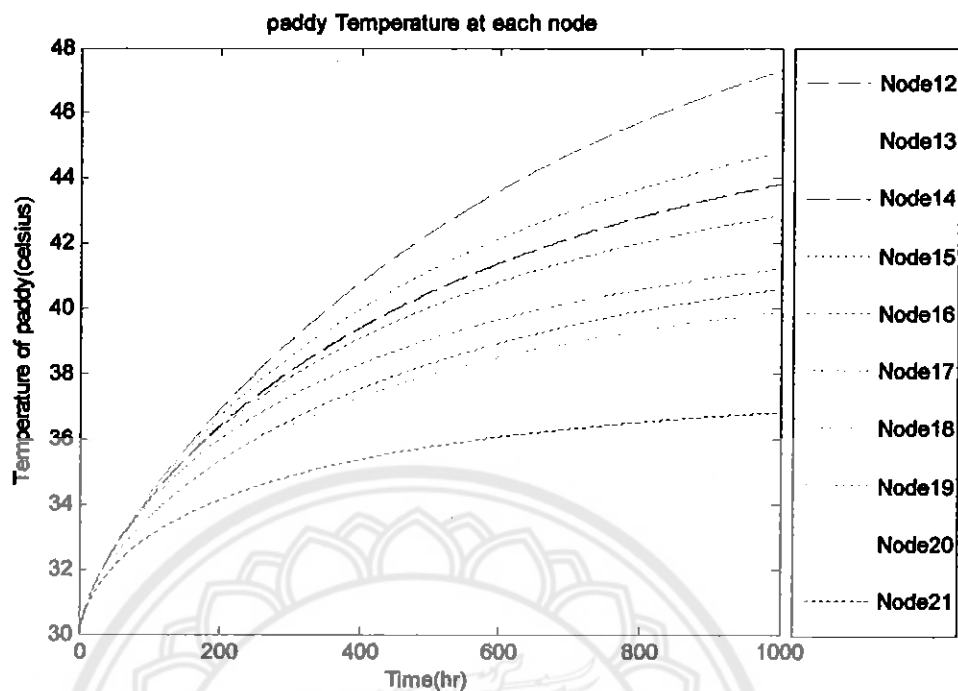
จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกเมื่อมีการใส่เทอร์โมไซฟอนที่ทุกๆ โนคซึ่งจะได้เทอร์โมไซฟอนทั้งหมดเท่ากับ 81 ท่อ อุณหภูมิของแต่ละโนคนั้นจะมีความแตกต่างกัน ซึ่งสามารถเรียงจากโนคที่มีอุณหภูมิสูงสุดไปสู่โนคที่มีอุณหภูมิต่ำสุดได้ดังนี้ คือ โนคที่ 8, 7, 11, 10, 4, 3, 6, 13, 9, 12, 5, 2, 14, 1, 15 ตามลำดับ โดยความสามารถในการรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่โนคต่างๆ มีดังนี้ คือ โนคที่ 1 และ 15 จะมีอุณหภูมิลดลงทันทีจาก 30 องศาเซลเซียส จนสามารถรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียส ได้ภายในเวลาที่น้อยกว่า 50 ชั่วโมง โนคที่ 10, 4, 3, 6, 13, 9, 12, 5, 2, 14 ใน 50 ชั่วโมงแรก จะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นแต่ไม่เกิน 30.5 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะมีอุณหภูมิลดต่ำลงเรื่อยๆ และสามารถรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียส ได้ภายในเวลา 624 ชั่วโมง โนคที่ 8, 7, 11 ใน 50 ชั่วโมงแรก จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นแต่ไม่เกิน 31 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะมีอุณหภูมิลดต่ำลงเรื่อยๆ และเมื่อเวลาผ่านไปถึง 1000 ชั่วโมง ยังไม่สามารถรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียส ได้ ซึ่งข้าวเปลือกที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 29 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิไม่เกิน 31 องศาเซลเซียส จะสามารถเก็บได้นานที่สุด 722.4 ชั่วโมง โดยมีเปอร์เซ็นต์ความงอกลดลงน้อยกว่า 10% ดังนั้นที่ระยะกริด 0.1696 m และมีการใส่เทอร์โมไซฟอนที่ทุกๆ โนค ซึ่งจะมีเทอร์โมไซฟอนทั้งหมดเท่ากับ 81 ท่อ นั้น ไม่สามารถนำมาใช้ระบายความร้อนให้แก่ข้าวเปลือกในระบบนี้ได้ เนื่องจากมีโนคที่ไม่สามารถรักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 722.4 ชั่วโมง นั่นคือ โนคที่ 8, 7 และ 11 นั้นเอง จึงทำการเลือกขนาดกริดที่ละเอียดขึ้นเพื่อทำการวิเคราะห์ในลักษณะเดิมต่อไป นั่นก็คือ กริดขนาด 0.1357 m



รูปที่ 4.12 แสดงกริดขนาด 0.1357 m

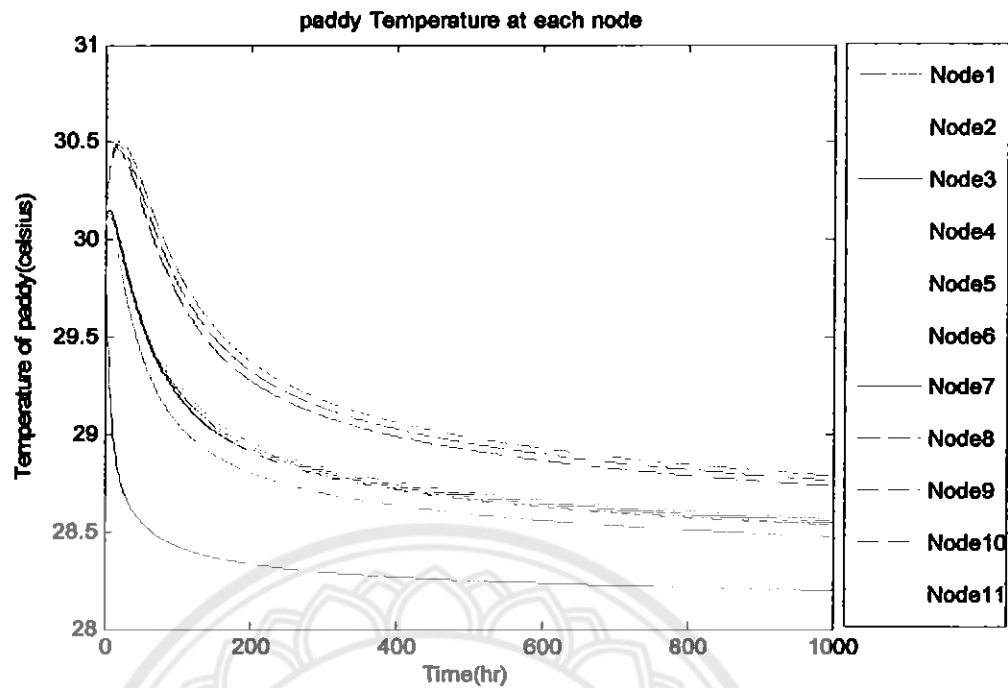


รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ที่ระยะกริดเท่ากับ 0.1357 m ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนค1-11โดยที่ไม่มีการใส่เทอร์โมไซฟอน

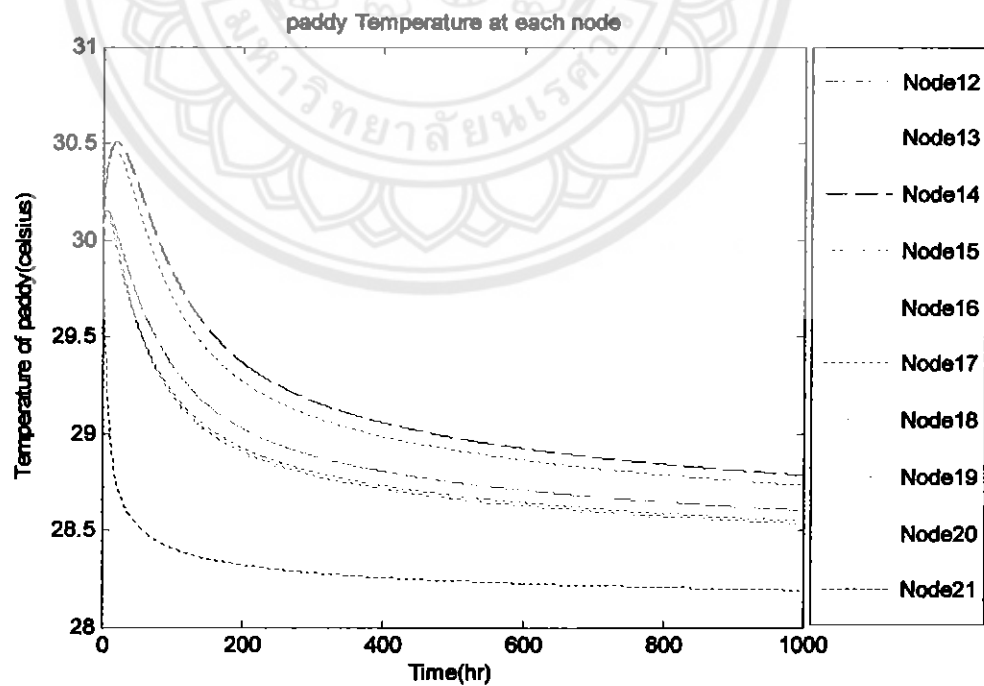


รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ที่ระยะกริดเท่ากับ 0.1357 m ระหว่างเวลา กับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนด12-21โดยที่ไม่มีการใส่เทอร์โมไซฟอน

จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 จะเห็นว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่แต่ละ โหนดนั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งสามารถเรียงจาก โหนดที่มีอุณหภูมิสูงสุดไปสู่นโหนดที่มีอุณหภูมิต่ำสุดได้ดังนี้ คือ โหนดที่ 1, 2, 7, 3, 8, 12, 4, 9, 13, 16, 5, 10, 14, 17, 19, 6, 11, 15, 18, 20, 21 ตามลำดับ โดยโหนดที่มีอุณหภูมิสูงสุดคือ โหนดที่ 1 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ตรงกึ่งกลางของทุกๆหน้าตัดของถัง และโหนดที่มีอุณหภูมิน้อยที่สุด คือ โหนดที่ 15 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ตรงมุมของทุกๆหน้าตัดของถัง ส่วน โหนดอื่นๆ จะมีแนวโน้มของอุณหภูมิดังนี้ คือ อุณหภูมิจะต่ำลงเมื่อเข้าใกล้ผนังของถังมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่บริเวณผนังของถังจะมีการพาความร้อนเนื่องจากธรรมชาติเกิดขึ้น จึงทำให้ข้าวเปลือกบริเวณใกล้กับผนังถังมีการสูญเสียความร้อนที่ข้าวเปลือกสร้างขึ้นมาให้กับบรรยากาศ และจะเห็นว่าถ้าปราศจากการระบายความร้อนแล้วอุณหภูมิของข้าวเปลือกเมื่อเวลาผ่านไป 1000 ชั่วโมง จะสูงถึง 37-49 องศาเซลเซียส เลขที่เดียว ซึ่งถือว่าข้าวเปลือกที่มีอุณหภูมิสูงถึงขนาดนี้ จะทำให้ข้าวเปลือกเสื่อมคุณภาพลงอย่างรวดเร็ว เพราะการเก็บรักษาข้าวเปลือกให้คงคุณภาพดีนั้นจะต้องรักษาอุณหภูมิให้คงที่ที่ 28-29 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องมีการระบายความร้อนให้กับข้าวเปลือกเพื่อรักษาคุณภาพของข้าวเปลือก

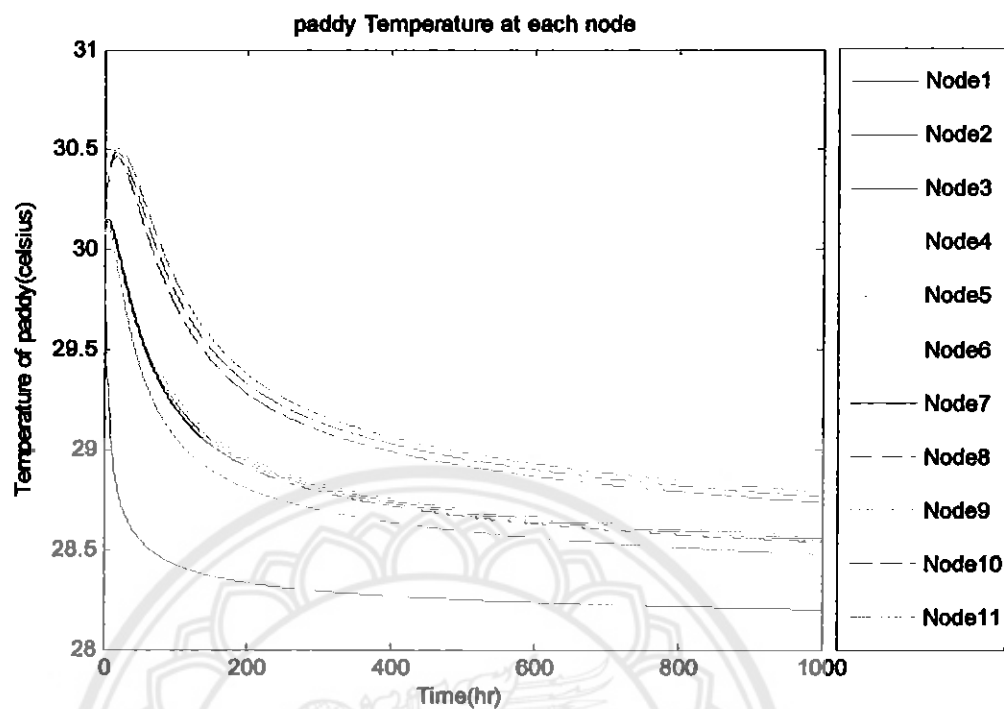


รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ที่ระยะกริดเท่ากับ 0.1357 m ระหว่างเวลา กับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนด1-11โดยที่มีการใส่เทอร์โมไซด์ฟอนทุกโนด

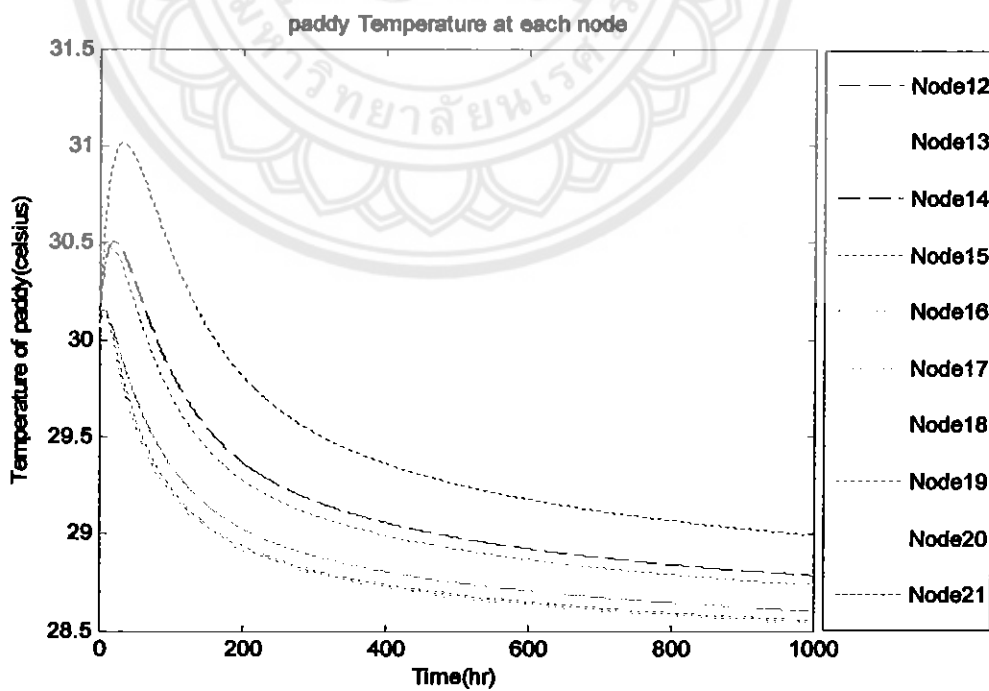


รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ที่ระยะกริดเท่ากับ 0.1357 m ระหว่างเวลา กับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนด12-21โดยที่มีการใส่เทอร์โมไซด์ฟอนทุกโนด

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 จะเห็นว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกเมื่อมีการใส่เทอร์โมไซโฟนที่
 ทุกๆ โหนดซึ่งจะได้เทอร์โมไซโฟนทั้งหมดเท่ากับ 121 ท่อ อุณหภูมิของแต่ละโหนดนั้นจะมีความ
 แตกต่างกัน ซึ่งสามารถเรียงจากโหนดที่มีอุณหภูมิสูงสุดไปสู่โหนดที่มีอุณหภูมิต่ำสุดได้ดังนี้ คือ โหนดที่
 9, 14, 13, 10, 8, 17, 12, 16, 4, 5, 3, 15, 11, 7, 19, 18, 6, 2, 20, 1, 21 ตามลำดับโดยความ สามารถใน
 การรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่โหนดต่างๆ มีดังนี้ คือ โหนดที่ 1 และ 21 จะมีอุณหภูมิลดลงทันที
 จาก 30 องศาเซลเซียส จนสามารถรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียส ได้
 ภายในเวลาที่น้อยกว่า 50 ชั่วโมง โหนดที่ 12, 16, 4, 5, 3, 15, 11, 7, 19, 18, 6, 2, 20 ใน 50 ชั่วโมงแรก
 จะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นแต่ไม่เกิน 30.2 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะมีอุณหภูมิลดต่ำลงเรื่อยๆ และ
 สามารถรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียส ได้ภายในเวลา 210 ชั่วโมง โหนดที่
 9, 14, 13, 10, 8, 17 ใน 50 ชั่วโมงแรก จะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นแต่ไม่เกิน 30.5 องศาเซลเซียส หลังจากนั้น
 จะมีอุณหภูมิลดต่ำลงเรื่อยๆ และสามารถรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียส
 ได้ภายในเวลา 478 ชั่วโมง ซึ่งข้าวเปลือกที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 29 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิไม่
 เกิน 31 องศาเซลเซียส จะสามารถเก็บได้นานที่สุด 722.4 ชั่วโมง โดยมีเปอร์เซ็นต์ความงอกลดลง
 น้อยกว่า 10% ดังนั้นที่ระยะกระดิด 0.1357 m และมีการใส่เทอร์โมไซโฟนที่ทุกๆ โหนด ซึ่งจะมีเทอร์โม
 ไซโฟนทั้งหมดเท่ากับ 121 ท่อ นั้นสามารถนำมาใช้ระบายความร้อนให้แก่ข้าวเปลือกในระบบนี้ได้
 เนื่องจากที่ทุกๆ โหนดสามารถรักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 478 ชั่วโมง ซึ่ง
 น้อยกว่าเวลาของข้าวเปลือกที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 29 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิไม่เกิน 31 องศา
 เซลเซียส ที่สามารถเก็บได้นานที่สุด 722.4 ชั่วโมง โดยมีผลต่างของเวลาเท่ากับ 224.4 ชั่วโมง
 ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ต่อไปโดยการลดจำนวนท่อลง โดยจะทำการลดจำนวนท่อที่โหนด 21 ซึ่ง
 เป็นโหนดที่มีอุณหภูมิต่ำสุดเมื่อ ไม่มีการใส่เทอร์โมไซโฟนที่ทุกๆ โหนด

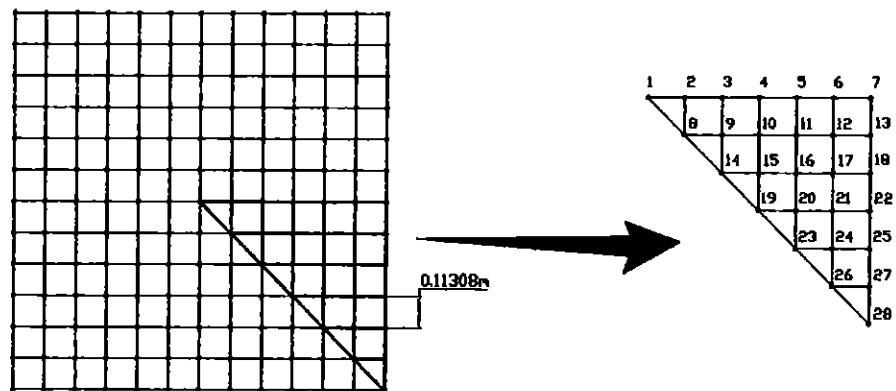


รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ที่ระยะกริดเท่ากับ 0.1357 m ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนด1-11โดยที่ไม่มีการใส่เทอร์โมไซฟอนที่โนด 21

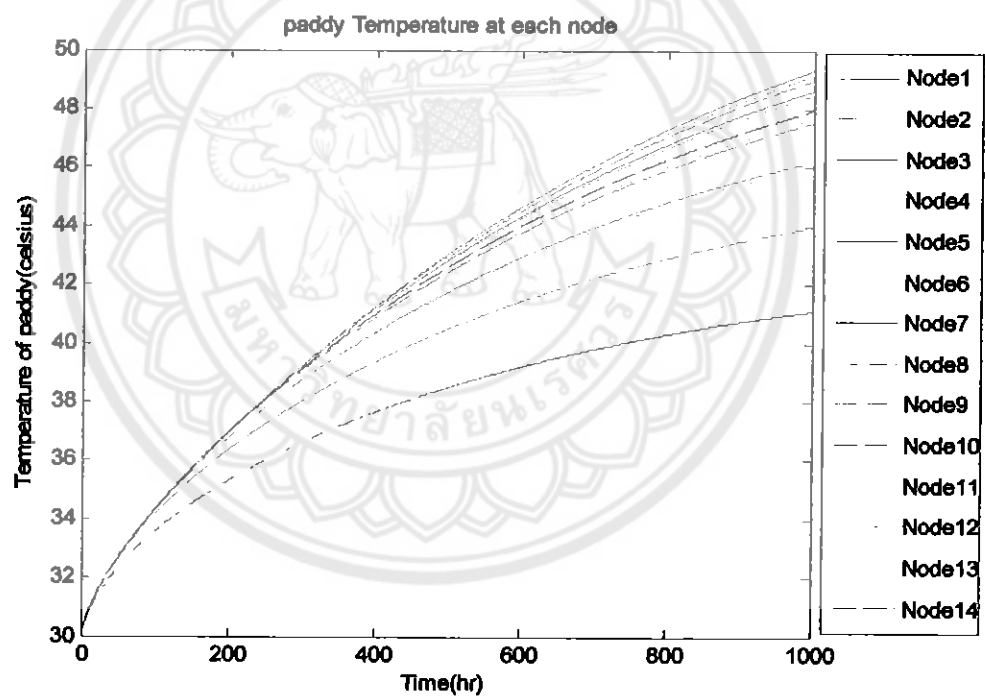


รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ที่ระยะกริดเท่ากับ 0.1357 m ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนด12-21โดยที่ไม่มีการใส่เทอร์โมไซฟอนที่โนด 21

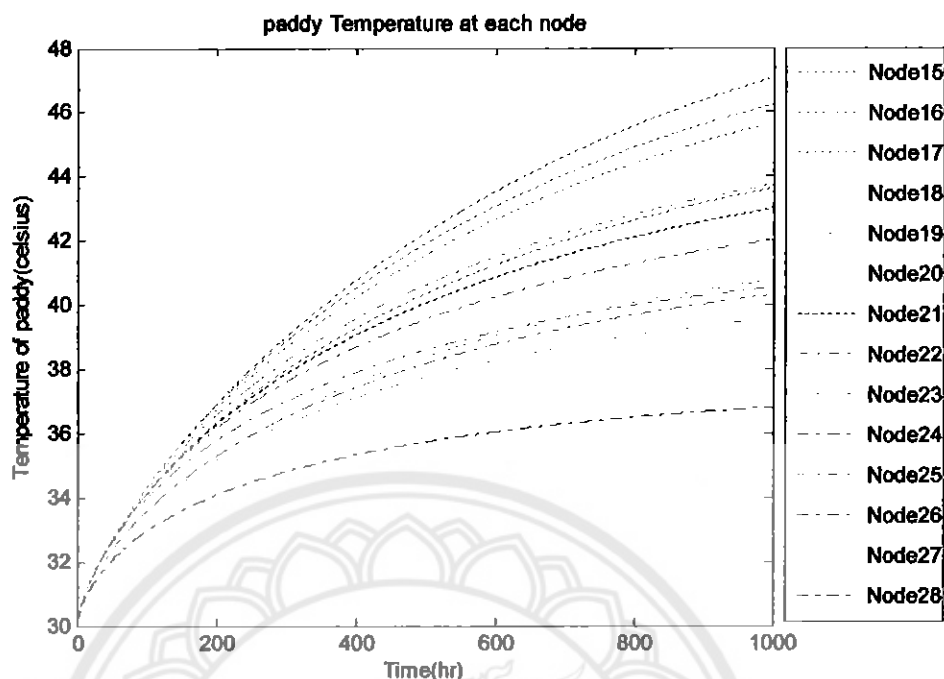
จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 จะเห็นว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกเมื่อมีการใส่เทอร์โมไซฟอนที่
 ทุกๆ โนคยกเว้น โนคที่ 21 ซึ่งจะได้เทอร์โมไซฟอนทั้งหมดเท่ากับ 117 ท่อ อุณหภูมิของแต่ละ โนค
 นั้นจะมีความแตกต่างกัน ซึ่งสามารถเรียงจาก โนคที่มีอุณหภูมิสูงสุด ไปสู่ โนคที่มีอุณหภูมิต่ำสุดได้
 ดังนี้ คือ โนคที่ 21, 9, 14, 13, 10, 17, 8, 16, 12, 4, 5, 19, 15, 3, 20, 11, 18, 7, 6, 2, 1, ตามลำดับโดย
 ความสามารถในการรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่โนคต่างๆ มีดังนี้ คือ โนคที่ 1 จะมีอุณหภูมิลดลง
 ทันทีจาก 30 องศาเซลเซียส จนสามารถรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียส
 ได้ภายในเวลาไม่น้อยกว่า 50 ชั่วโมง โนคที่ 16, 12, 4, 5, 19, 15, 3, 20, 11, 18, 7, 6, 2 ใน 50
 ชั่วโมงแรก จะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นแต่ไม่เกิน 30.2 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะมีอุณหภูมิลดต่ำลง
 เรื่อยๆ และสามารถรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียสได้ภายในเวลาที่ต่ำ
 กว่า 213 ชั่วโมง โนคที่ 9, 14, 13, 10, 17, 8 ใน 50 ชั่วโมงแรก จะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นแต่ไม่เกิน 30.5
 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะมีอุณหภูมิลดต่ำลงเรื่อยๆ และสามารถรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือก
 ให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียสได้ภายในเวลา 478 ชั่วโมง โนคที่ 21 ใน 50 ชั่วโมงแรก จะมีอุณหภูมิที่
 สูงขึ้นแต่ไม่เกิน 31.1 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะมีอุณหภูมิลดต่ำลงเรื่อยๆ และสามารถรักษา
 อุณหภูมิของข้าวเปลือกให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียสได้ภายในเวลา 1000 ชั่วโมง ซึ่งข้าวเปลือกที่มี
 อุณหภูมิสูงกว่า 29 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิไม่เกิน 31 องศาเซลเซียส จะสามารถเก็บได้นาน
 ที่สุด 722.4 ชั่วโมงโดยมีเปอร์เซ็นต์ความงอกลดลงน้อยกว่า 10% ดังนั้นที่ระยะกริต 0.1357 m และ
 มีการใส่เทอร์โมไซฟอนที่ทุกๆ โนคยกเว้น โนคที่ 21 ซึ่งจะมีเทอร์โมไซฟอนทั้งหมดเท่ากับ 117 ท่อ
 นั้นไม่สามารถนำมาใช้ระบายความร้อนให้แก่ข้าวเปลือกในระบบนี้ได้ เนื่องจากมีโนคที่ไม่สามารถ
 รักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 722.4 ชั่วโมง นั่นคือ โนคที่ 21 นั่นเอง เพื่อค
 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิของกริตอื่นๆ จึงทำการเลือกระยะกริตที่มีความละเอียดมากขึ้น



รูปที่ 4.19 แสดงกริดขนาด 0.11308 m

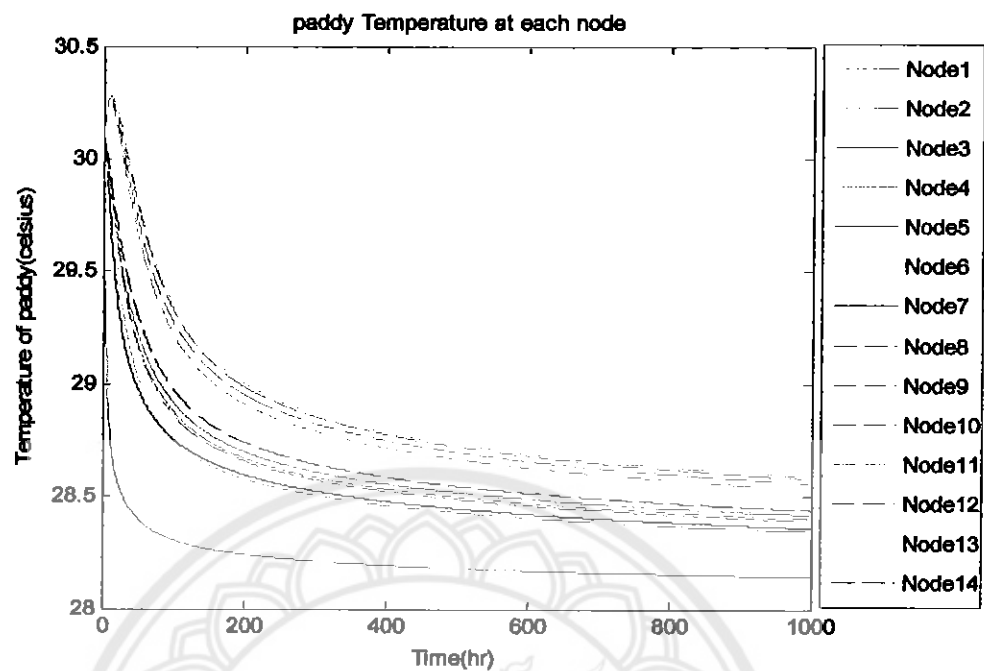


รูปที่ 4.20 แสดงความผันแปรที่ระยะกริดเท่ากับ 0.11308 m ระหว่างเวลาถึงอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนด 1-14 โดยที่ไม่มีการใส่เทอร์โมไพฟอน

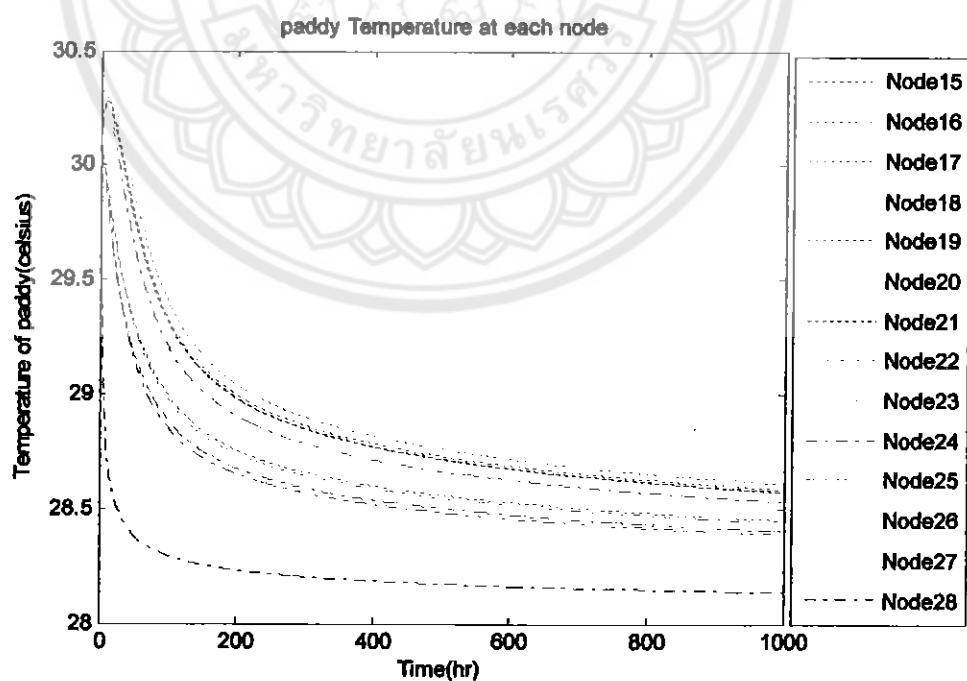


รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ที่ระยะกริดเท่ากับ 0.11308 m ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนด 15-18 โดยที่ไม่มีการใส่เทอร์โมไซฟอน

จากรูปที่ 4.20 และ 4.21 จะเห็นว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่แต่ละ โหนดนั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งสามารถเรียงจาก โหนดที่มีอุณหภูมิสูงสุด ไปสู่ โหนดที่มีอุณหภูมิต่ำสุดได้ดังนี้ คือ โหนดที่ 1, 2, 8, 3, 9, 14, 4, 10, 15, 19, 5, 11, 16, 20, 6, 12, 23, 17, 21, 22, 24, 7, 13, 18, 26, 25, 27, 28 ตามลำดับ โดยโหนดที่มีอุณหภูมิสูงสุด คือ โหนดที่ 1 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ตรงกึ่งกลางของทุกๆ หน้าตัดของถัง และโหนดที่มีอุณหภูมิน้อยที่สุด คือ โหนดที่ 15 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ตรงมุมของทุกๆ หน้าตัดของถัง ส่วนโหนดอื่นๆ จะมีแนวโน้มของอุณหภูมิดังนี้ คือ อุณหภูมิจะต่ำลงเมื่อเข้าใกล้ผนังของถังมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากที่บริเวณผนังของถังจะมีการพาความร้อนเนื่องจากธรรมชาติเกิดขึ้น จึงทำให้ข้าวเปลือกบริเวณใกล้กับผนังถังมีการสูญเสียความร้อนที่ข้าวเปลือกสร้างขึ้นมาให้กับบรรยากาศ และจะเห็นว่าถ้าปราศจากการระบายความร้อนแล้วอุณหภูมิของข้าวเปลือกเมื่อเวลาผ่านไป 1000 ชั่วโมง จะสูงถึง 37-49 องศาเซลเซียส เลขที่เดียว ซึ่งถือว่าข้าวเปลือกที่มีอุณหภูมิสูงถึงขนาดนี้ จะทำให้ข้าวเปลือกเสื่อมคุณภาพลงอย่างรวดเร็ว เพราะการเก็บรักษาข้าวเปลือกให้คงคุณภาพดีนั้น จะต้องรักษาอุณหภูมิให้คงที่ที่ 28-29 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องมีการระบายความร้อนให้กับข้าวเปลือกเพื่อรักษาคุณภาพของข้าวเปลือก



รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ที่ระยะกวิตเท่ากับ 0.11308 m ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนด 1-14โดยที่มีการใส่เทอร์โมไซฟอนทุกโนด



รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ที่ระยะกวิตเท่ากับ 0.11308 m ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกของโนด 15-28โดยที่มีการใส่เทอร์โมไซฟอนทุกโนด

จากรูปที่ 4.22 และ 4.23 จะเห็นว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกเมื่อมีการใส่เทอร์โมไซฟอนที่ทุกๆ โหนด ซึ่งจะได้เทอร์โมไซฟอนทั้งหมดเท่ากับ 169 ท่อ อุณหภูมิของแต่ละโหนดนั้นจะมีความแตกต่างกัน ซึ่งสามารถเรียงจากโหนดที่มีอุณหภูมิสูงสุดไปสู่โหนดที่มีอุณหภูมิต่ำสุดได้ดังนี้ คือ โหนดที่ 16, 11, 17, 10, 21, 15, 20, 12, 9, 24, 19, 14, 23, 5, 4, 6, 18, 22, 3, 13, 8, 26, 25, 7, 2, 27, 1, 28 ตามลำดับโดยความสามารถในการรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่โหนดต่างๆ มีดังนี้ คือ โหนดที่ 1 และ โหนดที่ 28 จะมีอุณหภูมิลดลงทันทีจาก 30 องศาเซลเซียส จนสามารถรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียส ได้ภายในเวลาที่น้อยกว่า 50 ชั่วโมง โหนดที่ 19, 14, 23, 5, 4, 6, 18, 22, 3, 13, 8, 26, 25, 7, 2, 27 ใน 50 ชั่วโมงแรก จะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นแต่ไม่เกิน 30.1 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะมีอุณหภูมิลดต่ำลงเรื่อยๆ และสามารถรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียสได้ภายในเวลาที่ต่ำกว่า 100 ชั่วโมง โหนดที่ 16, 11, 17, 10, 21, 15, 20, 12, 9, 24 ใน 50 ชั่วโมงแรก จะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นแต่ไม่เกิน 30.3 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะมีอุณหภูมิลดต่ำลงเรื่อยๆ และสามารถรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียสได้ภายในเวลา 223 ชั่วโมง ซึ่งข้าวเปลือกที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 29 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิไม่เกิน 31 องศาเซลเซียส จะสามารถเก็บได้นานที่สุด 722.4 ชั่วโมงโดยมีเปอร์เซ็นต์ความงอกลดลงน้อยกว่า 10% ดังนั้นที่ระยะกริต 0.11308 m และมีการใส่เทอร์โมไซฟอนที่ทุกๆ โหนด ซึ่งจะมีเทอร์โมไซฟอนทั้งหมดเท่ากับ 169 ท่อ นั้นสามารถนำมาใช้ระบายความร้อนให้แก่ข้าวเปลือกในระบบนี้ได้ เนื่องจากที่ทุกๆ โหนดสามารถรักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 223 ชั่วโมง ซึ่งน้อยกว่าเวลาของข้าวเปลือกที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 29 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิไม่เกิน 31 องศาเซลเซียส ที่สามารถเก็บได้นานที่สุด 722.4 ชั่วโมง

จากการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่แต่ละกริตข้างต้นสามารถสรุปได้ดังนี้ คือ โดยทั่วไปข้าวเปลือกที่ความชื้น 13.5% และมีอุณหภูมิมากกว่า 29 องศาเซลเซียส แต่ไม่เกิน 31 องศาเซลเซียส จะเก็บได้นาน 4.3 สัปดาห์ หรือคิดเป็น 722.4 ชั่วโมง โดยความงอกลดลงน้อยกว่า 10 % จะเห็นว่าที่ระยะกริตเท่ากับ 0.1696 m และมีการใส่เทอร์โมไซฟอนที่ทุกๆ โหนดซึ่งจะได้จำนวนท่อเทอร์โมไซฟอนทั้งถึงเท่ากับ 81 ท่อ นั้นไม่สามารถรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียส ได้ตลอดทั้งหน้าตัดเมื่อเวลาผ่านไป 1000 ชั่วโมง ที่ระยะกริตเท่ากับ 0.1357 m และมีการใส่เทอร์โมไซฟอนที่ทุกๆ โหนดซึ่งจะได้จำนวนท่อเทอร์โมไซฟอนทั้งถึงเท่ากับ 121 ท่อ สามารถรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียส ได้ตลอดทั้งหน้าตัดเมื่อเวลาผ่านไป 478 ชั่วโมง ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ความงอกของข้าวเปลือกลดลงน้อยกว่า 10% ที่ระยะกริตเท่ากับ 0.1357 m และมีการใส่เทอร์โมไซฟอนที่ทุกๆ โหนดยกเว้น ที่ โหนด 21 ซึ่งจะได้จำนวนท่อเทอร์โมไซฟอนทั้งถึงเท่ากับ 117 ท่อ ยังไม่สามารถรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียส ได้ตลอดทั้งหน้าตัดเมื่อเวลาผ่านไป 1000 ชั่วโมง ส่วนที่

ระยะกริดเท่ากับ 0.11308 m และมีการใส่เทอร์โมไชฟอน 169 ท่อนั้น สามารถรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียส ตลอดทั้งหน้าตัดได้เมื่อเวลาผ่านไป 223 ชั่วโมง ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ความงอกของข้าวเปลือกลดลงน้อยกว่า 10% เช่นกัน แต่ต้องมีการใช้จำนวนเทอร์โมไชฟอนมากกว่าที่ระยะกริด 0.1357 m ซึ่งใช้เพียง 121 ท่อ ซึ่งก็สามารถรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียส ได้ในเวลาที่น้อยกว่า 722.4 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่ข้าวเปลือกที่ความชื้น 13.5% และมีอุณหภูมิมากกว่า 29 องศาเซลเซียส แต่ไม่เกิน 31 องศาเซลเซียส จะเก็บได้นาน 4.3 สัปดาห์ หรือคิดเป็น 722.4 ชั่วโมง โดยความงอกลดลงน้อยกว่า 10% ดังนั้นในการใส่เทอร์โมไชฟอนในถังเก็บข้าวเปลือกที่มีความสูงเท่ากับ 1m และมีหน้าตัดเท่ากับ 1.357×1.357 m ซึ่งบรรจุข้าวเปลือกขนาด 1000 กิโลกรัม จึงสามารถใส่เทอร์โมไชฟอนเพื่อรักษาอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้ต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียส ได้ทั้งหมด 121ท่อ โดยใส่ทุกๆ โหนดที่ระยะกริดเท่ากับ 0.1357 m



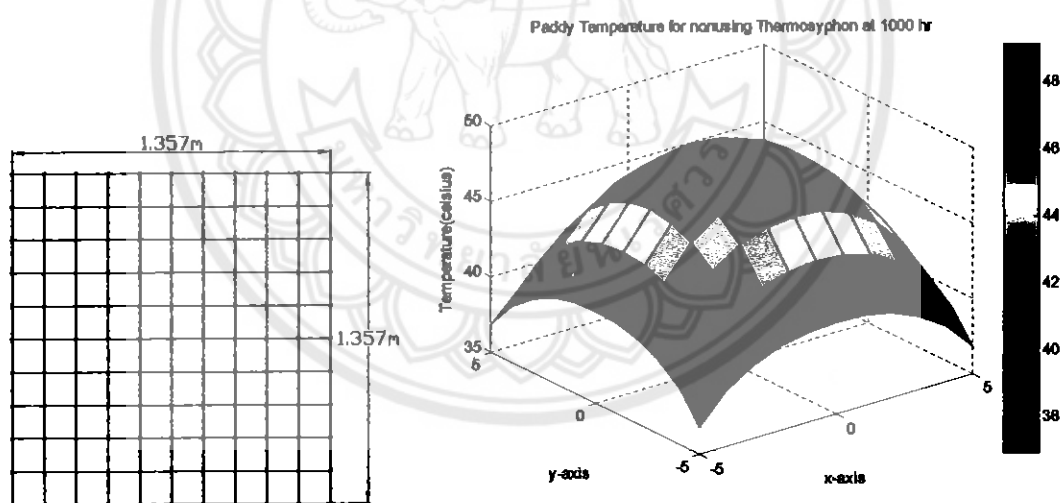
บทที่ 5

บทสรุป

5.1 บทสรุป

จากโปรแกรมแบบจำลองการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังที่ไม่มีเทอร์โมไซฟอนและที่มีเทอร์โมไซฟอนระบายความร้อน ทำให้สามารถทราบลักษณะการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกทั้งที่ไม่มีเทอร์โมไซฟอนและมีเทอร์โมไซฟอน เพื่อหาสมรรถนะทางความร้อนของการระบายความร้อนในข้าวเปลือกโดยเทอร์โมไซฟอนซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

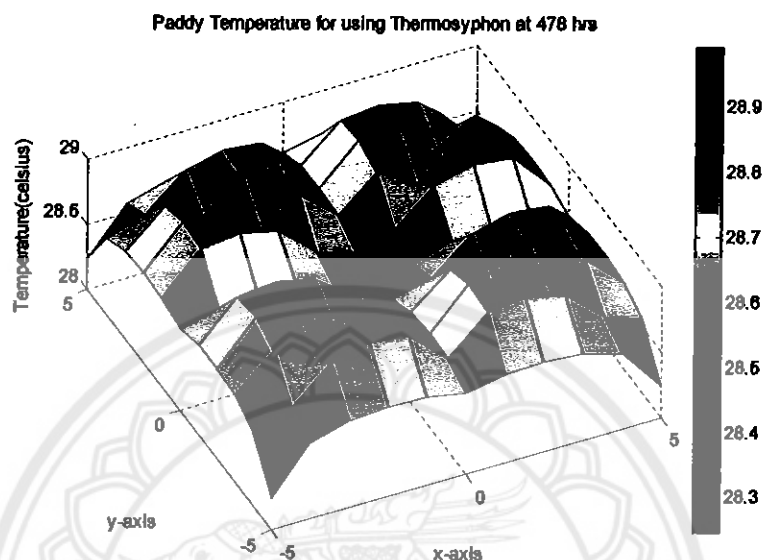
5.1.1 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกมีดังนี้ คือ ที่บริเวณกึ่งกลางของถังทุกๆ หน้าตัดจะมีอุณหภูมิสูงที่สุด ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไป 1000 ชั่วโมง จะมีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 49 องศาเซลเซียส ส่วนที่บริเวณอื่นๆ ของถังอุณหภูมิจะต่ำลงเมื่อเข้าใกล้ผนังของถังมากขึ้น และจะมีอุณหภูมิน้อยที่สุดที่บริเวณมุมล่างของถังทุกๆ หน้าตัด ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไป 1000 ชั่วโมง จะมีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 37 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงพื้นที่หน้าตัดของถังเก็บข้าวเปลือกที่ระยะกริดเท่ากับ 0.1357 m และลักษณะการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกในกรณีที่ไม่มีเทอร์โมไซฟอนที่เวลา 1000 ชั่วโมง

5.1.2 ระบบระบายความร้อนในข้าวเปลือกขนาด 1000 kg ที่บรรจุอยู่ในถังทรงปริมาตรสี่เหลี่ยม สูง 1m และมีพื้นที่หน้าเท่ากับ 1.357×1.357 m ที่ใช้ชุดเทอร์โมไซฟอนแบบท่อเดี่ยว ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 in มีขนาดความยาวส่วนทำระเหยเท่ากับ 1 m และมีความยาวส่วนควมแน่นเท่ากับ 2 m ระบายความร้อนที่มีความเหมาะสมที่สุด จะเกิดขึ้นเมื่อใช้จำนวนท่อ

เทอร์โมไซฟอนเท่ากับ 121 ท่อ โดยแต่ละท่อมีระยะห่างเท่ากับ 0.1357 m ซึ่งจัดเรียงท่อเทอร์โมไซฟอนในทุกๆ โหนดแสดงดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงลักษณะการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกในกรณีที่มีเทอร์โมไซฟอนทุกโหนดที่ระยะกริดเท่ากับ 0.1357 m ที่เวลา 478 ชั่วโมง

5.2 ข้อเสนอแนะ

การพัฒนาโปรแกรมการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังที่ไม่มีเทอร์โมไซฟอน และที่มีเทอร์โมไซฟอนระบายความร้อน คณะผู้จัดทำมีข้อเสนอแนะดังนี้

5.2.1 เนื่องจากโครงการนี้เป็นการหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนจึงอาจจะมีการนำเอาโปรแกรมอื่นนอกจาก MATLAB มาช่วยในการสร้างแบบจำลอง เช่น โปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

5.2.2 เนื่องจากลักษณะของโปรแกรมที่เขียนมีความซับซ้อน ดังนั้นผู้ดำเนินโครงการจะต้องมีความเข้าใจในตัวโปรแกรมอย่างแท้จริง เพื่อที่จะไม่เกิดปัญหาจากการคำนวณที่ผิดพลาด และจะได้ผลที่ตรงตามวัตถุประสงค์

บรรณานุกรม

- [1] ทวิช อุณหิต, ศิธา แสนชนะ, สาคร โพชนอก, (2549), การวิเคราะห์สมรรถนะและผลเชิงเศรษฐศาสตร์ของการระบายความร้อนโดยเทอร์โมไซฟอน, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- [2] Nathawuth Dussadee, Tanongkiat Kiatsiriroat, (2003), Performance analysis and economic evaluation of thermosyphon paddy bulk storage
- [3] Mohammad Izadifar, Oon-Doo Baik, Carey J.Simonson, (2006), Modeling of the packed bed drying of paddy rice using the local volume averaging (LVA) approach
- [4] Heat Pipe – Performance of two-phase Closed Thermosyphon, ESDU, 81038
- [5] Frank P.Incropera, David P.Dewitt, Fundamentals Of Heat and mass Transfer, (FIFTH EDITION)
- [6] มนตรี พิรุณเกษตร, การถ่ายเทความร้อน, ฉบับเตรียมสอบและเสริมประสบการณ์, วิทย์พัฒนา, กรุงเทพฯ:2545
- [7] http://202.44.14/mte_learning/thermal%20Engineering/information1_7.html
- [8] http://www.ricethailand.go.th/rkb/data_007/rice_xx2-07_gattherNew_004.html
- [9] <http://www.doa.go.th/AedWeb/Dryer.html>
- [10] กรมอุตุนิยมวิทยา





ลำดับสัญลักษณ์ในโปรแกรม

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
Do	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของท่อเทอร์โมไซฟอน	m
Di	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเทอร์โมไซฟอน	m
M	มวลข้าวเปลือก	kg
Mw	ปริมาณความชื้นในข้าวเปลือก	-
Le	ความยาวส่วนทำระเหยของท่อเทอร์โมไซฟอน	m
Lc	ความยาวส่วนแน่นของท่อเทอร์โมไซฟอน	m
Kcopper	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของทองแดง	W/m.K
Tbold	อุณหภูมิเริ่มต้นของข้าวเปลือก	องศาเซลเซียส
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	m ² /s
Tair	อุณหภูมิอากาศ	องศาเซลเซียส
F	อัตราการเติมสารทำงาน	-
RH	ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ	-
L	ความสูงของถังข้าวเปลือก	m
K	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของข้าวเปลือก	W/m.K
DeltaY	ระยะกริดในแนวแกนY	m
DeltaX	ระยะกริดในแนวแกนX	m
Nodes	จำนวน โหนดที่วิเคราะห์	Node
Told	อุณหภูมิของข้าวเปลือกในช่วงที่เข้ามา	องศาเซลเซียส
Ts	ตำแหน่งของเทอร์โมไซฟอน	-
Term	ฟังก์ชันของเวลา	-
DML	ความเสียหายเนื่องจากความร้อนบนข้าวเปลือก	-
Xn	ฟังก์ชันในการหาคุณสมบัติของข้าวเปลือก	-
D	ความหนาแน่นของข้าวเปลือก	kg/m ³
Cp	ความจุความร้อนของข้าวเปลือก	J/kg.K
Fo	ฟูเรียร์นัมเบอร์	-
Tave	อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างข้าวเปลือกกับอากาศ	องศาเซลเซียส
B	ฟังก์ชันของอุณหภูมิเฉลี่ย	1/K

ลำดับสัญลักษณ์ในโปรแกรม(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
v	สัมประสิทธิ์ความหนืดเชิงจลน์ของอากาศที่ผนังของถัง	m^2/s
K_{air}	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศที่ผนังของถัง	$W/m.K$
Pr	ความดันวิกฤตของอากาศที่ผนังของถัง	-
Gr	การรบกวนที่ผนังของถัง	-
$FuncPr$	ฟังก์ชันของเพคเลตที่ผนังของถัง	-
Ra	เรย์โนลด์สที่ผนังของถัง	-
Nu	นัสเซิลที่ผนังของถัง	-
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศที่ผนังของถัง	$W/m^2.K$
$Vol1$	ปริมาตรของกริดแบบที่1	m^3
$Vol2$	ปริมาตรของกริดแบบที่2	m^3
$Vol3$	ปริมาตรของกริดแบบที่3	m^3
$Vol4$	ปริมาตรของกริดแบบที่4	m^3
ΔT	ความแตกต่างของอุณหภูมิในข้าวเปลือก	องศาเซลเซียส
Q_{paddy}	ความร้อนของข้าวเปลือก	kW
T_b	อุณหภูมิของข้าวเปลือกในเวลาปัจจุบัน	องศาเซลเซียส
T_{co}	อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างข้าวเปลือกกับอากาศ	องศาเซลเซียส
T_{aveTs}	อุณหภูมิผิวส่วนความแน่นอน	องศาเซลเซียส
BTs	ฟังก์ชันของอุณหภูมิ	$1/K$
v_{Ts}	สัมประสิทธิ์ความหนืดเชิงจลน์ของอากาศที่ท่อเทอร์โมไซฟอน	m^2/s
k_{Ts}	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศที่ท่อเทอร์โมไซฟอน	$W/m.K$
Pr_{Ts}	ความดันวิกฤตของอากาศที่ท่อเทอร์โมไซฟอน	-
Gr_{ITs}	การรบกวนที่ท่อเทอร์โมไซฟอน	-
Ra_{Ts}	เรย์โนลด์สที่ท่อเทอร์โมไซฟอน	-
Nu_{Ts}	นัสเซิลที่ท่อเทอร์โมไซฟอน	-
Si	ฟังก์ชันในการหานัสเซิลที่ท่อเทอร์โมไซฟอน	-
Nu_{Ts}	นัสเซิลที่ท่อเทอร์โมไซฟอน	-
hm_{Ts}	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศที่ท่อเทอร์โมไซฟอน	$W/m^2.K$

ลำดับสัญลักษณ์ในโปรแกรม(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
Qloss	ความร้อนเนื่องจากส่วนควบแน่น	kW
Z2	ความต้านทานความร้อนของผนังท่อเทอร์โมไซฟอนในส่วนทำระเหย	K/W
Z8	ความต้านทานความร้อนของผนังท่อเทอร์โมไซฟอนในส่วนควบแน่น	K/W
Sco	พื้นที่ผิวของท่อเทอร์โมไซฟอนในส่วนควบแน่น	m ²
Z9	ความต้านทานความร้อนที่ผิวของส่วนควบแน่น	K/W
Z	ความต้านทานความร้อนรวม	K/W
Tv	อุณหภูมิไอ	องศาเซลเซียส
vg	ปริมาตรจำเพาะของสารทำงานในสถานะก๊าซ	kg/m ³
Pv	ค่าความดันของสารทำงาน	Pa
denf	ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะของเหลว	kg/m ³
Vi	สัมประสิทธิ์ความหนืดเชิงจลน์ของสารทำงาน	m ² /s
hfg	ความร้อนแฝงของสารทำงาน	J/kg
kf	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารทำงาน	W/m.K
Cpf	ความจุความร้อนของสารทำงาน	kJ/kg.K
deng	ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะก๊าซ	kg/m ³
Pp	ความดันที่แอ่งเดือด	Pa
Tp	อุณหภูมิที่แอ่งเดือด	องศาเซลเซียส
Q1	ความร้อนที่เทอร์โมไซฟอน	kW
Z7	ความต้านทานความร้อนภายในของไหลที่กำลังควบแน่น	K/W
Pa	ความดันบรรยากาศ	Pa
Z3	ความต้านทานความร้อนภายในของไหลที่กำลังเดือด	K/W
Ax	พื้นที่หน้าตัดของส่วนที่เป็นเนื้อทองแดง	m ²
Z10	ความต้านทานความร้อนในแนวแกนตามผนังท่อ	K/W
Zt	ความต้านทานความร้อนรวม	K/W
QTs	ความร้อนที่เทอร์โมไซฟอนระบายออกได้	kW

```

clear

Do = 0.021;
Di = 0.0155;
m = 1000;
Mw = 0.135;
Le = 1;
Lc = 2;
kcopper = 401;
Tbold = 30;
g = 9.81;
Tair = 27.9;
F = 0.5;
RH = 0.73;
L = 1;
k = (0.0637+(0.0958*Mw))/(0.656-(0.475*Mw));
Deltat = 3600;
DeltaY = 0.1357;
DeltaX = 0.1357;
disp('input Number of Nodes');
Nodes = input('Nodes= ');
%Nodes = 21;
i=1:1:Nodes;
Told(i)=Tbold;
%Ts(i) = [1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1];
%Ts(i) = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
%disp(Told);
disp('input 0 for using Ts and input 1 for nonusing Ts');
Ts =input('Ts= ');
%disp(Ts);
for t=1:1:1000
for i=1:1:Nodes;
    if Ts(i)==0
        term = 0.000914*((t/1000)^(0.654))*exp(0.03756*((1.8*30)-28))*exp(33.61*(Mw-0.14));
        DML = 1-exp(-term);
T = [ 25      26      27      28      29      30      31      32      33      34      35      36
37      38      39      40      41      42      43      44      45      46      47      48      49

```

```

50    51    52    53    54    55    56    57    58    59    60    61    62
63    64    65    66    67    68    69    70    ];

X = [ 0.422215213 0.411979803 0.401964105 0.392168116 0.382591839 0.373235272 0.364098415
0.355181269 0.346483834 0.338006109 0.329748095 0.321709791 0.313891198 0.306292315 0.298913143
0.291753681 0.284813930 0.278093890 0.271593560 0.265312941 0.259252032 0.253410834 0.247789347
0.242387569 0.237205503 0.232243147 0.227500502 0.222977567 0.218674343 0.214590829 0.210727026
0.207082933 0.203658551 0.200453880 0.197468919 0.194703669 0.192158129 0.189832300 0.187726181
0.185839773 0.184173075 0.182726088 0.181498812 0.180491246 0.179703391 0.179135246 ];

Xn(i) = interp1(T, X, Told(i));
D(i) = 1.029*(1456+(705*Xn(i)));
Cp(i) = (1180+(3766*Xn(i)));
Fo(i) = (k*DeltaT)/(D(i)*Cp(i)*(DeltaX)^2);
Tave(i) = (Told(i)+Tair)/2;
Temp = [ -173 -123 -73 -23 27 77 127 177 227 277 327 377 427 477 527 577 627 677
727 827 927 1027 1127 1227 1327 1427 1527 1627 1727 1827 1927 2027 2127 2227 2727 ];
vis = [ 2.00 4.426 7.59 11.44 15.89 20.92 26.41 32.39 38.79 45.57 52.69 60.21 68.10 76.37 84.93 93.80
102.9 112.2 121.9 141.8 162.9 185.1 213 240 268 298 329 362 396 431 468 506 547 589 841 ];
ka = [ 9.34 13.8 18.1 22.3 26.3 30.0 33.8 37.3 40.7 43.9 46.9 49.7 52.4 54.9 57.3 59.6 62.0 64.3
66.7 71.5 76.3 82 91 100 106 113 120 128 137 147 160 175 196 222 486 ];
Pra = [ 0.786 0.758 0.737 0.720 0.707 0.700 0.690 0.686 0.684 0.683 0.685 0.690 0.695 0.702 0.709 0.716
0.720 0.723 0.726 0.728 0.728 0.719 0.703 0.685 0.688 0.685 0.683 0.677 0.672 0.667 0.655 0.647 0.630 0.613
0.536 ];
B(i) = 1/(Tave(i)+273.15);
v(i) = interp1(Temp, vis, Tave(i));
kair(i) = interp1(Temp, ka, Tave(i));
Pr(i) = interp1(Temp, Pra, Tave(i));
Gr(i) = (g*B(i)*(Told(i)-Tair)*L^3)/(v(i)^6)^2;
FuncPr(i) = (1+(0.492/(Pr(i)^(9/16))))^(-16/9);
Ra(i) = Gr(i)*Pr(i);
if Ra(i)<10^9
    Nu(i) = 0.68+(0.67*(Ra(i)*FuncPr(i))^(1/4));
else
    Nu(i) = 0.15*(Ra(i)*FuncPr(i))^(1/3);
end
h(i) = (Nu(i)*kair(i)^3)/L;
Bi(i) = (h(i)*DeltaY)/(k);

```

```

Vol1 = (1/2)*(0.1357/2)*(0.1357/2);
Vol2 = (0.1357)*(0.1357/2);
Vol3 = (0.1357/2)*(0.1357/2);
Vol4 = (0.1357)*(0.1357);
DeltaT(i) = (15778*DML*1000)/Cp(i);
if i==1
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol1*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (4*Fo(i)*((Told(i+1)-Told(i))+((2*Qpaddy(i))/k)))+Told(i);
end
if i>1&i<6
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol2*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (Fo(i)*(Told(i-1)+Told(i+1)+(2*Told(i+5))-(4*Told(i))+((2*Qpaddy(i))/k)))+Told(i);
end
if i==6
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol3*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (2*Fo(i)*(Told(i-1)+Told(i+5)-(2*Told(i)))+(Bi(i)*(Tair-Told(i)))+(2*Qpaddy(i)/k)))+Told(i);
end
if i==7
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol2*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (2*Fo(i)*(Told(i+1)+Told(i-5)-(2*Told(i)))+(Qpaddy(i)/k)))+Told(i);
end
if i>7&i<11
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol4*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (Fo(i)*(Told(i-1)+Told(i+1)+Told(i-5)+Told(i+4)-(4*Told(i)))+(Qpaddy(i)/k)))+Told(i);
end
if i==11
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol2*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (Fo(i)*((2*Told(i-1))+Told(i-5)+Told(i+4)-(4*Told(i)))+(2*Bi(i)*(Tair-
Told(i)))+(2*Qpaddy(i)/k)))+Told(i);
end
if i==12
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol2*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (2*Fo(i)*(Told(i+1)+Told(i-4)-(2*Told(i)))+(Qpaddy(i)/k)))+Told(i);
end
if i>12&i<15
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol4*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);

```

```

    Tb(i) = (Fo(i)*(Told(i-1)+Told(i+1)+Told(i-4)+Told(i+3)-(4*Told(i))+(Qpaddy(i)/k)))+Told(i);
end
if i==15
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol2*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (Fo(i)*((2*Told(i-1))+Told(i-4)+Told(i+3)-(4*Told(i)))+(2*Bi(i)*(Tair-
Told(i)))+(2*Qpaddy(i)/k)))+Told(i);
end
if i==16
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol2*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (2*Fo(i)*(Told(i+1)+Told(i-3)-(2*Told(i))+(Qpaddy(i)/k)))+Told(i);
end
if i==17
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol4*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (Fo(i)*(Told(i-1)+Told(i+1)+Told(i-3)+Told(i+2)-(4*Told(i))+(Qpaddy(i)/k)))+Told(i);
end
if i==18
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol2*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (Fo(i)*((2*Told(i-1))+Told(i-3)+Told(i+2)-(4*Told(i)))+(2*Bi(i)*(Tair-
Told(i)))+(2*Qpaddy(i)/k)))+Told(i);
end
if i==19
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol2*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (2*Fo(i)*(Told(i+1)+Told(i-2)-(2*Told(i))+(Qpaddy(i)/k)))+Told(i);
end
if i==20
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol2*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (Fo(i)*((2*Told(i-1))+Told(i-2)+Told(i+1)-(4*Told(i)))+(2*Bi(i)*(Tair-
Told(i)))+(2*Qpaddy(i)/k)))+Told(i);
end
if i==21
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol1*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (4*Fo(i)*(Told(i-1)-Told(i)+(Bi(i)*(Tair-Told(i)))+(2*Qpaddy(i)/k)))+Told(i);
end
else
    term = 0.000914*((t/1000)^(0.654))*exp(0.03756*((1.8*30)-28))*exp(33.61*(Mw-0.14));

```

```

DML = 1-exp(-term);
T = [ 25    26    27    28    29    30    31    32    33    34    35    36
37    38    39    40    41    42    43    44    45    46    47    48    49
50    51    52    53    54    55    56    57    58    59    60    61    62
63    64    65    66    67    68    69    70    ];
X = [ 0.422215213 0.411979803 0.401964105 0.392168116 0.382591839 0.373235272 0.364098415
0.355181269 0.346483834 0.338006109 0.329748095 0.321709791 0.313891198 0.306292315 0.298913143
0.291753681 0.284813930 0.278093890 0.271593560 0.265312941 0.259252032 0.253410834 0.247789347
0.242387569 0.237205503 0.232243147 0.227500502 0.222977567 0.218674343 0.214590829 0.210727026
0.207082933 0.203658551 0.200453880 0.197468919 0.194703669 0.192158129 0.189832300 0.187726181
0.185839773 0.184173075 0.182726088 0.181498812 0.180491246 0.179703391 0.179135246 ];
Xn(i) = interp1(T, X, Told(i));
D(i) = 1.029*(1456+(705*Xn(i)));
Cp(i) = (1180+(3766*Xn(i)));
Fo(i) = (k*DeltaT)/(D(i)*Cp(i)*(DeltaX)^2);
Tave(i) = (Told(i)+Tair)/2;
Temp = [ -173 -123 -73 -23 27 77 127 177 227 277 327 377 427 477 527 577 627 677
727 827 927 1027 1127 1227 1327 1427 1527 1627 1727 1827 1927 2027 2127 2227 2727 ];
vis = [ 2.00 4.426 7.59 11.44 15.89 20.92 26.41 32.39 38.79 45.57 52.69 60.21 68.10 76.37 84.93 93.80
102.9 112.2 121.9 141.8 162.9 185.1 213 240 268 298 329 362 396 431 468 506 547 589 841 ];
ka = [ 9.34 13.8 18.1 22.3 26.3 30.0 33.8 37.3 40.7 43.9 46.9 49.7 52.4 54.9 57.3 59.6 62.0 64.3
66.7 71.5 76.3 82 91 100 106 113 120 128 137 147 160 175 196 222 486 ];
Pra = [ 0.786 0.758 0.737 0.720 0.707 0.700 0.690 0.686 0.684 0.683 0.685 0.690 0.695 0.702 0.709 0.716
0.720 0.723 0.726 0.728 0.728 0.719 0.703 0.685 0.688 0.685 0.683 0.677 0.672 0.667 0.655 0.647 0.630 0.613
0.536 ];
B(i) = 1/(Tave(i)+273.15);
v(i) = interp1(Temp, vis, Tave(i));
kair(i) = interp1(Temp, ka, Tave(i));
Pr(i) = interp1(Temp, Pra, Tave(i));
Gr(i) = (g*B(i)*(Told(i)-Tair)*L^3)/(v(i)^6)^2;
FuncPr(i) = (1+(0.492/(Pr(i)^(9/16))))^(-16/9);
Ra(i) = Gr(i)*Pr(i);
if Ra(i)<10^9
Nu(i) = 0.68+(0.67*(Ra(i)*FuncPr(i))^(1/4));
else
Nu(i) = 0.15*(Ra(i)*FuncPr(i))^(1/3);

```

```

end
h(i) = (Nu(i)*kair(i)^3)/L;
Bi(i) = (h(i)*DeltaY)/(k);
Vol1 = (1/2)*(0.1357/2)*(0.1357/2);
Vol2 = (0.1357)*(0.1357/2);
Vol3 = (0.1357/2)*(0.1357/2);
Vol4 = (0.1357)*(0.1357);
DeltaT(i) = (15778*DML*1000)/Cp(i);

Tco(i) = (Told(i)+Tair)/2;
TaveTs(i) = (Tco(i)+Tair)/2;
Temp = [ -173 -123 -73 -23 27 77 127 177 227 277 327 377 427 477 527 577 627 677
727 827 927 1027 1127 1227 1327 1427 1527 1627 1727 1827 1927 2027 2127 2227 2727 ];
vis = [ 2.00 4.426 7.59 11.44 15.89 20.92 26.41 32.39 38.79 45.57 52.69 60.21 68.10 76.37 84.93 93.80
102.9 112.2 121.9 141.8 162.9 185.1 213 240 268 298 329 362 396 431 468 506 547 589 841 ];
ka = [ 9.34 13.8 18.1 22.3 26.3 30.0 33.8 37.3 40.7 43.9 46.9 49.7 52.4 54.9 57.3 59.6 62.0 64.3
66.7 71.5 76.3 82 91 100 106 113 120 128 137 147 160 175 196 222 486 ];
Pra = [ 0.786 0.758 0.737 0.720 0.707 0.700 0.690 0.686 0.684 0.683 0.685 0.690 0.695 0.702 0.709 0.716
0.720 0.723 0.726 0.728 0.728 0.719 0.703 0.685 0.688 0.685 0.683 0.677 0.672 0.667 0.655 0.647 0.630 0.613
0.536 ];
BTs(i) = 1/(TaveTs(i)+273);
vTs(i) = interp1(Temp, vis, TaveTs(i))*10^-6;
kTs(i) = interp1(Temp, ka, TaveTs(i))*10^-3;
PrTs(i) = interp1(Temp, Pra, TaveTs(i));
Gr1Ts(i) = (g*BTs(i)*(Tco(i)-Tair)*Lc^3)/(vTs(i)^2);
RaTs(i) = Gr1Ts(i)*PrTs(i);
NupTs(i) = (0.825+((0.387*RaTs(i)^(1/6))/((1+((0.492/0.7)^(9/16)))^(8/27))))^2;
si(i) = (Lc/Do)/((RaTs(i))^(1/4));
if si(i)>=0.024
    NucTs(i) = NupTs(i)*(1+(1.3*si(i)^0.9));
else
    NucTs(i) = (NupTs(i)*(1+(1.3*si(i)^0.9)))*0.94;
end
hmTs(i) = (NucTs(i)*kTs(i))/Lc;
Qloss(i) = pi*Do*Lc*hmTs(i)*(Tco(i)-Tair);
Z2 = (log(Do/Di))/(2*pi*Lc*kcopper);

```

```

Z8 = (log(Do/Di))/(2*pi*Lc*kcopper);
Sco = pi*Do*Lc;
Z9(i) = 1/(hmTs(i)*Sco);
Z(i) = Z2+Z8+Z9(i);
Tv(i) = Tair+(((Z8+Z9(i))*(Told(i)-Tair))/Z(i));
Tem = [ 20  22  24  26  28  30  32  34  36  38  40  42  44  46  48  50
52  54  56  58  60  62  64  66  68  70  72  74  76  78  ];
volg = [ 0.03603 0.03388 0.03189 0.03003 0.02829 0.02667 0.02516 0.02374 0.02241 0.02116 0.01999
0.0189 0.01786 0.01689 0.01598 0.01511 0.0143 0.01353 0.0128 0.01212 0.01146 0.01085 0.01026 0.0097
0.00917 0.00867 0.00818 0.00772 0.00728 0.00686 ];
Pv1 = [ 0.57159 0.60777 0.64566 0.68531 0.72676 0.77008 0.8153 0.8625 0.91172 0.9631 1.0165 1.0721
1.1300 1.1901 1.2527 1.3177 1.3852 1.4553 1.528 1.6033 1.6815 1.7625 1.8464 1.9334 2.0234 2.1165
2.213 2.3195 2.4159 2.5227 ];
denf1 = [ 1224.9 1217.5 1210.1 1202.6 1194.9 1187.2 1179.3 1171.3 1163.2 1154.9 1146.5 1137.9
1129.2 1120.3 1111.3 1102 1092.6 1082.9 1073 1062.8 1052.4 1041.7 1030.7 1019.4 1007.7 995.6
983.1 970 956.5 942.3 ];
Visc = [ 225.8 220.8 215.4 210.4 205.5 200.7 196 191.4 186.9 182.5 178.2 174 169.8 165.7
161.7 157.7 153.8 149.9 146.1 142.3 138.6 134.9 131.2 127.5 123.9 120.3 116.7 113.1 109.4
105.8 ];
hfg1 = [ 182.44 180.68 178.88 177.05 175.18 173.29 171.35 169.38 167.37 165.32 163.23 161.09
158.9 156.67 154.39 152.04 149.64 147.17 144.64 142.04 139.37 136.6 133.76 130.81 127.77 124.6
121.31 118.196 114.31 110.55 ];
kfl = [ 84.2 83.3 82.4 81.4 80.5 79.6 78.7 77.7 76.8 75.9 75.5 74.1 73.1 72.2 71.3
70.4 69.5 68.5 67.6 66.7 65.82 64.9 63.9 63 62.1 61.2 60.3 59.3 58.4 57.5 ];
Cpfl = [ 1.404 1.412 1.42 1.429 1.438 1.447 1.457 1.467 1.478 1.489 1.5 1.513 1.525 1.539
1.553 1.569 1.585 1.602 1.621 1.641 1.663 1.686 1.712 1.74 1.772 1.806 1.846 1.89 1.941
2.00 ];
vg(i) = interp1(Tem, volg, Tv(i));
Pv(i) = interp1(Tem, Pv1, Tv(i))*10^6;
denf(i) = interp1(Tem, denf1, Tv(i));
Vi(i) = interp1(Tem, Visc, Tv(i))*10^-6;
hfg(i) = interp1(Tem, hfg1, Tv(i))*10^3;
kf(i) = interp1(Tem, kfl, Tv(i))*10^-3;
Cpf(i) = interp1(Tem, Cpfl, Tv(i))*10^3;
deng(i) = 1/vg(i);
Pp(i) = Pv(i)+(denf(i)*g*F*Lc*sin(pi/2));

```

```

Tp(i) = interp1(Pv1, Tem, Pp(i)*10^-6);
DelTh(i) = ((Tp(i)-Tv(i))/2)*F;
DelT(i) = Told(i)-Tair-DelTh(i);
Q1(i) = DelT(i)/Z(i);
c = 0.235;
Fee2(i) = ((hfg(i)*(kf(i)^3)*denf(i)^2)/(Vi(i)))^(1/4);
Z3f(i) = (c*Q1(i)^(1/3))/(Di^(4/3)*g^(1/3)*Le*Fee2(i)^(4/3));
Ref(i) = (4*Q1(i))/(hfg(i)*Vi(i)*pi*Di);
    if Ref(i) <= 1300
        Z7(i) = (Q1(i)^(1/3)*c)/(Di^(4/3)*g^(1/3)*Le*Fee2(i)^(4/3));
    else
        Z7(i) = ((Q1(i)^(1/3)*c)/(Di^(4/3)*g^(1/3)*Le*Fee2(i)^(4/3)))^191*(Ref(i)^-0.733);
    end
Pa = 1.013*(10^5);
Fee3(i) = ((denf(i)^0.65)*(kf(i)^0.3)*(Cpf(i)^0.7)*(Pv(i)^0.23)*0.32)/((deng(i)^0.25)*(hfg(i)^0.4)*(Vi(i)^0.1)
*(Pa^0.23)));
Z3p(i) = 1/((Fee3(i)*(g^0.2))*(Q1(i)^0.4)*((pi*Di*Le)^0.6));
    if Z3p(i)<Z3f(i)
        Z3(i) = Z3p(i);
    else
        Z3(i) = (Z3p(i)*F) + (Z3f(i)*(1-F));
    end
Ax = pi*((Do^2)-(Di^2))/4;
Z10(i) = ((0.5*Le)+(0.5*Le))/(Ax*kcopper);
    if (Z10(i)/(Z2+Z3(i)+Z7(i)+Z8))>20
        Zt(i) = Z2+Z3(i)+Z7(i)+Z8+Z9(i);
    else
        Zt(i) = ((Z10(i)*(Z2+Z3(i)+Z7(i)+Z8))/(Z10(i)+Z2+Z3(i)+Z7(i)+Z8))+Z9(i);
    end
QTs(i) = DelT(i)/Zt(i);

while abs(QTs(i)-Qloss(i))>0.01
    TaveTs(i) = (Tco(i)+Tair)/2;
Temp = [ -173 -123 -73 -23 27 77 127 177 227 277 327 377 427 477 527 577 627 677
727 827 927 1027 1127 1227 1327 1427 1527 1627 1727 1827 1927 2027 2127 2227 2727 ];

```

```

vis = [ 2.00 4.426 7.59 11.44 15.89 20.92 26.41 32.39 38.79 45.57 52.69 60.21 68.10 76.37 84.93 93.80
102.9 112.2 121.9 141.8 162.9 185.1 213 240 268 298 329 362 396 431 468 506 547 589 841 ];
ka = [ 9.34 13.8 18.1 22.3 26.3 30.0 33.8 37.3 40.7 43.9 46.9 49.7 52.4 54.9 57.3 59.6 62.0 64.3
66.7 71.5 76.3 82 91 100 106 113 120 128 137 147 160 175 196 222 486 ];
Pra = [ 0.786 0.758 0.737 0.720 0.707 0.700 0.690 0.686 0.684 0.683 0.685 0.690 0.695 0.702 0.709 0.716
0.720 0.723 0.726 0.728 0.728 0.719 0.703 0.685 0.688 0.685 0.683 0.677 0.672 0.667 0.655 0.647 0.630 0.613
0.536 ];
BTs(i) = 1/(TaveTs(i)+273);
vTs(i) = interp1(Temp, vis, TaveTs(i))*10^-6;
kTs(i) = interp1(Temp, ka, TaveTs(i))*10^-3;
PrTs(i) = interp1(Temp, Pra, TaveTs(i));
Grl1Ts(i) = (g*BTs(i)*(Tco(i)-Tair)*Lc^3)/(vTs(i)^2);
RaTs(i) = Grl1Ts(i)*PrTs(i);
NupTs(i) = (0.825+((0.387*RaTs(i)^(1/6))/((1+((0.492/0.7)^(9/16)))^(8/27))))^2;
si(i) = (Lc/Do)/((RaTs(i))^(1/4));
if si(i)>=0.024
    NucTs(i) = NupTs(i)*(1+(1.3*si(i)^0.9));
else
    NucTs(i) = (NupTs(i)*(1+(1.3*si(i)^0.9)))*0.94;
end
hmTs(i) = (NucTs(i)*kTs(i))/Lc;
Qloss(i) = pi*Do*Lc*hmTs(i)*(Tco(i)-Tair);
Z2 = (log(Do/Di))/(2*pi*Le*kcopper);
Z8 = (log(Do/Di))/(2*pi*Lc*kcopper);
Sco = pi*Do*Lc;
Z9(i) = 1/(hmTs(i)*Sco);
Z(i) = Z2+Z8+Z9(i);
Tv(i) = Tair+(((Z8+Z9(i))*(Told(i)-Tair))/Z(i));
Tem = [ 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40 42 44 46 48 50
52 54 56 58 60 62 64 66 68 70 72 74 76 78 ];
volg = [ 0.03603 0.03388 0.03189 0.03003 0.02829 0.02667 0.02516 0.02374 0.02241 0.02116 0.01999
0.0189 0.01786 0.01689 0.01598 0.01511 0.0143 0.01353 0.0128 0.01212 0.01146 0.01085 0.01026 0.0097
0.00917 0.00867 0.00818 0.00772 0.00728 0.00686 ];
Pv1 = [ 0.57159 0.60777 0.64566 0.68531 0.72676 0.77008 0.8153 0.8625 0.91172 0.9631 1.0165 1.0721
1.1300 1.1901 1.2527 1.3177 1.3852 1.4553 1.528 1.6033 1.6815 1.7625 1.8464 1.9334 2.0234 2.1165
2.213 2.3195 2.4159 2.5227 ];

```

```

denf1 = [ 1224.9 1217.5 1210.1 1202.6 1194.9 1187.2 1179.3 1171.3 1163.2 1154.9 1146.5 1137.9
1129.2 1120.3 1111.3 1102 1092.6 1082.9 1073 1062.8 1052.4 1041.7 1030.7 1019.4 1007.7 995.6
983.1 970 956.5 942.3 ];
Visc = [ 225.8 220.8 215.4 210.4 205.5 200.7 196 191.4 186.9 182.5 178.2 174 169.8 165.7
161.7 157.7 153.8 149.9 146.1 142.3 138.6 134.9 131.2 127.5 123.9 120.3 116.7 113.1 109.4
105.8 ];
hfg1 = [ 182.44 180.68 178.88 177.05 175.18 173.29 171.35 169.38 167.37 165.32 163.23 161.09
158.9 156.67 154.39 152.04 149.64 147.17 144.64 142.04 139.37 136.6 133.76 130.81 127.77 124.6
121.31 118.196 114.31 110.55 ];
kfl = [ 84.2 83.3 82.4 81.4 80.5 79.6 78.7 77.7 76.8 75.9 75.5 74.1 73.1 72.2 71.3
70.4 69.5 68.5 67.6 66.7 65.82 64.9 63.9 63 62.1 61.2 60.3 59.3 58.4 57.5 ];
Cpfl = [ 1.404 1.412 1.42 1.429 1.438 1.447 1.457 1.467 1.478 1.489 1.5 1.513 1.525 1.539
1.553 1.569 1.585 1.602 1.621 1.641 1.663 1.686 1.712 1.74 1.772 1.806 1.846 1.89 1.941
2.00 ];
vg(i) = interp1(Tem, volg, Tv(i));
Pv(i) = interp1(Tem, Pv1, Tv(i))*10^6;
denf(i) = interp1(Tem, denf1, Tv(i));
Vi(i) = interp1(Tem, Visc, Tv(i))*10^-6;
hfg(i) = interp1(Tem, hfg1, Tv(i))*10^3;
kfl(i) = interp1(Tem, kfl, Tv(i))*10^-3;
Cpfi(i) = interp1(Tem, Cpfl, Tv(i))*10^3;
deng(i) = 1/vg(i);
Pp(i) = Pv(i)+(denf(i)*g*F*Lc*sin(pi/2));
Tp(i) = interp1(Pv1, Tem, Pp(i))*10^-6;
DelTh(i) = ((Tp(i)-Tv(i))/2)*F;
DelT(i) = Told(i)-Tair-DelTh(i);
Q1(i) = DelT(i)/Z(i);
c = 0.235;
Fee2(i) = ((hfg(i)*(kfl(i)^3)*denf(i)^2)/(Vi(i)))^(1/4);
Z3f(i) = (c*Q1(i)^(1/3))/(Di^(4/3)*g^(1/3)*Lc*Fee2(i)^(4/3));
Ref(i) = (4*Q1(i))/(hfg(i)*Vi(i)*pi*Di);
if Ref(i) <= 1300
    Z7(i) = (Q1(i)^(1/3)*c)/(Di^(4/3)*g^(1/3)*Lc*Fee2(i)^(4/3));
else
    Z7(i) = ((Q1(i)^(1/3)*c)/(Di^(4/3)*g^(1/3)*Lc*Fee2(i)^(4/3)))*191*(Ref(i)^-0.733);
end
end

```

```

Pa = 1.013*(10^5);
Fee3(i) = (((denf(i)^0.65)*(kfl(i)^0.3)*(Cpfl(i)^0.7)*(Pv(i)^0.23)*0.32)/((deng(i)^0.25)*(hfg(i)^0.4)*(Vi(i)^0.1)
*(Pa^0.23)));
Z3p(i) = 1/((Fee3(i)*(g^0.2))*(Ql(i)^0.4)*((pi*Di*Le)^0.6));
    if Z3p(i)<Z3f(i)
        Z3(i) = Z3p(i);
    else
        Z3(i) = (Z3p(i)*F) + (Z3f(i)*(1-F));
    end
Ax = pi*((Do^2)-(Di^2))/4;
Z10(i) = ((0.5*Le)+(0.5*Lc))/(Ax*kcopper);
    if (Z10(i)/(Z2+Z3(i)+Z7(i)+Z8))>20
        Zl(i) = Z2+Z3(i)+Z7(i)+Z8+Z9(i);
    else
        Zl(i) = ((Z10(i)*(Z2+Z3(i)+Z7(i)+Z8))/(Z10(i)+Z2+Z3(i)+Z7(i)+Z8))+Z9(i);
    end
    QTs(i) = DelT(i)/Zl(i);
    Tco(i) = Tco(i)+0.01;
end

if i==1
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol1*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (4*Fo(i)*(Told(i+1)-Told(i)+(2*(Qpaddy(i)-QTs(i))/k)))+Told(i);
end
if i>1&i<6
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol2*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (Fo(i)*(Told(i-1)+Told(i+1)+(2*Told(i+5))-(4*Told(i)))+(2*(Qpaddy(i)-QTs(i))/k)))+Told(i);
end
if i==6
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol2*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (2*Fo(i)*(Told(i-1)+Told(i+5)-(2*Told(i)))+(Bi(i)*(Tair-Told(i)))+(2*(Qpaddy(i)-
QTs(i))/k)))+Told(i);
end
if i==7
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol2*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (2*Fo(i)*(Told(i+1)+Told(i-5)-(2*Told(i)))+(Qpaddy(i)-QTs(i))/k)))+Told(i);

```

```

end
if i>7&i<11
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol4*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (Fo(i)*(Told(i-1)+Told(i+1)+Told(i-5)+Told(i+4)-(4*Told(i))+((Qpaddy(i)-QTs(i))/k)))+Told(i);
end
if i==11
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol2*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (Fo(i)*((2*Told(i-1))+Told(i-5)+Told(i+4)-(4*Told(i)))+(2*Bi(i)*(Tair-Told(i)))+(2*(Qpaddy(i)-
    QTs(i))/k)))+Told(i);
end
if i==12
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol2*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (2*Fo(i)*(Told(i+1)+Told(i-4)-(2*Told(i))+((Qpaddy(i)-QTs(i))/k)))+Told(i);
end
if i>12&i<15
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol4*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (Fo(i)*(Told(i-1)+Told(i+1)+Told(i-4)+Told(i+3)-(4*Told(i))+((Qpaddy(i)-QTs(i))/k)))+Told(i);
end
if i==15
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol2*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (Fo(i)*((2*Told(i-1))+Told(i-4)+Told(i+3)-(4*Told(i)))+(2*Bi(i)*(Tair-Told(i)))+(2*(Qpaddy(i)-
    QTs(i))/k)))+Told(i);
end
if i==16
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol2*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (2*Fo(i)*(Told(i+1)+Told(i-3)-(2*Told(i))+((Qpaddy(i)-QTs(i))/k)))+Told(i);
end
if i==17
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol4*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (Fo(i)*(Told(i-1)+Told(i+1)+Told(i-3)+Told(i+2)-(4*Told(i))+((Qpaddy(i)-QTs(i))/k)))+Told(i);
end
if i==18
    Qpaddy(i) = (D(i)*Vol2*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);
    Tb(i) = (Fo(i)*((2*Told(i-1))+Told(i-3)+Told(i+2)-(4*Told(i)))+(2*Bi(i)*(Tair-Told(i)))+(2*(Qpaddy(i)-
    QTs(i))/k)))+Told(i);
end

```

if i==19

$$Qpaddy(i) = (D(i)*Vol2*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);$$

$$Tb(i) = (2*Fo(i)*(Told(i+1)+Told(i-2)-(2*Told(i))+((Qpaddy(i)-QTs(i))/k)))+Told(i);$$

end

if i==20

$$Qpaddy(i) = (D(i)*Vol2*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);$$

$$Tb(i) = (Fo(i)*((2*Told(i-1))+Told(i-2)+Told(i+1)-(4*Told(i)))+(2*Bi(i)*(Tair-Told(i)))+(2*(Qpaddy(i)-QTs(i))/k)))+Told(i);$$

end

if i==21

$$Qpaddy(i) = (D(i)*Vol1*Cp(i)*DeltaT(i))/(t*3600);$$

$$Tb(i) = (4*Fo(i)*(Told(i-1)-Told(i)+(Bi(i)*(Tair-Told(i)))+(2*(Qpaddy(i)-QTs(i))/k)))+Told(i);$$

end

end

$$Told(i)=Tb(i);$$

$$Node1(t)=Told(1);$$

$$Node2(t)=Told(2);$$

$$Node3(t)=Told(3);$$

$$Node4(t)=Told(4);$$

$$Node5(t)=Told(5);$$

$$Node6(t)=Told(6);$$

$$Node7(t)=Told(7);$$

$$Node8(t)=Told(8);$$

$$Node9(t)=Told(9);$$

$$Node10(t)=Told(10);$$

$$Node11(t)=Told(11);$$

$$Node12(t)=Told(12);$$

$$Node13(t)=Told(13);$$

$$Node14(t)=Told(14);$$

$$Node15(t)=Told(15);$$

$$Node16(t)=Told(16);$$

$$Node17(t)=Told(17);$$

$$Node18(t)=Told(18);$$

$$Node19(t)=Told(19);$$

$$Node20(t)=Told(20);$$

$$Node21(t)=Told(21);$$

```

    x(i)=t;
end
disp(Tb);
disp(t);
%plot(x,Node1,'-b',x,Node2,'-g',x,Node3,'-r',x,Node4,'-c',x,Node5,'-m',x,Node6,'-y',x,Node7,'-k',x,Node8,'--
b',x,Node9,'--g',x,Node10,'--r',x,Node11,'--c');
plot(x,Node12,'--m',x,Node13,'--y',x,Node14,'--
k',x,Node15,'b',x,Node16,'g',x,Node17,'r',x,Node18,'c',x,Node19,'m',x,Node20,'y',x,Node21,'k');
xlabel('Time(hr)')
ylabel('Temperature of paddy(celsius)')
title('Temperature of paddy each node')
%legend('Node1','Node2','Node3','Node4','Node5','Node6','Node7','Node8','Node9','Node10','Node11');
legend('Node12','Node13','Node14','Node15','Node16','Node17','Node18','Node19','Node20','Node21')
end

```



```

clear
[X Y] = meshgrid([-5:1:5],[-5:1:5]);
Z = [36.8182 38.7016 39.8889 40.5964 40.9663 41.0795 40.9663 40.5964 39.8889 38.7016 36.8182
38.7016 41.2158 42.8386 43.8209 44.3392 44.4986 44.3392 43.8209 42.8386 41.2158 38.7016
39.8889 42.8386 44.7730 45.9579 46.5881 46.7826 46.5881 45.9579 44.7730 42.8386 39.8889
40.5964 43.8209 45.9579 47.2778 47.9838 48.2021 47.9838 47.2778 45.9579 43.8209 40.5964
40.9663 44.3392 46.5881 47.9838 48.7327 48.9647 48.7327 47.9838 46.5881 44.3392 40.9663
41.0795 44.4986 46.7826 48.2021 48.9647 49.2021 48.9647 48.2021 46.7826 44.4986 41.0795
40.9663 44.3392 46.5881 47.9838 48.7327 48.9647 48.7327 47.9838 46.5881 44.3392 40.9663
40.5964 43.8209 45.9579 47.2778 47.9838 48.2021 47.9838 47.2778 45.9579 43.8209 40.5964
39.8889 42.8386 44.7730 45.9579 46.5881 46.7826 46.5881 45.9579 44.7730 42.8386 39.8889
38.7016 41.2158 42.8386 43.8209 44.3392 44.4986 44.3392 43.8209 42.8386 41.2158 38.7016
36.8182 38.7016 39.8889 40.5964 40.9663 41.0795 40.9663 40.5964 39.8889 38.7016 36.8182];
surf(X,Y,Z);
xlabel('x-axis');
ylabel('y-axis');
zlabel('Temperature(celsius)');
title('Temperature of paddy nonusing Thermosyphon at 1000 hr');
colorbar;

```

```

clear
[X Y] = meshgrid([-5:1:5],[-5:1:5]);
Z = [28.2415 28.5787 28.6665 28.6880 28.6786 28.6198 28.6787 28.6880 28.6665 28.5787 28.2415
28.5785 28.6727 28.9271 28.9954 28.9674 28.6998 28.9674 28.9954 28.9271 28.6727 28.5787
28.6665 28.9271 28.7566 28.9868 28.9995 28.7116 28.9995 28.9868 28.7566 28.9271 28.665
28.6880 28.9954 28.9868 28.7576 28.9320 28.6896 28.9320 28.7576 28.9868 28.9954 28.6880
28.6787 28.9674 28.9995 28.9320 28.6781 28.5986 28.6781 28.9320 28.9995 28.9674 28.6787
28.6198 28.6998 28.7116 28.6896 28.5986 28.2508 28.5986 28.6896 28.7116 28.6998 28.6198
28.6787 28.9674 28.9995 28.9320 28.6781 28.5986 28.6781 28.9320 28.9995 28.9674 28.6787
28.6880 28.9954 28.9868 28.7576 28.9320 28.6896 28.9320 28.7576 28.9868 28.9954 28.6880
28.6665 28.9271 28.7566 28.9868 28.9995 28.7116 28.9995 28.9868 28.7566 28.9271 28.665
28.5785 28.6727 28.9271 28.9954 28.9674 28.6998 28.9674 28.9954 28.9271 28.6727 28.5787
28.2415 28.5787 28.6665 28.6880 28.6786 28.6198 28.6787 28.6880 28.6665 28.5787 28.2415];
surf(X,Y,Z);
xlabel('x-axis');
ylabel('y-axis');
zlabel('Temperature(celsius)');
title('Temperature of paddy nonusing Thermosyphon at 1000 hr');
colorbar;

```



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



ตารางที่ ก.1 แสดงระยะเวลาที่ปลอดภัยในการเก็บรักษาข้าวเปลือก ที่ความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ

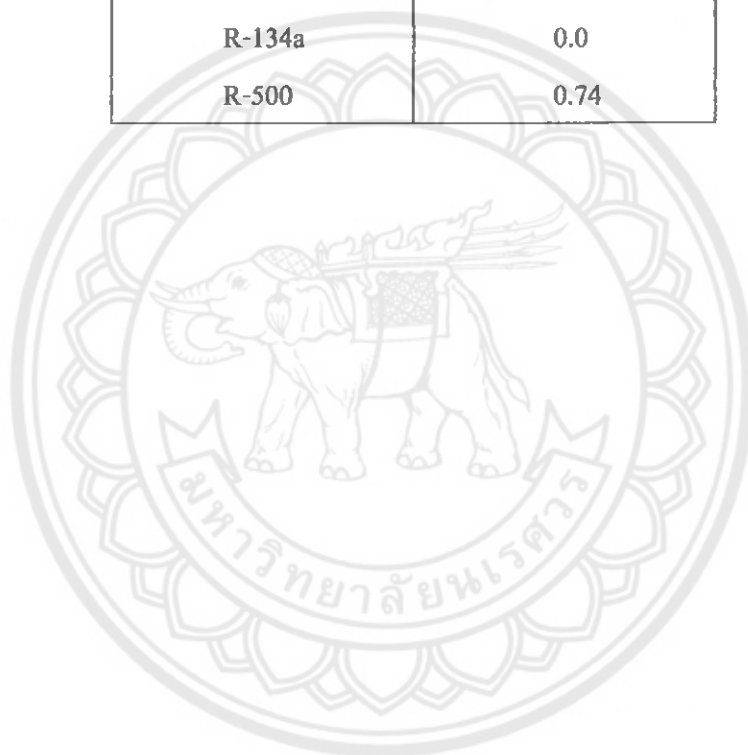
อุณหภูมิเก็บรักษา (°ซ.)								
ความ ชื้น (%)	0	5	10	15	20	25	30	35
6	162	73	33	15	7	3	1	31
8	78	35	16	7	3	1	34	15
10	38	17 ปี	18	3	2	36	16	7
12	18	8	4	2	38	17	8	3
14	9	4	2	40	18	8	4	1
16	4	2	43	19	9	4	2	-
18	2	46	21	9	4	2	1	-
20	49	24	10	5	2	1	-	-

ตารางที่ ก.2 ผลของความชื้นข้าวเปลือกต่อคุณภาพการสีข้าว

คุณภาพการสีข้าว		
ความชื้น (%)	ข้าวสาร (%)	ข้าวหัก (%)
19.0	56.62	12.25
18.0	57.92	12.05
15.5	59.12	9.75
14.0	61.67	6.08
13.0	61.40	6.25
12.0	61.10	6.42
10.0	60.27	7.72

ตารางที่ ค.3 แสดงปริมาณการทำลายชั้นบรรยากาศของสารทำงานต่างๆ

Refrigerants	ODP
R-11	1.0
R-12	1.0
R-22	0.05
R-113	0.8
R-114	1.0
R-123	0.02
R-134a	0.0
R-500	0.74



ตารางที่ ก.4 แสดงขนาดของท่อทองแดง

ท่อ	Do(m)	Di(m)
$\frac{1}{8}"$	0.0103	0.0072
$\frac{1}{4}"$	0.0137	0.00948
$\frac{3}{8}"$	0.017	0.0124
$\frac{1}{2}"$	0.021	0.0155
$\frac{3}{4}"$	0.02667	0.0202
1"	0.03334	0.02695
1 $\frac{1}{4}"$	0.0422	0.0347
1 $\frac{1}{2}"$	0.0483	0.04068
2"	0.0603	0.0523
2 $\frac{1}{2}"$	0.07303	0.0635
3"	0.0889	0.0777

ประวัติผู้ทำโครงการ

ชื่อ : นาย มนัส ค้างท้วม

วัน เดือน ปีเกิด : วันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ.2528

ภูมิลำเนา : บ้านเลขที่ 19/1 หมู่ 8 ต.ทุ่งขี้ อ.ลับแล จ.อุตรดิตถ์

ประวัติการศึกษา : ระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนไทยรัฐวิทยา
: ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนไทยรัฐวิทยา
: ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนลับแลพิทยาคม
: ปัจจุบันศึกษาที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก

ชื่อ : นาย วันจักร เรืองสกุล
วัน เดือน ปีเกิด : วันที่ 6 เมษายน พ.ศ.2528
ภูมิลำเนา : บ้านเลขที่ 8 ต.หล่มสัก อ.หล่มสัก จ.เพชรบูรณ์
ประวัติการศึกษา : ระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนอนุบาลหล่มสัก
: ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนหล่มสักวิทยาคม
: ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนหล่มสักวิทยาคม
: ปัจจุบันศึกษาที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก

ชื่อ : นาย ธนานันต์ เพชรสัมฤทธิ์
วัน เดือน ปีเกิด : วันที่ 27 มกราคม พ.ศ.2528
ภูมิลำเนา : บ้านเลขที่ 234/184 หมู่ 10 ต.นครสวรรค์ตก อ.เมือง จ.นครสวรรค์
ประวัติการศึกษา : ระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนปรีชาโชติ
: ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนจันทนเศรษฐ์
: ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนนครสวรรค์
: ปัจจุบันศึกษาที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก