ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
250039

การรวบรวมความร้อนจากถังเก็บน้ำแข็งเพื่อการปรับอากาศร้อนแบบสัมพัทธ์

สุวชัย ชุมนุมจันทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
กรกฎาคม 2555
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

600254812

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
250039

การระบายความร้อนถังเก็บข้าวเปลือกด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

ศุภชัย ชุมนุมวัฒน์

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
กรกฎาคม 2555
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ เรื่อง “การระบายความร้อนถังเก็บข้าวเปลือกด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ” ของ นายศุภชัย ชุมนุมวัฒน์ เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยนเรศวร

.....ประธาน
(ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐมศก วิไลพล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พฤทธ์ สกุลช่างสัจจะทัย)

อนุมัติ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คนึงนิจ ภู่พัฒน์วิบูลย์)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
3 กรกฎาคม 2555

ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดีจากบุคคลหลายท่าน ผู้ทำวิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์ ซึ่งเป็นประธานที่ปรึกษาและควบคุมงานวิจัยนี้พร้อมทั้งให้แนวคิดและคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัยตลอดจนแก้ไขปัญหาต่างๆ และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พฤทธ์ สกุลช่างสัจจะทัย อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐมศก วิไลพล และ ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่กรุณาสละเวลามาร่วมสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ ครูช่าง วาฤทธิ์ ภมร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ซึ่งผู้ทำการวิจัยวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง รวมทั้งขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบคุณ รุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้อง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้ความช่วยเหลือต่างๆเป็นอย่างดี ท้ายสุดนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ส่งเสริมสนับสนุนการศึกษาและให้กำลังใจอย่างดีมาโดยตลอด

ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของท่านดังกล่าวข้างต้น ผู้ทำวิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ศุภชัย ชุมนุมวัฒน์

ชื่อเรื่อง การระบายความร้อนถังเก็บข้าวเปลือกด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ
ผู้วิจัย ศุภชัย ชุมนุมวัฒน์
ประธานที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์
กรรมการที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐมศก วิไลพล
ประเภทสารนิพนธ์ วิทยานิพนธ์ วศ.ม. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2555
คำสำคัญ การเก็บรักษาข้าวเปลือก ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ
การกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือก

บทคัดย่อ

250039

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการระบายความร้อนถังเก็บข้าวเปลือกด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบและพัฒนาแบบจำลองของการกระจายอุณหภูมิในถังเก็บข้าวเปลือกสำหรับข้าวเปลือก 500 กิโลกรัมที่ความชื้น 26 % และ 14 % มาตรฐานเปียก โดยเก็บรักษาไว้ในถังเก็บข้าวเปลือกทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 เมตร สูง 0.65 เมตร ซึ่งจะใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบในการระบายความร้อนที่ทำมาจากท่อคาปิลลารีทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและนอกเท่ากับ 0.0014 และ 0.0022 เมตร ตามลำดับ โดยบรรจุสารทำงาน R134a ปริมาณ 50 % ของปริมาตรภายในทั้งหมดของท่อและมีการเรียงตัวของท่อในลักษณะเป็นวงกระจายทั้งถังเก็บ โดยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบจะมีส่วนทำระเหยอยู่ในข้าวเปลือกและส่วนควบแน่นจะอยู่สูงขึ้นไปเพื่อระบายความร้อนที่เกิดขึ้นโดยอากาศแวดล้อมและมีความยาวเท่ากับ 0.65 และ 0.25 เมตร ตามลำดับ สำหรับการคำนวณการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกจะพิจารณาเป็นลักษณะการถ่ายเทความร้อน 2 มิติที่ขึ้นอยู่กับเวลา (r, z, t) โดยจะนำผลของการกระจายอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับแบบจำลอง ซึ่งจากการศึกษาพบว่าแบบจำลองสามารถทำนายการกระจายอุณหภูมิได้ทั้งการเก็บรักษาข้าวเปลือกแบบที่ไม่มีการระบายความร้อนและแบบที่มีการระบายความร้อน ที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก มีความคลาดเคลื่อนมาตรฐานระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองเท่ากับ 0.10 – 0.67 องศาเซลเซียส และ 0.27 – 0.76 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สำหรับความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก มีความคลาดเคลื่อนมาตรฐานระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองเท่ากับ 1.42 – 3.24 องศาเซลเซียส และ 1.05 – 3.76 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพของระบบการระบายความร้อนด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบเท่ากับ 54 %

Title	PADDY BULK STORAGE COOLING WITH CLOSE LOOP OSCILLATING HEAT PIPES
Author	Suppachai Chumnumwat
Advisor	Assistant professor Piyanun Charoensawan, Ph.D.
Co - Advisor	Associate professor Patomsok Wilaipon, Ph.D.
Academic Paper	Thesis M.Eng in Mechanical Engineering, Naresuan University, 2012
Keywords	Paddy storage, Closed-loop oscillating heat pipe, Temperature distribution of paddy

ABSTRACT

250039

This research aims to study about paddy bulk storage cooling with Closed Loop Oscillating Heat Pipes (CLOHP) and developed the model of temperature distribution in the storage bin for 500 kg paddy and moisture contents of paddy were 26 and 14 % wet basis. The paddy was kept in the cylindrical bin with 1.4 m diameter and 0.65 m high and cooled by CLOHPs. CLOHPs were made of copper capillary tubes with 0.0014 m inside diameter and 2.2 m outside diameter and filled with R134a at 50 % of the total internal tube volume. CLOHPs were arranged in a circular form within the storage bin. The evaporator section was buried in the storage bin with 0.65 m and the condenser section was exposed to the ambient air in order to remove the respiration heat of paddy with 0.25 m. For the temperature distribution inside paddy bulk was numerical analyzed as the two-dimensional transient heat transfer in cylindrical coordinates (r, z, t). The temperature distributions within paddy bulk were experimental investigated by compared with the simulation results. It was found from the simulation results that the simulation model could well predict the temperature distribution in storage bin with and without CLOHPs. For the moisture content of paddy was 26 % wet basis, the standard error were 1.05 – 3.76 $^{\circ}$C and 1.42 – 3.24 $^{\circ}$C respectively. And the thermal efficiency of tested CLOHPs for cooling 500 kg paddy was about 54 %.

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	**บทนำ**	1
	ความเป็นมาของปัญหา	1
	จุดมุ่งหมายของการศึกษา	5
	ขอบเขตของงานวิจัย	5
	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
2	**เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**	6
	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	6
	วิธีการเก็บรักษาข้าวเปลือก	6
	ลักษณะของท่อความร้อนและท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	9
	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	14
	ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน	14
	การถ่ายเทความร้อนใน 2 มิติ	15
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
	รูปแบบของการเก็บรักษาข้าวเปลือก	18
	ลักษณะแบบจำลองของการกระจายอุณหภูมิภายในถังเก็บข้าวเปลือก	21
	ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	24
	การประยุกต์ใช้งานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	29
3	**วิธีดำเนินการวิจัย**	32
	แบบจำลองการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บข้าวเปลือก	32
	การทดลองลักษณะการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกภายในถังเก็บข้าวเปลือก	35
	เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	38
	การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัด	39

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
4	**ผลการวิจัย**.....	43
	ผลที่ได้จากการทดลอง.....	43
	การเก็บรักษาข้าวเปลือกในถังเก็บข้าวเปลือกโดยไม่มีการระบายความร้อนที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก.....	43
	การเก็บรักษาข้าวเปลือกในถังเก็บข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก.....	47
	การเก็บรักษาข้าวเปลือกในถังเก็บข้าวเปลือกโดยไม่มีการระบายความร้อนที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก.....	51
	การเก็บรักษาข้าวเปลือกในถังเก็บข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก.....	54
	ผลการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิข้าวเปลือกจากการทดลองและแบบจำลอง.....	59
	การเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองของการเก็บรักษาข้าวเปลือกแบบที่ไม่มีการระบายความร้อนที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก....	60
	การเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองของการเก็บรักษาข้าวเปลือกแบบที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก.....	62
	การเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองของการเก็บรักษาข้าวเปลือกแบบที่ไม่มีการระบายความร้อนที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก....	64

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	การเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองของการเก็บรักษาข้าวเปลือกแบบที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก	66
	ผลการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกภายในถังเก็บข้าวเปลือกจากแบบจำลอง	68
5	**บทสรุป**	71
	สรุปผลการวิจัย	71
	ข้อเสนอแนะ	72
บรรณานุกรม		73
ภาคผนวก		78
ประวัติผู้วิจัย		90

สารบัญตาราง

ตาราง **หน้า**

1 แสดงระยะเวลาที่ปลอดภัย (สัปดาห์) ในการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ความชื้นข้าวเปลือกและอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่างๆ..... 2

2 แสดงค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือก 33

3 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกภายในถังเก็บข้าวเปลือกจากแบบจำลองที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก..... 69

4 แสดงสมบัติของ R134a ที่สถานะของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัว..... 79

5 ประสิทธิภาพของระบบการระบายความร้อนด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก..... 87

6 ประสิทธิภาพของระบบการระบายความร้อนด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก..... 88

7 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองของอุณหภูมิข้าวเปลือก..... 89

สารบัญภาพ

ภาพ		หน้า
1	ชุดท่อเทอร์โมไซฟอนในการระบายความร้อนออกจากถังเก็บข้าวเปลือก.....	3
2	การเปรียบเทียบอุณหภูมิข้าวเปลือกโดยใช้และไม่ใช้ท่อเทอร์โมไซฟอน.....	4
3	การเก็บข้าวเปลือกโดยที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ.....	6
4	การเก็บข้าวเปลือกในสภาพที่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ.....	7
5	การเก็บข้าวเปลือกในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว.....	7
6	การเก็บข้าวเปลือกในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ.....	8
7	ส่วนประกอบภายในของท่อความร้อนแบบมีวัสดุพรุน.....	10
8	ลักษณะของท่อความร้อนธรรมดา.....	10
9	ท่อความร้อนแบบสั่น.....	12
10	ประเภทของท่อความร้อนแบบสั่น.....	13
11	ชุดทดลองการชะลอการเสียหายของข้าวเปลือกชื้นโดยการระบายอากาศ.....	19
12	ลักษณะของถังเก็บและการแบ่งระยะในแนวระดับและรัศมี.....	22
13	ตำแหน่งของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิภายในถังทรงกระบอก.....	23
14	อุณหภูมิของข้าวเปลือกระหว่างแบบจำลองและผลที่ได้จากการทดลอง.....	23
15	รูปแบบท่อความร้อนแบบสั่น.....	24
16	ชุดทดลองสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ.....	26
17	ตำแหน่งขอบเขตของการคำนวณอุณหภูมิของข้าวเปลือกในแบบจำลองการกระจายอุณหภูมิ.....	33
18	ขั้นตอนการคำนวณอุณหภูมิภายในถังเก็บข้าวเปลือกของแบบจำลองการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือก.....	35
19	ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ.....	36
20	ลักษณะชุดท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ.....	36
21	การติดตั้งชุดท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบภายในถังเก็บข้าวเปลือก.....	37
22	ลักษณะโดยรวมของการติดตั้งชุดทดลองแบบที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	37

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
23	เครื่องบันทึกข้อมูล Agilent 34972A	38
24	สายเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K แบบหุ้มฉนวน	39
25	เครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือก Morita MS-3L	39
26	ตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิของข้าวเปลือกภายในถังเก็บข้าวเปลือก	40
27	ตำแหน่งการติดตั้งและระยะห่างของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	41
28	ตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นบนท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	41
29	การติดตั้งอุปกรณ์ทดลองของการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ไม่มีการระบายความร้อน	42
30	อุณหภูมิข้าวเปลือก ณ ตำแหน่ง 101 ถึง 105 และอากาศแวดล้อมที่ไม่มีการระบายความร้อนที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก	45
31	อุณหภูมิข้าวเปลือก ณ ตำแหน่ง 108 ถึง 112 และอากาศแวดล้อมที่ไม่มีการระบายความร้อนที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก	45
32	อุณหภูมิข้าวเปลือก ณ ตำแหน่ง 115 ถึง 119 และอากาศแวดล้อมที่ไม่มีการระบายความร้อนที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก	45
33	อุณหภูมิข้าวเปลือก ณ ตำแหน่ง 104, 111 และ 118 ที่ไม่มีการระบายความร้อนที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก	46
34	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชื้นข้าวเปลือกภายในถังเก็บข้าวเปลือกที่ไม่มีการระบายความร้อนที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก	46
35	อุณหภูมิข้าวเปลือก ณ ตำแหน่ง 101 ถึง 105 และอากาศแวดล้อมที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก	49
36	อุณหภูมิข้าวเปลือก ณ ตำแหน่ง 108 ถึง 112 และอากาศแวดล้อมที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ **หน้า**

37 อุณหภูมิข้าวเปลือก ณ ตำแหน่ง 115 ถึง 119 และอากาศแวดล้อมที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก..... 50

38 อุณหภูมิข้าวเปลือก ณ ตำแหน่ง 104, 111 และ 118 ที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก..... 50

39 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชื้นข้าวเปลือกภายในถังเก็บข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก..... 51

40 อุณหภูมิข้าวเปลือก ณ ตำแหน่ง 101 ถึง 105 และอากาศแวดล้อมที่ไม่มีการระบายความร้อนที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก..... 53

41 อุณหภูมิข้าวเปลือก ณ ตำแหน่ง 108 ถึง 112 และอากาศแวดล้อมที่ไม่มีการระบายความร้อนที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก..... 53

42 อุณหภูมิข้าวเปลือก ณ ตำแหน่ง 115 ถึง 119 และอากาศแวดล้อมที่ไม่มีการระบายความร้อนที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก..... 53

43 อุณหภูมิข้าวเปลือก ณ ตำแหน่ง 104, 111 และ 118 ที่ไม่มีการระบายความร้อนที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก..... 54

44 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชื้นข้าวเปลือกภายในถังเก็บข้าวเปลือกที่ไม่มีการระบายความร้อนที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก..... 54

45 อุณหภูมิข้าวเปลือก ณ ตำแหน่ง 101 ถึง 105 และอากาศแวดล้อมที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก..... 56

46 อุณหภูมิข้าวเปลือก ณ ตำแหน่ง 108 ถึง 112 และอากาศแวดล้อมที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก..... 57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ **หน้า**

47 อุณหภูมิข้าวเปลือก ณ ตำแหน่ง 115 ถึง 119 และอากาศแวดล้อมที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก..... 57

48 อุณหภูมิข้าวเปลือก ณ ตำแหน่ง 104, 111 และ 118 ที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก..... 58

49 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชื้นข้าวเปลือกภายในถังเก็บข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก..... 58

50 ตำแหน่งที่เลือกพิจารณาของอุณหภูมิข้าวเปลือกในถังเก็บข้าวเปลือก..... 59

51 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ตำแหน่ง 104 ระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองที่ไม่มีการระบายความร้อนที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก..... 60

52 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ตำแหน่ง 110 ระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองที่ไม่มีการระบายความร้อนที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก..... 60

53 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ตำแหน่ง 111 ระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองที่ไม่มีการระบายความร้อนที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก..... 61

54 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ตำแหน่ง 117 ระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองที่ไม่มีการระบายความร้อนที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก..... 61

55 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ตำแหน่ง 104 ระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก..... 62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
56	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ตำแหน่ง 110 ระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก.....	62
57	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ตำแหน่ง 111 ระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก.....	63
58	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ตำแหน่ง 117 ระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ความชื้นข้าวเปลือก 26 % มาตรฐานเปียก.....	63
59	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ตำแหน่ง 104 ระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองที่ไม่มีการระบายความร้อนที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก.....	64
60	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ตำแหน่ง 110 ระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองที่ไม่มีการระบายความร้อนที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก.....	64
61	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ตำแหน่ง 111 ระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองที่ไม่มีการระบายความร้อนที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก.....	65
62	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ตำแหน่ง 117 ระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองที่ไม่มีการระบายความร้อนที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก.....	65
63	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ตำแหน่ง 104 ระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก.....	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ **หน้า**

64 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ตำแหน่ง 110 ระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก..... 66

65 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ตำแหน่ง 111 ระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก..... 67

66 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ตำแหน่ง 117 ระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองที่มีการระบายความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ความชื้นข้าวเปลือก 14 % มาตรฐานเปียก..... 67

67 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกภายในถังเก็บข้าวเปลือกที่ความชื้น 26 % มาตรฐานเปียก ณ เวลา 10 ชั่วโมง..... 70

68 ตำแหน่งพิกัดของอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ใช้ในการอ้างอิงสมการ..... 82

อักษรย่อ

$D_{i,\max}$	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสูงสุดของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ
Q_{Paddy}	=	ความร้อนของข้าวเปลือกที่เกิดขึ้น
Q_{CLOHP}	=	ความร้อนที่ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบสามารถระบายได้
Pr	=	Prandtl number
Ka	=	Karman number
$Ja*$	=	Modified Jacob number
Bo	=	Bond number
Ku	=	Kutateladze number
FR	=	อัตราส่วนการเติมสารทำงาน
n	=	จำนวนโค้งเลี้ยวของท่อ
L_e	=	ความยาวส่วนทำระเหย
L_c	=	ความยาวส่วนควบแน่น
L_{eff}	=	effective length
h_{lv}	=	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำงาน
k_a	=	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ
k_c	=	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของท่อส่วนควบแน่น
k_e	=	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของท่อส่วนทำระเหย
μ	=	ความหนืดของสารทำงาน
ρ	=	ความหนาแน่น
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง
σ	=	แรงตึงผิว
m	=	มวลของข้าวเปลือก
DML	=	Dry matter loss
η	=	ประสิทธิภาพของระบบการระบายความร้อนด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ