

# ท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพรมสำหรับลดความชื้นข้าวเปลือก

## Heat pipe with wicks for paddy dehydration

สถิตพงษ์ เสงี่ยมศักดิ์<sup>1\*</sup>, สุพัตรา บุไธสง<sup>1</sup>, วิริยะ แสดทน<sup>1</sup>

Satitpong Sangiamsuk<sup>1\*</sup>, Supattra Boothaisong<sup>1</sup>, Wiriya Dangton<sup>1</sup>

Received: 14 April 2020 ; Revised: 18 May 2020 ; Accepted: 5 June 2020

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนากระบวนการลดความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกด้วยท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพรมภายใน ที่ใช้สารทำงาน R-134a และ R-11 โดยมีอุณหภูมิที่ส่วนทำระเหย 60°C และ 80°C เพื่อลดความชื้นให้ข้าวเปลือกสายพันธุ์ ข้าว กข6 และข้าวดอกมะลิ 105 ซึ่งข้าวเปลือกที่นำมาใช้ในการทดลองมีความชื้นเริ่มต้นที่ 23% และทำการทดลองลดความชื้นของข้าวเปลือกให้เหลือ 12% จากการทดลองพบว่า หากเพิ่มอุณหภูมิเข้าที่ส่วนทำระเหยจาก 60°C เป็น 80°C จะทำให้ระยะเวลาในการลดความชื้นลดลง แต่พบว่าที่อุณหภูมิ 60°C จะเหมาะสมที่สุด เพราะอุณหภูมิที่สูงจะส่งผลต่อความชื้นที่ลดลงภายในเมล็ดพันธุ์ข้าวเร็วเกินไป จึงทำให้เกิดการแตกหักได้ง่าย และเมื่อนำข้าวเปลือกไปทดสอบการงอก จะพบว่าอุณหภูมิที่ 60°C ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด ของข้าว กข6 จะมีเปอร์เซ็นต์การงอกที่ดีที่สุด อยู่ที่ 69 - 84% และข้าวดอกมะลิ 105 จะมีเปอร์เซ็นต์การงอกอยู่ที่ 53 - 72% เมื่อทำการทดลองเปลี่ยนสารทำงานภายในท่อความร้อน จะพบว่าสารทำงาน R-134a จะใช้ระยะเวลาในการลดความชื้นข้าวเปลือกได้เร็วกว่า R-11 และทางผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพรมและไม่ติดตั้งวัสดุพรม พบว่าท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพรมจะมีระยะเวลาในการลดความชื้นเร็วกว่าท่อความร้อนที่ไม่ติดตั้งวัสดุพรม เนื่องจากวัสดุพรมได้นำความร้อนจากส่วนทำระเหยมายังส่วนควบแน่นได้ดี จึงทำให้ลดความชื้นได้เร็วกว่าท่อความร้อนที่ไม่ติดตั้งวัสดุพรม

**คำสำคัญ:** ท่อความร้อน วัสดุพรม ความชื้น ข้าวเปลือก

### Abstract

This research aims to study and develop a process to decrease the moisture content of paddy seed by heat pipe with wicks. It used working fluid R-134a and R-11 with temperatures at the evaporator section of 60°C or 80°C. It reduced the moisture content of the paddy (Glutinous rice, RD6 and jasmine rice, KDML105). The paddy used in the experiment had an initial moisture content of 23% and decreased dehumidification to 12%. It was found that when the inlet temperature at the evaporator section increased from 60 to 80°C it will reduce the duration of moisture reduction and it was found that the temperature of 60°C was most appropriate because higher temperatures will affect the moisture decrease within the grain too quickly. It makes the fracture easy, when paddy was used in a germination test. We found that a temperature at 60°C of all variables used in the experiment with glutinous rice RD6 had percent of germination of about 69 - 84% and for jasmine rice 105 it was about 53 - 72%. The experiment compared the working fluid inside the heat pipe and found that R-134a decreased moisture content of the paddy faster than R-11. We compared heat pipes with and without wicks. It was found that the heat pipe with wicks had a shorter dehumidification time than the heat pipe without wicks because wick materials transported heat from the evaporator section to the condenser section as well. Therefore, the dehumidification is faster than with the heat pipe without wicks.

**Keywords:** Heat pipe, Wick, Moisture, Paddy

<sup>1</sup> อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ตำบลกาฬสินธุ์ อำเภอเมือง จังหวัดกาฬสินธุ์ 46000,

<sup>1</sup> Lecturer, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University, Kalasin Sub-District, Meuang District, Kalasin 46000, Thailand.

\* Corresponding author ; Satitpong Sangiamsuk, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University, Kalasin Sub-District, Meuang District, Kalasin 46000, Thailand. satitpong.sa@ksu.ac.th

## บทนำ

เนื่องจากในประเทศไทย เป็นอีกหนึ่งประเทศที่มีชื่อทางด้านเกษตรกรรมที่หลากหลาย เช่น ข้าว มันสำปะหลัง ยางพารา และปาล์ม เป็นต้น แต่ข้าวถือว่าเป็นธัญญาหารของไทย และในแถบภูมิภาคเอเชีย ที่ต้องกิน และบริโภคทุกๆ วัน ข้าวไทยถือว่าเป็นข้าวที่มีคุณภาพดีกว่าประเทศอื่นมาก ทั้งรสชาติ ความนุ่ม ความหอม เช่น ข้าวหอมมะลิ นับว่าเป็นเอกลักษณ์ของไทยเรา เราจึงเห็นความสำคัญของเกษตรกรรมที่ทำการปลูกข้าวเป็นอาชีพหลัก ทุกปีหลังการเก็บเกี่ยวข้าวเสร็จ เกษตรกรจะเก็บเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกไว้เพื่อใช้ในการเพาะปลูกปีถัดไป การเก็บเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกไว้นั้นต้องนำเมล็ดข้าวไปตากแดดให้แห้งจึงจะเก็บรักษาไว้ได้ ถ้าเก็บเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกไว้โดยไม่นำไปตากแดดก่อน เมื่อนำเมล็ดข้าวเปลือกมากองรวมกันไว้จะทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีความชื้นมาก และมีราเกิดขึ้นได้ เนื่องจากเมล็ดข้าวเปลือกนั้นยังมีกระบวนการการหายใจ ทำให้กองข้าวมีอุณหภูมิสูงขึ้น และเหมาะต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ต่างๆ มีผลทำให้เมล็ดข้าวเสื่อมคุณภาพ เช่น ข้าวงอก เกิดข้าวเน่า ข้าวบูด เพราะในเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกนั้นยังมีความชื้นสูง ในช่วงเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกนั้นมีความชื้นประมาณ 20-25% เราจึงต้องทำการลดความชื้นของเมล็ดข้าวให้เหลือประมาณ 12% สำหรับการเก็บข้าวไว้นาน 3-5 เดือน ซึ่งมีวิธีที่จะนำมาใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือกได้ก็คือ การอบแห้ง (drying) การอบแห้งข้าวเปลือกสามารถทำได้ด้วยเครื่องอบแห้งหลายชนิด เช่น เครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบด (spouted-bed dryer)<sup>1</sup> เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชเบด (fluidized-bed dryer)<sup>2</sup> เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (pneumatic dryer)<sup>3</sup> เป็นต้น ซึ่งข้าวเปลือกที่นำมาอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งดังกล่าวต้องเคลื่อนที่อยู่ในระบบตลอดเวลา ถึงแม้ว่าเครื่องอบแห้งดังกล่าวข้างต้นจะมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานอยู่ในระดับสูง แต่มีความเป็นไปได้ที่ข้าวเปลือกจะได้รับ ความเสียหาย (แตกหรือหัก) ในระหว่างการเคลื่อนที่ในระบบด้วยเหตุนี้ การอบแห้งข้าวเปลือกโดยที่ข้าวไม่เกิดการเคลื่อนที่ จึงเป็นแนวคิดที่น่าสนใจ แนวทางหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ในการอบแห้งข้าวเปลือกโดยที่ข้าวเปลือกไม่ต้องเคลื่อนที่ในระบบ คือ การใช้ท่อความร้อนเข้ามาช่วยในกระบวนการลดความชื้น

ท่อความร้อน (Heat pipe) คือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่สามารถถ่ายโอนความร้อนได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก<sup>4,5,6</sup> ทำงานโดยใช้หลักการส่งถ่ายความร้อนจากความร้อนแฝงของสารทำงานภายในท่อซึ่งระเหยโดยการได้รับความร้อนแล้วถ่ายโอนความร้อนโดยการควบแน่นเนื่องจากความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำงานมีค่าสูงมาก จึงสามารถถ่ายโอนความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่งได้มากโดยมีอุณหภูมิต่างกันเพียง

เล็กน้อย<sup>7,8</sup> โดยทั่วไปแล้วท่อความร้อนจะประกอบด้วยส่วนทำระเหย (Evaporator section) ส่วนกันความร้อน (Adiabatic section) และส่วนควบแน่น (Condenser section) ดัง Figure 1 ซึ่งเราสามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการให้ความร้อนกับข้าวเปลือกเพื่อไล่ความชื้นภายในข้าวเปลือก และยังสามารถทำได้ในทุกสภาวะอากาศแม้ว่าฝนจะตกหรือมีแสงแดดน้อย ใช้พื้นที่น้อย สามารถควบคุมการลดความชื้นให้อยู่ในระดับตามที่ต้องการสามารถควบคุมป้องกันความเสียหายต่อคุณภาพข้าวได้

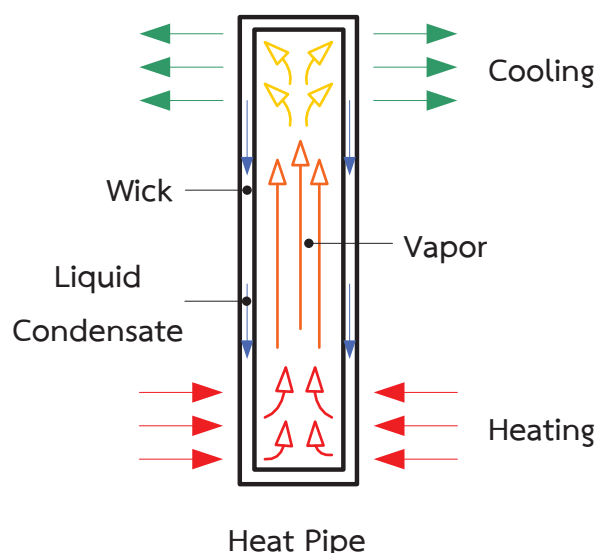


Figure 1 Heat Pipe

ดังนั้นจากที่กล่าวมาในข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะประยุกต์ใช้ท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูนเป็นอุปกรณ์ช่วยในการถ่ายโอนความร้อนสำหรับกระบวนการลดความชื้นของข้าวเปลือก โดยพัฒนาระบบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคโนโลยีท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูนในเชิงของเครื่องต้นแบบ และสร้างเครื่องลดความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกจากท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูนในการระบายความร้อน เพื่อลดความชื้นให้ได้ตามระดับมาตรฐานในการเก็บรักษา และเพื่อเป็นประโยชน์แก่เกษตรกรที่ทำอาชีพปลูกข้าวเป็นหลัก อีกประเด็นเพื่อเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ข้าวให้นานที่สุด

## วิธีการวิจัย

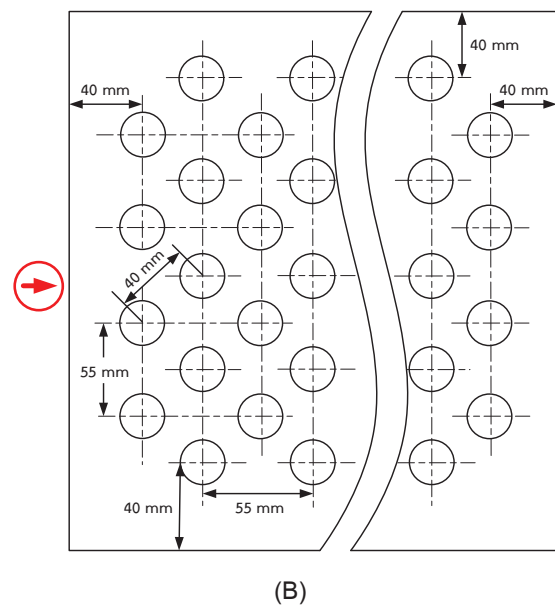
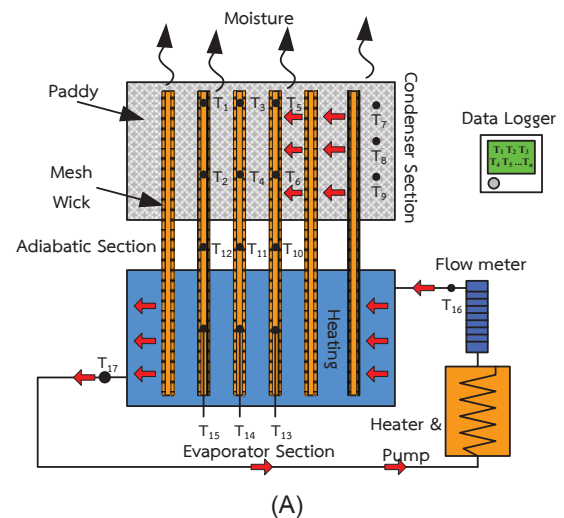
### 1. อุปกรณ์ในการทดลอง

Figure 2(A), (B) แสดงแผนผังของเครื่องลดความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกจากท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูน และแสดงระยะห่างของกลุ่มท่อความร้อน ซึ่งกลุ่มของท่อเป็นแบบ staggered โดยมี 9 แถว เริ่มจากด้านข้าง 4 ท่อ ถัดมา 5 ท่อ ตามลำดับ ทั้งหมดใช้ท่อความร้อนจำนวน 40 ท่อ โดย

ท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพรุนมีส่วนประกอบหลัก คือ ท่อทำจากท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 mm ยาว 750 mm แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนทำระเหย 300 mm ส่วนกันความร้อน 150 mm ส่วนควบแน่น 300 mm และภายในท่อความร้อนมีวัสดุพรุนชนิดตาข่ายบรรจุอยู่ ดัง Figure 3 โดยมีความหนาของวัสดุพรุน 1 mm และภายในบรรจุสารทำงาน 50% โดยปริมาตรของท่อความร้อน โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้สารทำความเย็น R-134a และ R-11 เป็นสารทำงาน โดยรายละเอียดของท่อความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดัง Table 1

**Table 1** Details of heat pipe and experimental conditions

| Heat pipe               |                                                                                                   |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pipe material           | Copper pipe                                                                                       |
| Wick material           | Copper mesh                                                                                       |
| Number of pipes         | 40                                                                                                |
| Pipe size               | Inner diameter 10 mm and length 750 mm<br>(Evaporator 300 mm, Adiabatic 150 mm, Condenser 300 mm) |
| Filling ratio           | 50% by volume of the heat pipe                                                                    |
| Experimental conditions |                                                                                                   |
| Types of paddy          | RD6 rice and Jasmine Rice, KDML105                                                                |
| Types of Heat pipe      | Wick and without wick                                                                             |
| Working fluids          | R-134a and R-11                                                                                   |
| Evaporator temperature  | 60°C and 80°C                                                                                     |



**Figure 2** Diagram of a dehumidifier of paddy seed by heat pipe with wicks (A), groups of heat pipe (B) and top view of condenser jacket (C)

ท่อความร้อนที่ติดตั้งอยู่ภายในกล่องส่วนทำระเหย จะทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนจากน้ำร้อน โดยน้ำร้อนจะไหลที่อัตราการไหล 1.5 L/min ความร้อนจะเกิดการแลกเปลี่ยนแล้วถ่ายโอนไปยังส่วนควบแน่น ในขณะที่ส่วนควบแน่นจะติดตั้งภายในกล่องบรรจุข้าวเปลือกที่มีขนาดความกว้าง 300 mm ยาว 300 mm และสูง 350 mm ซึ่งอุปกรณ์ในการทดลองจะมีการเก็บข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger, Zupcon MultiF R5000) โดยตำแหน่งการวัดอุณหภูมิแสดงดัง Figure 2(A) คือตำแหน่งที่ 1-6, 10-12 และ 13-15 วัดอุณหภูมิในส่วนของท่อความร้อน ตำแหน่งที่ 7-9 วัดอุณหภูมิในกองข้าวเปลือก ตำแหน่งที่ 16 กับ 17 วัดอุณหภูมิทางเข้า-ทางออกของน้ำร้อนที่ส่วนทำระเหย โดยตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของท่อความร้อนในการทดลองแสดงไว้ใน Figure 4

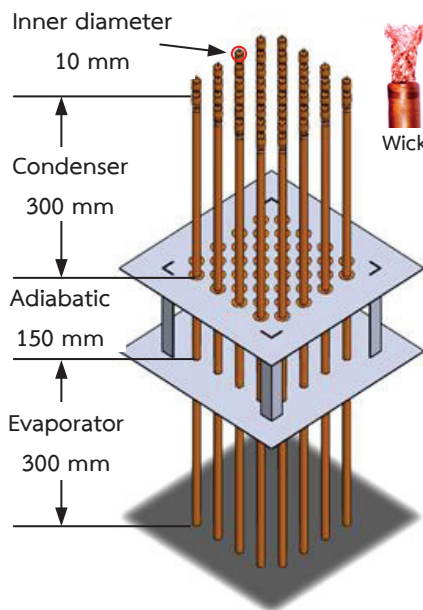


Figure 3 Heat pipe dimensions and wick<sup>12</sup>

## 2. ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ ข้าว กข6 และข้าวดอกมะลิ 105 ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 23% มาตรฐานเปียก จำนวน 15 กิโลกรัมต่อครั้งการทดลอง เป็นผลิตภัณฑ์ทดสอบ โดยความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกเตรียมได้โดยการแช่น้ำผสมกับข้าวเปลือก จากนั้นจึงนำข้าวเปลือกดังกล่าวไปเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4°C เป็นระยะเวลา 2 วัน หลังจากนั้นจึงนำข้าวเปลือกออกจากตู้เย็นเพื่อผึ่งในบรรยากาศก่อนเริ่มการทดลอง ทั้งนี้เพื่อปรับอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้เท่ากับอุณหภูมิห้อง และปรับความชื้นของข้าวเปลือกให้อยู่ในค่าเดียวกัน และระหว่างการทดลองจะทำการวัดความชื้นของ

เมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือก ทุกๆ 30 min ด้วยเครื่องวัดความชื้นแบบเกลียวบิด (Moisture Tester Model TA-5) แสดงค่าเป็นมาตรฐานเปียก

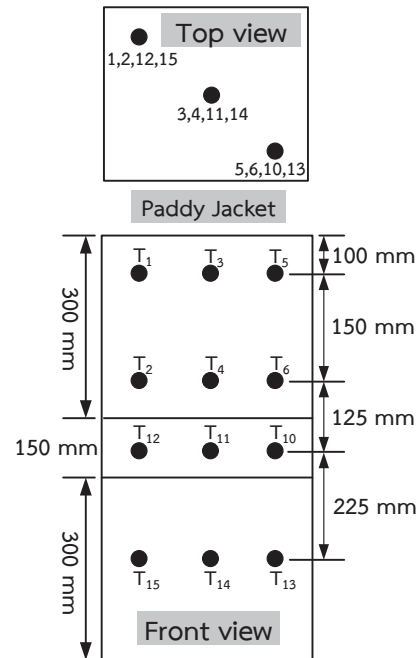


Figure 4 Position of heat pipe temperature measurement

## 3. วิธีการทดลอง

การทดลองจะเริ่มจากการเติมสารทำงานเข้าสู่ท่อความร้อนที่ทำให้เป็นสุญญากาศในปริมาตรการเติมสารตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ แล้วก็ประกอบชุดท่อความร้อนทั้ง 40 ชุด จากนั้นทำการติดตั้งเข้ากับแท่นชุดทดลอง โดยให้ท่อในส่วนควบแน่นต่อเข้ากับกล่องบรรจุข้าวเปลือก และท่อที่ส่วนทำระเหยจะต่อเข้ากับชุดให้ความร้อนจากน้ำร้อนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ ซึ่งจะมีอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของน้ำตามเงื่อนไขการทดลอง โดยที่ด้านน้ำเข้าจะทำการติดตั้งตัวควบคุมอัตราการไหล (Flow meter, Treatton Z-3001) ไว้ และอีกด้านหนึ่งจะต่อสายยางที่หุ้มฉนวนกันความร้อนไปยังถังเก็บน้ำร้อน โดยภายในถังเก็บน้ำร้อนจะติดตั้งปั๊มน้ำ เพื่อไหลเวียนน้ำในการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในระบบ ในขณะที่อุณหภูมิที่วัดค่า จะได้รับการตรวจวัดอย่างต่อเนื่องด้วยสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K และบันทึกด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger, Zupcon MultiF R5000) โดยการทดลองจะดำเนินไปจนกระทั่งความชื้นของข้าวเปลือกลดลงเหลือ 12% (มาตรฐานเปียก) ซึ่งวัดได้จากเครื่องมือวัดความชื้นข้าวเปลือก การทดลองจะกระทำที่เงื่อนไขดังต่อไปนี้ 1) ชนิดของพันธุ์ข้าวเปลือก ได้แก่ ข้าว กข6 และข้าวดอกมะลิ 105 2) ท่อความร้อน 2 ชนิด ได้แก่ ท่อที่ติดตั้งวัสดุพูน และไม่ติดตั้ง 3) สารทำงาน

ที่ใช้ภายในท่อความร้อน ได้แก่ R-134a และ R-11 4) อุณหภูมิ ส่วนที่ระเหย 2 ค่า ได้แก่ 60°C และ 80°C ตามเงื่อนไขการ ทดลองทั้งหมดซึ่งสรุปไว้ให้เห็นใน Table 1 โดยมีการทดลอง 3 ซ้ำ แต่ละเงื่อนไขการทดลอง

และสำหรับการทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การงอก (%) ของเมล็ดข้าวเปลือกโดยการทดสอบความงอกมาตรฐาน (standard germination test) จะใช้วิธีการเพาะเมล็ดพันธุ์ ด้วยทรายที่อุณหภูมิ 25°C ± 2°C จำนวน 4 ซ้ำๆ ละ 100 เมล็ด โดยการตรวจนับจำนวนต้นกล้าปกติจนสิ้นสุดระยะ เวลาที่กำหนด ตามหลักการประเมินการงอกของ ISTA (International seed testing association) <sup>9</sup> จากนั้นนำข้อมูล มาคำนวณการงอกจากสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การงอก (\%)} = \left( \frac{\text{จำนวนต้นกล้าปกติ}}{\text{จำนวนเมล็ดทั้งหมด}} \right) \times 100$$

#### 4. การคำนวณค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน และค่าประสิทธิภาพ

โดยการหาค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่น้ำร้อน ให้ความร้อนแก่ท่อความร้อนที่ส่วนที่ระเหย (Heat source) หรือค่าความร้อนที่รับความร้อนที่ส่วนควบแน่น (Heat sink) โดยการวัดค่าอุณหภูมิที่แตกต่างบริเวณทางเข้าและทางออก ในส่วนที่ระเหย จากนั้นจึงนำมาคำนวณหาโดยใช้สมการ (1)

$$Q_{exp} = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

เมื่อ

$Q_{exp}$  = การถ่ายโอนความร้อน (W)

$\dot{m}$  = อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)

$C_p$  = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (J/kg.°C)

$T_{out}$  = อุณหภูมิขาออกของน้ำ (°C)

$T_{in}$  = อุณหภูมิขาเข้าของน้ำ (°C)

สำหรับค่าประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนของ ท่อความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ (2)

$$\eta = \frac{Q_{exp}}{Q_{theory}} \times 100\% \quad (2)$$

โดยค่าการถ่ายโอนความร้อนทางทฤษฎีสามารถ คำนวณได้จากสมการ (3) <sup>10,11</sup> ซึ่ง  $\Delta T$  คือผลต่างของอุณหภูมิ ที่วัดที่ผิวของท่อความร้อนที่ส่วนที่ระเหยและส่วนควบแน่น  $R_{total}$  คือความต้านทานความร้อนรวม โดยสามารถคำนวณ หาได้จาก ผลรวมของวงจรความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance Circuits) ในแต่ละส่วน ที่เกิดขึ้นจากพฤติกรรม การถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อนจากส่วนที่ระเหยไป ยังส่วนควบแน่น

$$Q_{theory} = \frac{\Delta T}{R_{total}} \quad (3)$$

โดยที่

$$R_{total} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8 + R_9 + R_{10} \quad (4)$$

ซึ่ง  $R$  คือ ค่าความต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นกับ ท่อความร้อนในส่วนต่างๆ (°C/W)

โดยสมการที่ใช้หาค่าความต้านทานความร้อนของ ท่อความร้อนข้างต้น พบว่าค่าความต้านทาน  $R_4$ ,  $R_5$ ,  $R_6$  และ  $R_{10}$  นั้นมีค่าเชิงปริมาณที่น้อยกว่าหลายเท่า เมื่อเปรียบ เทียบกับค่าความต้านทานความร้อนตัวอื่นๆ ดังนั้นในการ คำนวณจึงสามารถละเว้นไม่นำมาพิจารณา <sup>10,11,12</sup> และนอกจาก นี้ยังสามารถละเว้นไม่พิจารณา  $R_1$  และ  $R_9$  เนื่องจากส่วนที่ ะเหย และส่วนควบแน่นสัมผัสโดยตรงกับแหล่งให้ความร้อน และรับความร้อน และสำหรับท่อความร้อนที่ไม่ได้มีการติดตั้ง วัสดุพูนชนิดตาข่ายภายใน ยังสามารถละเว้นการพิจารณา  $R_3$  และ  $R_7$  ดังสมการ (5) และ (6)

$$Q_{theory} = \frac{\Delta T}{R_2 + R_8} \quad (5)$$

และสำหรับท่อความร้อนที่มีการติดตั้งวัสดุพูนชนิด ตาข่ายภายในได้ ดังสมการ (6)

$$Q_{theory} = \frac{\Delta T}{R_2 + R_3 + R_7 + R_8} \quad (6)$$

โดย  $R_2 = \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi k_{tube} L_e}$ ,  $R_8 = \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi k_{tube} L_c}$  คือ ความ ต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผนังท่อที่ส่วนที่ระเหย และส่วน ควบแน่น และ  $R_3 = \frac{\ln(d_i/d_{iw})}{2\pi k_w L_e}$ ,  $R_7 = \frac{\ln(d_i/d_{iw})}{2\pi k_w L_c}$  คือ ความ ต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นที่วัสดุพูนชนิดตาข่ายที่ส่วนที่ ะเหย และส่วนควบแน่น แสดงดัง Figure 5



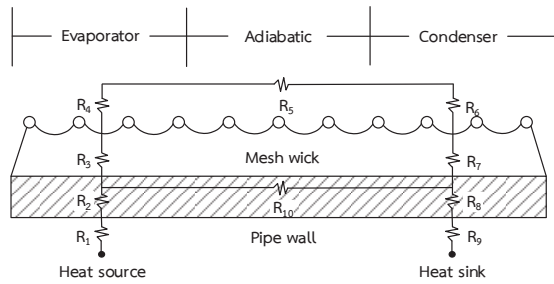


Figure 5 Thermal Resistance Circuits

โดยที่

$d_i$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (m)

$d_o$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ (m)

$k_{tube}$  = ค่าการนำความร้อนของท่อทองแดง (W/m.K)

$k_w$  = ค่าการนำความร้อนของวัสดุพูนชนิดตาข่ายทองแดง (W/m.K)

$L_e$  = ความยาวของส่วนทำระเหยของท่อความร้อน (m)

$Q_{theory}$  = การถ่ายโอนความร้อนทางทฤษฎี (W)

$\Delta T$  = ผลต่างของอุณหภูมิส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่น (K)

$\eta$  = ค่าประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อน

## ผลการศึกษาและวิจารณ์

จากการดำเนินงานตามวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย ผู้วิจัยได้ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลทั้งหมดจากการทดลอง จากเครื่องลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกจากท่อความร้อน โดยใช้สารทำงาน คือ R-134a และ R-11 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ และเปรียบเทียบการลดลงของความชื้น เปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดข้าวเปลือก ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อน และค่าประสิทธิภาพของท่อความร้อน โดยแบ่งผลการทดลองดังต่อไปนี้

### 1. ผลของความชื้นข้าวเปลือก

1.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในกองข้าวเปลือกโดยใช้ท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูน บรรจุสารทำงาน R-134a

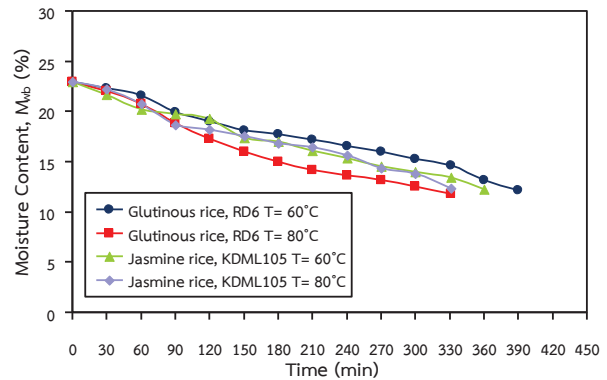


Figure 6 Moisture change of paddy of RD6 rice and Jasmine Rice, KDML105 at temperature 60 and 80°C, working fluid was R-134a

จาก Figure 6 จากการทดลองผลของการลดลงของความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าว กข6 และข้าวดอกมะลิ 105 อุณหภูมิที่ส่วนทำระเหยของชุดท่อความร้อน คือ 60°C และ 80°C โดยมีความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกจะอยู่ที่ประมาณ 23% มาตรฐานเปียก และต้องการลดความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกให้อยู่ที่ประมาณ 12% มาตรฐานเปียก อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองจะมีผลต่อการลดความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกเมื่อใช้อุณหภูมิในการทดลองที่สูงก็จะใช้เวลาอันน้อยลง และความชื้นในเมล็ดพันธุ์ก็จะลดลงได้เร็วขึ้น เช่น อุณหภูมิ 80°C ข้าว กข6 และข้าวดอกมะลิ 105 ใช้เวลาในการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกอยู่ที่ 330 min เท่ากัน และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้อุณหภูมิทดลองที่ 60°C ก็จะใช้เวลานานขึ้น อยู่ที่ 390 และ 360 min ถึงจะได้ความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกประมาณที่ 12% มาตรฐานเปียก ซึ่งจะพบว่าอุณหภูมิจะเป็นตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลต่อการลดลงของความชื้นโดยตรง

1.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในกองข้าวเปลือกโดยใช้ท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูน บรรจุสารทำงาน R-11

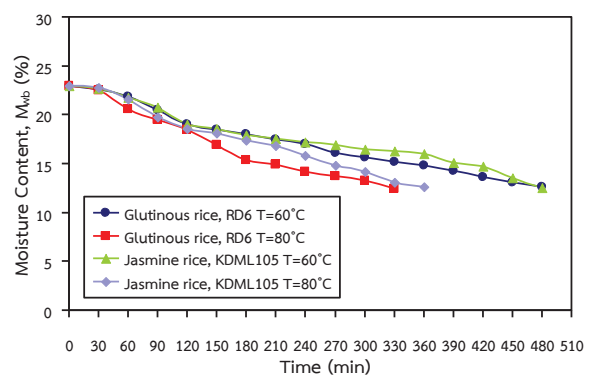
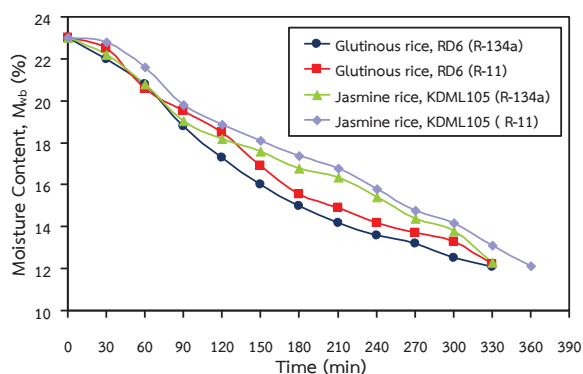


Figure 7 Moisture change of paddy of RD6 rice and Jasmine Rice, KDML105 at temperature 60 and 80°C, working fluid was R-11

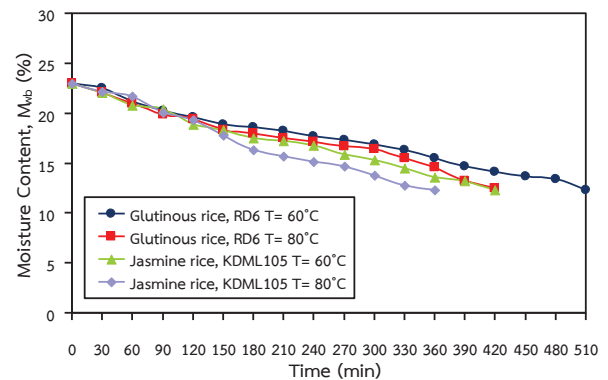
จาก Figure 7 จากการทดลองผลของการลดความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าว กข6 และข้าวดอกมะลิ 105 อุณหภูมิที่ส่วนที่ระเหยของชุดท่อความร้อน คือ 60°C และ 80°C โดยภายในท่อความร้อนจะติดตั้งวัสดุพรุนเข้าไป และเติมสารทำงาน R-11 ภายใน ซึ่งพบว่า ที่อุณหภูมิ 80°C ข้าว กข6 ใช้เวลาของการลดความชื้นน้อยกว่าข้าวดอกมะลิ 105 อยู่ที่ 330 และ 360 min เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้อุณหภูมิที่ 60°C ก็จะใช้เวลานานขึ้นอยู่ที่ 480 min เท่ากัน ถึงจะทำให้ความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกเหลือประมาณที่ 12% มาตรฐานเปียก

ซึ่งจากข้อมูลการทดลองใน Figure 6 และ 7 พบว่าอุณหภูมิที่ส่วนที่ระเหยของท่อความร้อนที่เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลต่อความชื้นที่ลดลง<sup>13</sup> แต่ก็ยังพบว่าสารทำงานภายในท่อความร้อนที่ใช้ในการทดลอง R-134a ให้การถ่ายโอนความร้อนและแลกเปลี่ยนความร้อนยังส่วนที่ระเหยได้ดีกว่าสารทำงาน R-11 ซึ่งจะมีผลต่อการลดลงของความชื้นเช่นกัน เนื่องจากสารทำงาน R-134a มีจุดเดือดที่ต่ำ และมีค่าความจุความร้อนจำเพาะที่สูง กว่า R-11 จึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่า โดยเมื่อสารทำงานเกิดการเดือดในขณะที่ไหลในท่อความร้อน สารทำงานในสถานะของเหลวที่รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอที่มีค่าปริมาตรจำเพาะสูงกว่าในสถานะของเหลว จึงเป็นผลให้ความเร็วในการไหลของสารใน 2 สถานะมีค่ามากขึ้น และส่งผลต่อค่าความหนาของชั้นฟิล์มของของเหลวลดลง และความต้านทานทางความร้อนก็ลดลงด้วย มีผลทำให้การถ่ายโอนความร้อนมีค่าสูงขึ้นตาม โดยสามารถดูได้จาก Figure 8 เมื่อนำข้อมูลของความชื้นของข้าวเปลือกที่ทดลองในอุณหภูมิส่วนที่ระเหย 80°C โดยใช้ท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพรุนภายใน และใช้สารทำงานที่แตกต่างกัน คือ R-134a กับ R-11 จะเห็นว่าการลดลงของความชื้นของข้าวเปลือกในท่อที่ใช้สารทำงาน R-134a จะลดลงได้เร็วกว่า R-11



**Figure 8** Comparison of moisture change of paddy of RD6 rice, Jasmine Rice, KDML 105 at temperature 80°C with R-134a and R-11 as working fluids

### 1.3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในกองข้าวเปลือกโดยใช้ท่อความร้อนที่ไม่ติดตั้งวัสดุพรุน บรรจุสารทำงาน R-134a

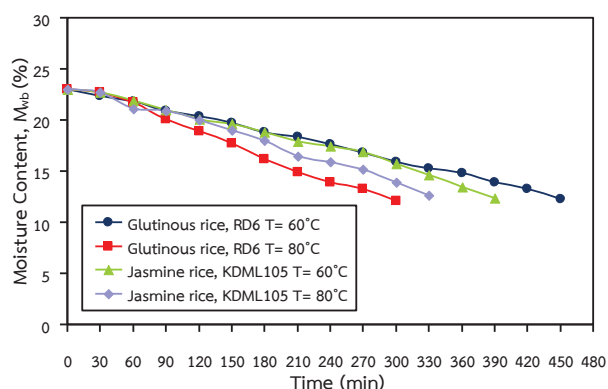


**Figure 9** Moisture change of paddy of RD6 rice and Jasmine Rice, KDML105 at temperature 60 and 80°C, working fluid was R-134a

จาก Figure 9 จากการทดลองผลของการลดความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าว กข6 และข้าวดอกมะลิ 105 อุณหภูมิที่ส่วนที่ระเหยของชุดท่อความร้อน คือ 60°C และ 80°C โดยในชุดการทดลองนี้ภายในท่อความร้อนจะไม่มีติดตั้งวัสดุพรุนภายใน เหมือนกับข้อมูลในการทดลองจาก Figure 6 และ 7 พบว่า ที่อุณหภูมิ 80°C ข้าว กข6 และข้าวดอกมะลิ 105 ใช้เวลาในการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกอยู่ที่ 420 และ 360 min และที่อุณหภูมิ 60°C ก็จะใช้เวลานานขึ้นอยู่ที่ 510 และ 420 min ถึงจะได้ความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกประมาณที่ 12% มาตรฐานเปียก

ซึ่งเมื่อนำข้อมูลของชุดท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพรุน กับไม่ติดตั้งวัสดุพรุนมาทำการเปรียบเทียบ ก็จะพบว่าท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพรุนภายในจะส่งผลในการลดความชื้นของข้าวเปลือกได้ดีกว่าท่อที่ไม่ติดตั้งวัสดุพรุนเนื่องจากวัสดุพรุนที่ติดตั้งเสริมเข้าไป จะช่วยในการเคลื่อนที่ของสารทำงานภายในได้ดีขึ้น และแบ่งสารทำงานที่เกิดจากการควบแน่นแล้ว ไหลลงมายังส่วนที่ระเหยใหม่ ไม่ให้เกิดการชนกันของสารทำงานที่เคลื่อนที่ขึ้นไปยังส่วนควบแน่น จึงส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดี

#### 1.4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในกองข้าวเปลือก โดยใช้ท่อความร้อนที่ไม่ติดตั้งวัสดุพูน บรรจุสารทำงาน R-11



**Figure 10** Moisture change of paddy of RD6 rice and Jasmine Rice, KDML105 at temperature 60 and 80°C, working fluid was R-11

**Table 2** Shows the germination percentage of RD6 rice and Jasmine Rice, KDML105 at 60°C and 80°C (Heat pipe with wick)

| Working Fluids | Evaporator Temp. 60°C                                                               | (%) | Evaporator Temp. 80°C                                                               | (%) | Working Fluids | Evaporator Temp. 60°C                                                                | (%) | Evaporator Temp. 80°C                                                                 | (%) |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| R-134a         |  | 84  |  | 58  | R-11           |  | 69  |  | 60  |
|                | RD6 rice                                                                            |     | RD6 rice                                                                            |     |                | RD6 rice                                                                             |     | RD6 rice                                                                              |     |
|                |  | 72  |  | 64  |                |  | 53  |  | 47  |
|                | KDML105                                                                             |     | KDML105                                                                             |     |                | KDML105                                                                              |     | KDML105                                                                               |     |

## 2. เปอร์เซนต์การงอกของข้าวเปลือก

2.1 เปอร์เซนต์การงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าว กข6 และข้าวดอกมะลิ 105 ของสารทำงาน R-134a และ R-11 โดยใช้ท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูน จาก Table 2 แสดงค่าเปอร์เซนต์การงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าว กข6 และข้าวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 60°C และ 80°C จะพบว่าที่อุณหภูมิ 60°C จะมีเปอร์เซนต์การงอกดีกว่าอุณหภูมิ 80°C เนื่องจากการลดความชื้นที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกค่อยๆ ลดลงทำให้เมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกไม่เสื่อมคุณภาพและสุก เพราะการลดความชื้นที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกลดอย่างรวดเร็ว จึงทำให้เมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกเสื่อมคุณภาพ ซึ่งจะส่งผลต่อเปอร์เซนต์การงอกโดยตรง

จาก Figure 10 จากการทดลองผลของการลดความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าว กข6 และข้าวดอกมะลิ 105 อุณหภูมิที่ส่วนทำระเหยของชุดท่อความร้อน คือ 60°C และ 80°C โดยในชุดการทดลองนี้ภายในท่อความร้อนจะไม่มีสารติดตั้งวัสดุพูนภายใน พบว่าที่อุณหภูมิ 80°C ข้าว กข6 และข้าวดอกมะลิ 105 ใช้เวลาในการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกอยู่ที่ 300 และ 330 min และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้อุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 60°C ก็จะใช้เวลาเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 450 และ 390 min จึงจะได้ความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกประมาณที่ 12% มาตรฐานเปียก ซึ่งผลการทดลอง ของท่อความร้อนที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งวัสดุพูน กับสารทำงานที่บรรจุภายใน ที่เป็น R-134a และ R-11 ก็มีผลการทดลองที่คล้ายคลึงกัน

จากการทดลองของท่อความร้อนที่บรรจุสารทำงาน R-134a และ R-11 จะพบว่าเปอร์เซนต์การงอกของข้าวเปลือกของสารทำงาน R-134a ดีกว่า R-11 โดยมีค่าเปอร์เซนต์การงอกที่ดีที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ 60°C ของสารทำงาน R-134a เป็น 84% ในข้าว กข6 และ 72% ในข้าวดอกมะลิ 105 เนื่องจากผลของสารทำงานมีจุดเดือดที่ต่ำและค่าความจุความร้อนจำเพาะสูง ส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนของสารทำงานที่อยู่ภายในท่อความร้อนได้ดี ทำให้สามารถรับความร้อนและส่งถ่ายความร้อนได้รวดเร็ว ซึ่งส่งผลต่อระยะเวลาในการลดความชื้นน้อย ไม่ทำให้ข้าวเปลือกต้องอบอยู่ในความร้อนนานเกินไป ซึ่งจะมีผลต่อการเสื่อมคุณภาพ และเปอร์เซนต์การงอกต่อไป



**Table 3** Shows the germination percentage of RD6 rice and Jasmine Rice, KDML105 at 60°C and 80°C (Heat pipe without wick)

| Working Fluids | Evaporator Temp. 60°C                                                             | (%) | Evaporator Temp. 80°C                                                             | (%) | Working Fluids | Evaporator Temp. 60°C                                                              | (%) | Evaporator Temp. 80°C                                                               | (%) |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|----------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| R-134a         |  | 73  |  | 65  | R-11           |  | 67  |  | 57  |
|                | RD6 rice                                                                          |     | RD6 rice                                                                          |     |                | RD6 rice                                                                           |     | RD6 rice                                                                            |     |
| R-134a         |  | 64  |  | 53  | R-11           |  | 59  |  | 50  |
|                | KDML105                                                                           |     | KDML105                                                                           |     |                | KDML105                                                                            |     | KDML105                                                                             |     |

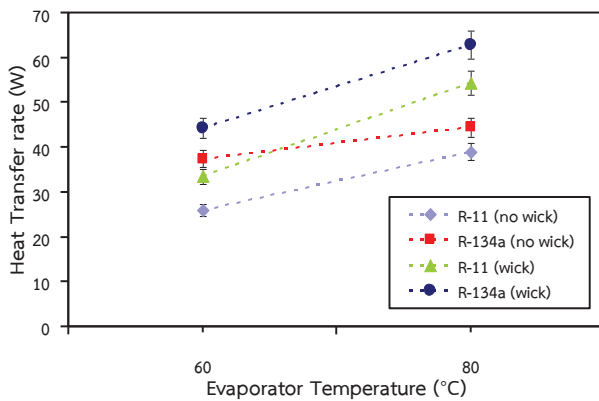
2.2 เปอร์เซนต์การงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าว กข6 และข้าวดอกมะลิ 105 ของสารทำงาน R-134a และ R-11 โดยใช้ท่อความร้อนที่ไม่ติดตั้งวัสดุพรุน จาก Table 3 แสดงค่าเปอร์เซนต์การงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าว กข6 และข้าวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 60°C และ 80°C จะพบว่าที่อุณหภูมิ 60°C จะมีเปอร์เซนต์การงอกดีกว่าอุณหภูมิ 80°C เนื่องจากการลดความชื้นที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกค่อยๆ ลดลงทำให้เมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกไม่เสื่อมคุณภาพและสุก เพราะการลดความชื้นที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกลดอย่างรวดเร็ว จึงทำให้เมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกเสื่อมคุณภาพ ซึ่งจะส่งผลต่อเปอร์เซนต์การงอกโดยตรง

จากการทดลองของท่อความร้อนที่บรรจุสารทำงาน R-134a และ R-11 จะพบว่าเปอร์เซนต์การงอกของข้าวเปลือกของสารทำงาน R-134a ดีกว่า R-11 โดยมีค่าเปอร์เซนต์การงอกที่ดีที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ 60°C ของสารทำงาน R-134a เป็น 73% ในข้าว กข6 และ 64% ในข้าวดอกมะลิ 105 เนื่องจากผลของสารทำงานมีจุดเดือดที่ต่ำและค่าความจุความร้อนจำเพาะสูง ส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนของสารทำงานที่อยู่ภายในท่อความร้อนได้ดี ทำให้สามารถรับความร้อนและส่งถ่ายความร้อนได้รวดเร็ว ซึ่งส่งผลต่อระยะเวลาในการลดความชื้นน้อย ไม่ทำให้ข้าวเปลือกต้องอบอยู่ในความร้อนนานเกินไป ซึ่งจะมีผลต่อการเสื่อมคุณภาพ และเปอร์เซนต์การงอกต่อไป และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลของท่อความร้อนที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งวัสดุพรุน พบว่าท่อที่ติดตั้งวัสดุพรุนจากข้อมูลในตารางจะให้เปอร์เซนต์การงอกที่ดีกว่า แต่ทางผู้วิจัยมองว่าปัจจัยที่มีความแตกต่างกันนี้อาจจะไม่ได้เกิดจากวัสดุพรุนเนื่องจากเปอร์เซนต์การงอกมีความใกล้เคียงกัน แต่อุณหภูมิของส่วนที่ระเหยที่ 60°C และ 80°C ให้พบการงอกที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

### 3. ค่าการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อน

จาก Figure 11 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อนที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งวัสดุพรุน ที่อุณหภูมิส่วนที่ระเหย 60 และ 80°C พบว่าท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพรุนชนิดตาข่ายภายใน ใช้สารทำงาน R-134a ที่อุณหภูมิส่วนที่ระเหย 80°C จะให้ค่าการถ่ายโอนความร้อนสูงสุด คือ 62.8 W เมื่อเปรียบเทียบกับ R-11 คือ 54.3 W และในรูปจะแสดงแถบความคลาดเคลื่อนของข้อมูล  $\pm 5\%$  โดยเกิดจากเครื่องมือวัดต่างๆ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิส่วนที่ระเหยขึ้น ก็จะส่งผลต่อค่าการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยที่อุณหภูมิก็เป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญต่อการทำงานของท่อความร้อน และจากผลของสารทำงานภายในต่อท่อความร้อน พบว่าสารทำงาน R-134a จะให้ค่าการถ่ายโอนความร้อนที่สูงกว่าสารทำงาน R-11 เนื่องจาก R-134a มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอที่สูง และมีจุดเดือดที่ต่ำ เลยเป็นผลให้รับความร้อนที่ส่วนที่ระเหย แล้วเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ ซึ่งเป็นผลต่อความดันของสารทำงานที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงทำให้รับความร้อนแล้วเคลื่อนที่ไปยังส่วนควบแน่นได้เร็ว ทำให้ผลของการถ่ายโอนความร้อนดีขึ้น และเมื่อติดตั้งวัสดุพรุนเข้าไปก็จะไปช่วยในการลำเลียงสารทำงานที่เกิดการควบแน่นกลับมายังส่วนที่ระเหยเพื่อมารับความร้อนอีกครั้ง โดยแรงยกตัวที่เกิดจากวัสดุพรุนจะเป็นตัวดึงให้ของเหลวไหลกลับสู่ส่วนที่ระเหย และช่วยให้ของเหลวที่ควบแน่นกระจายตัวรอบผนังของท่อความร้อนเป็นผลให้สารทำงานที่ควบแน่นกลับสู่ส่วนที่ระเหยได้ดี ซึ่งวัสดุพรุนจะเป็นตัวแบ่งลักษณะการเคลื่อนที่ของฟองไอ<sup>14</sup> ที่เคลื่อนที่จากส่วนที่ระเหยไปยังส่วนควบแน่นกับของเหลวที่ควบแน่นกับลงมายังส่วนที่ระเหยไม่ให้เกิดการชนกันขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้มีการขัดขวางการไหลของสารทำงานภายใน และ

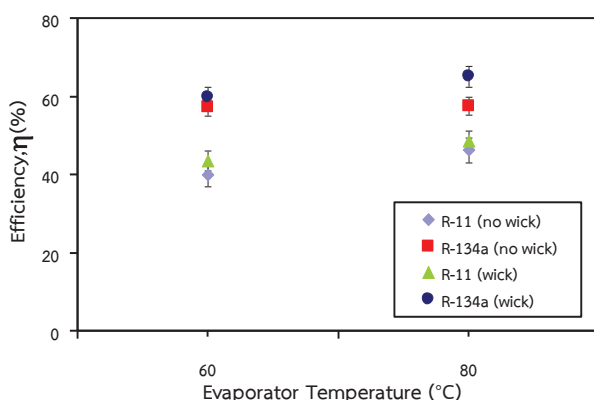
วัสดุพูนยังช่วยในการนำความร้อนที่ดีอีกทางหนึ่ง จึงส่งผลต่อค่าการถ่ายโอนความร้อนที่สูงขึ้นด้วย



**Figure 11** Compare the heat transfer rate of heat pipes with wick and without wick at evaporator temperature 60 and 80°C

#### 4. ค่าประสิทธิภาพของท่อความร้อน

จาก Figure 12 แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของท่อความร้อนที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งวัสดุพูนที่อุณหภูมิส่วนหัวระเหย 60 และ 80°C พบว่าท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูนภายใน ที่อุณหภูมิส่วนหัวระเหย 80°C โดยใช้สารทำงาน R-134a จะมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ 65.2% ซึ่งมากกว่าค่าประสิทธิภาพของท่อความร้อนที่ใช้สารทำงาน R-11 คือ 48.7 เนื่องจากสารทำงาน R-134a มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูง จึงส่งผลต่อการถ่ายโอนความร้อนที่ดี และเมื่อมีการติดตั้งวัสดุพูนภายในจะช่วยในการลำเลียงสารทำงานที่เกิดการควบแน่นที่ส่วนควบแน่นกลับมายังส่วนหัวระเหย เพื่อมารับความร้อน และช่วยให้ของเหลวที่ควบแน่นกระจายตัวรอบผนังของท่อความร้อน ซึ่งเกิดจากแรงยกตัวของวัสดุพูนจึงทำให้ไม่เกิดการชนกันของสารทำงานภายในท่อความร้อน



**Figure 12** Compare the efficiency of heat pipes with wick and without wick at evaporator temperature 60 and 80°C

และเมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลประสิทธิภาพของท่อความร้อนระหว่างสารทำงาน R-134a กับ R-11 ในข้อมูลสารทำงาน R-134a ที่ใช้กับท่อความร้อนที่ไม่ติดตั้งวัสดุพูนกับ สารทำงาน R-11 ที่ใช้กับท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูน ซึ่งจากการวิจารณ์ผลด้านบนที่บอกว่าการติดตั้งวัสดุพูนภายในจะช่วยให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบสารทำงานก็พบว่าท่อที่ไม่ติดตั้งวัสดุพูน โดยใช้สารทำงาน R-134a ให้ค่าประสิทธิภาพที่ดีกว่าท่อที่ติดตั้งวัสดุพูน ที่ใช้สารทำงาน R-11 เนื่องจากคุณสมบัติของสารทำงานที่มีความแตกต่างกัน มีจุดเดือดต่างกัน และลักษณะของสารทำงานที่เมื่อได้รับความร้อนแล้ว เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะภายในที่แตกต่างกัน ก็มีผลต่อการเคลื่อนที่ และแลกเปลี่ยนความร้อนด้วย สามารถบอกได้ว่าปัจจัยที่มีผลการแลกเปลี่ยนความร้อนและประสิทธิภาพที่ได้ มีทั้งวัสดุพูนที่ติดตั้งเพิ่มเข้าไปในท่อความร้อน และชนิดของสารทำงานที่ใช้

#### สรุปผล

จากการวิจารณ์ผลการทดลองตามวัตถุประสงค์ และขอบเขตของงานวิจัย ผู้วิจัยสามารถสรุปผลการวิจัยที่ได้ดำเนินการทดลอง ได้ดังนี้

##### 1. ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก

อุณหภูมิที่ส่วนหัวระเหยที่เพิ่มขึ้นเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อความชื้นที่ลดลงของข้าวเปลือก และสารทำงานภายในท่อความร้อน R-134a ให้การถ่ายโอนความร้อน และแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่าสารทำงาน R-11 และท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูนภายในมีผลในการลดความชื้น ได้ดีกว่าท่อที่ไม่ติดตั้งวัสดุพูน

##### 2. ค่าเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดข้าวเปลือก

เปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าว กข6 และข้าวดอกมะลิ 105 พบว่าที่อุณหภูมิ 60°C จะมีเปอร์เซ็นต์การงอกดีกว่าอุณหภูมิ 80°C เนื่องจากการลดความชื้นที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกค่อยๆ ลดลงทำให้เมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกไม่เสื่อมคุณภาพและเกิดการงอกขึ้น เพราะการลดความชื้นที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกลดอย่างรวดเร็ว จึงทำให้เมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกเสื่อมคุณภาพและเกิดการแตกหักได้ง่าย

##### 3. ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อน

ท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูนภายใน ใช้สารทำงาน R-134a ที่อุณหภูมิส่วนหัวระเหย 80°C จะให้ค่าการถ่ายโอนความร้อนสูงสุด เนื่องจาก R-134a มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอที่สูง และมีจุดเดือดที่ต่ำ เลยเป็นผลให้รับความร้อนที่ส่วนหัวระเหย แล้วเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ ซึ่งเป็นผลต่อความดันของสารทำงานที่เพิ่มขึ้น

อย่างรวดเร็ว จึงทำให้ได้รับความร้อนแล้วเคลื่อนที่ไปยังส่วนควบแน่นได้เร็ว ทำให้ผลของการถ่ายโอนความร้อนดีขึ้น

#### 4. ค่าประสิทธิภาพของท่อความร้อน

ท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูนภายใน ที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 80°C โดยใช้สารทำงาน R-134a จะมีค่าประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากวัสดุพูนจะช่วยให้การลำเลียงสารทำงานที่เกิดการควบแน่นที่ส่วนควบแน่นกลับมายังส่วนทำระเหย เพื่อมารับความร้อน และช่วยให้ของเหลวที่ควบแน่นกระจายตัวรอบผนังของท่อความร้อน ซึ่งเกิดจากแรงยกตัวของวัสดุพูนจึงทำให้ไม่เกิดการชนกันของสารทำงานภายในท่อความร้อน

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยภาพสินธุ์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ และให้คำแนะนำตลอดการวิจัยที่ผ่านมา และการสนับสนุนงบประมาณ จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ วช. ประจำปีงบประมาณ 2561 จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จตามเป้าหมาย

#### เอกสารอ้างอิง

- Madhiyanon T., Soponronnarit S. High temperature spouted bed paddy drying with varied downcomer air flows and moisture contents: Effects on drying kinetics, critical moisture content and milling quality. *Drying Technology*. 2005 ; 23: 473-95
- Soponronnarit S., Yapha M., Prachayawarakorn S. Cross-flow fluidized bed paddy dryer: Prototype and commercialization. *Drying Technology*. 1995 ; 13: 2116-207.
- Kaensup W., Kulwong S., Wongwiset S. A small-scale pneumatic conveying dryer of rough rice. *Drying Technology*. 2006 ; 24: 105-13
- Rittidech S., Donmaung A., Kumsombut K. Experimental study of the performance of a circular tube solar collector with closed-loop oscillating heat-pipe with check valve (CLOHP/CV). *Renewable Energy*. 2009 ; 34: 2234-2238
- Kongboon P., *et al.* Ethanol Distillation with Heat Pipe Solar Collector. Thesis M.Eng. Chiang Mai University. 2003
- Rittidech S., Boonyaem A., Tipnet P. CPU cooling of desktop PC by closed-end oscillating heat pipe (CEOHP). *American Journal Applied Science*. 2005 ; 2(12) : 1574-1577
- Naphon P. On the performance of air conditioner with heat pipe for cooling air in the condenser. *Energy Conversion and Management*. 2010 ; 51: 2362-2366
- Supirattanakul P., Rittidech S., Bubphachot B. Application of a closed-loop oscillating heat pipe with check valves (CLOHP/CV) on performance enhancement in air conditioning system. *Energy and Buildings*. 2011 ; 43: 1531-1535
- ISTA. International Rules for Seed Testing. International Seed Testing Association (ISTA), Brassersdorf, Switzerland. 2014
- Reay D., Kew P., McGlen R. Heat Pipes Theory, Design and Applications. 6<sup>th</sup> Edition. London: Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd ; 2014.
- Sangiamsuk S., Boothaisong S., Dangton W., Rodbumrung A. Solar collector from heat pipe with wick. The 31<sup>st</sup> Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand. 4-7 July 2017. Nakhon Nayok, Thailand ; 2017.
- Myer Kutz. Mechanical Engineers, Handbook: Energy and Power. 3<sup>rd</sup> Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. ; 2006.
- Sangiamsuk S., Boothaisong S., Mungchu A., Rodbumrung A. The effect of the temperature of heat-pipe with wick to reduce the moisture content of paddy. The 33<sup>rd</sup> Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand. 2-5 July 2019. Udon thani, Thailand ; 2019.
- Sinsang S., *et al.* Thermal Characteristics of Heat Pipe with Optimized Sintered Porous Media for Portable Computer Cooling. Thesis M.Eng. Chiang Mai University. 2010.