บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะกล่าวถึงลักษณะของการเก็บรักษาข้าวเปลือก ท่อความร้อนและท่อความร้อนแบบสั่น สมรรถนะการถ่ายเทความร้อน ลักษณะการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ และผลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนรวมไปถึงการประยุกต์ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1. วิธีการเก็บรักษาข้าวเปลือก

ในการเก็บรักษาข้าวเปลือกมีเป้าหมายหลักของการเก็บรักษาข้าวเปลือก คือ ต้องมีการสูญเสียของข้าวเปลือกในขณะเก็บรักษาน้อยที่สุดทั้งด้านปริมาณและคุณภาพ หลักการเก็บรักษาโดยทั่วไป คือ ควรเก็บรักษาข้าวไว้ในสภาพที่มีความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศต่ำ (ในที่แห้งและที่เย็น)

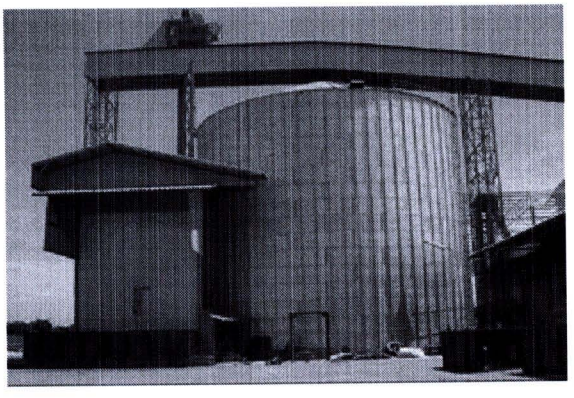
โดยวิธีการเก็บรักษาข้าวเปลือกนั้นโดยทั่วไปทำได้หลายวิธี คือ การเก็บข้าวเปลือกในสภาพปกติโดยที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ เป็นการเก็บข้าวเปลือกไว้ในโรงเก็บปกติที่ไม่มีการควบคุมทั้งอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเก็บซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้อยู่เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากมีการลงทุนและเสียค่าใช้จ่ายไม่สูงมากแต่โอกาสที่จะเกิดความเสียหายในระหว่างการเก็บรักษาสูงแสดงดังภาพ 3

ภาพ 3 การเก็บข้าวเปลือกโดยที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ [15]

การเก็บข้าวเปลือกในสภาพที่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ได้แก่ การเก็บข้าวเปลือกไว้ในภาชนะที่ปิดมิดชิดและสามารถป้องกันการเคลื่อนที่เข้าออกของอากาศได้ เช่น การเก็บเมล็ดพันธุ์ไว้ในถังสังกะสี เป็นต้น ดังภาพ 4 ซึ่งการเก็บข้าวเปลือกไว้ในสภาพปิดเช่นนี้ ความชื้นของข้าวเปลือกก่อนที่จะนำเข้าไปเก็บรักษาจะเป็นตัวกำหนดความชื้นสัมพัทธ์ภายในภาชนะบรรจุ เช่น ถ้าความชื้นของข้าวเปลือกต่ำความชื้นสัมพัทธ์ภายในภาชนะบรรจุก็จะต่ำ ข้าวเปลือกที่เก็บจะเกิดการเสียหายน้อย แต่ถ้าความชื้นของข้าวเปลือกสูง ข้าวเปลือกที่เก็บก็จะเกิดความเสียหายสูงได้เช่นกัน

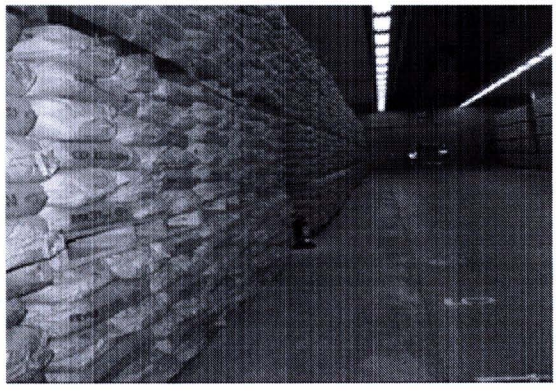
ภาพ 4 การเก็บข้าวเปลือกในสภาพที่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ [15]

การเก็บข้าวเปลือกในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว เช่น การเก็บข้าวเปลือกไว้ในตู้แช่หรือตู้เย็นในไซโลเก็บข้าวที่มีการเป่าลมเย็น ดังภาพ 5



ภาพ 5 การเก็บข้าวเปลือกในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว [15]

การเก็บข้าวเปลือกในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ วิธีนี้เป็นวิธีที่ดีที่สุด สามารถป้องกันและลดความเสียหายของข้าวเปลือกที่เกิดจากรา แมลง หรือความร้อนได้ดี สามารถเก็บรักษาข้าวเปลือกให้คงคุณภาพดีได้เป็นเวลานานแต่มีการลงทุนและเสียค่าใช้จ่ายในการดูแลสูงตามไปด้วย เช่น การเก็บอนุรักษ์เชื้อพันธุ์ข้าวในธนาคารเชื้อพันธุ์ เป็นต้น ดังภาพ 6



ภาพ 6 การเก็บข้าวเปลือกในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ [15]

จากการวิธีการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า การเก็บรักษาข้าวเปลือกในยุ้งฉางที่สภาพปกติและการเก็บในภาชนะที่ปิดมิดชิดเป็นวิธีที่ลงทุนไม่สูงมากแต่โอกาสที่จะเกิดการเสื่อมสภาพหรือความเสียหายของข้าวเปลือกเป็นไปได้สูงหากไม่มีการดูแลอย่างสม่ำเสมอ ส่วนการเก็บข้าวเปลือกในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดแต่มีการลงทุนในด้านการดูแลและการเก็บรักษาสูงด้วยเช่นกัน ส่วนการเก็บข้าวเปลือกในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาข้าวเปลือกโดยทั่วไป เพราะมีประสิทธิภาพรักษาสภาพของข้าวเปลือกที่ดีและมีการลงทุนที่ไม่สูงมากเมื่อมีการเก็บรักษาข้าวเปลือกในปริมาณมากๆ สำหรับการเก็บรักษาข้าวเปลือกในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิเพียงอย่างเดียวจะมีวิธีการระบายความร้อนซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมากคือ การใช้พัดลมเป่า ซึ่งจะเห็นได้ว่ายังคงต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนของค่าไฟฟ้าในแต่ละเดือน

จากวิธีการเก็บรักษาข้าวเปลือกทั้ง 4 แบบที่ได้กล่าวมา พบว่าในงานวิจัยนี้ที่เป็นการเก็บรักษาข้าวเปลือกในถังเก็บที่มีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบเพื่อการระบายความร้อนจะจัดอยู่ในวิธีการเก็บในสภาพที่มีการควบคุมอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว ซึ่งการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ

28 - 29 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเก็บรักษาข้าวเปลือกให้คงสภาพได้ดีและสิ่งที่ควรคำนึงถึงในการเก็บรักษาข้าวเปลือก คือ การรักษาปริมาณและคุณภาพข้าวเปลือกที่เก็บให้คงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเก็บรักษาข้าวเปลือก ได้แก่

1. ความชื้นของข้าวเปลือก โดยทั่วไปความชื้นของข้าวเปลือกไม่ควรสูงเกิน 14 % แต่ถ้าเป็นเมล็ดพันธุ์ความชื้นไม่ควรเกิน 10 %

2. ความสะอาด ข้าวเปลือกที่เก็บต้องสะอาด ไม่มีสิ่งเจือปน เช่น เศษฟาง, ตอซัง, หิน , ดิน, กรวด, วัชพืช, หรือ ทราย เพราะสิ่งเหล่านี้สามารถดูดความชื้นมาได้และจะทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นเพิ่มขึ้นในขณะเก็บรักษา

3. โรค แมลงและศัตรูต่างๆ ข้าวเปลือกที่จะนำเข้ามาเก็บต้องปลอดจากโรค แมลงและศัตรูต่างๆ หากพบควรหาวิธีป้องกันหรือกำจัดที่ถูกต้องและเหมาะสม

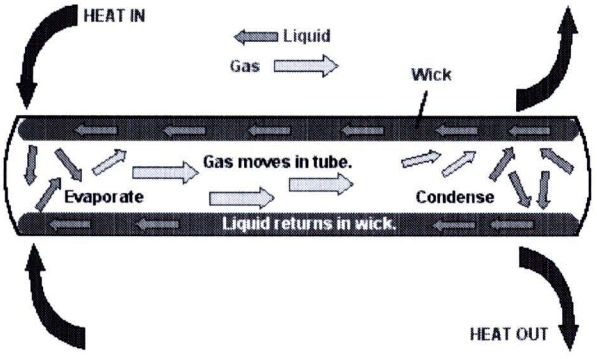
4. ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเก็บให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม

5. ลักษณะและสถานที่ตั้งของโรงเก็บที่ดีควรตั้งอยู่บนที่ดอนและแห้ง มีการระบายน้ำที่ดีเพื่อป้องกันน้ำท่วม รอบๆบริเวณโรงเก็บต้องสะอาด โปร่ง ไม่มีต้นไม้ใหญ่ปกคลุม สภาพโรงเก็บต้องมีผนังปิดมิดชิด แน่นหนา มีหลังคากันแดด กันฝน กันน้ำค้าง ควรยกพื้นสูงเพื่อให้มีการถ่ายเทอากาศด้านล่าง ตามช่องเปิดต่างๆควรมีตาข่ายป้องกัน นก หนู และสัตว์ศัตรูต่างๆ

6. ในขณะเก็บรักษา ควรมีการตรวจสอบข้าวเปลือกที่เก็บและโรงเก็บเป็นระยะๆ

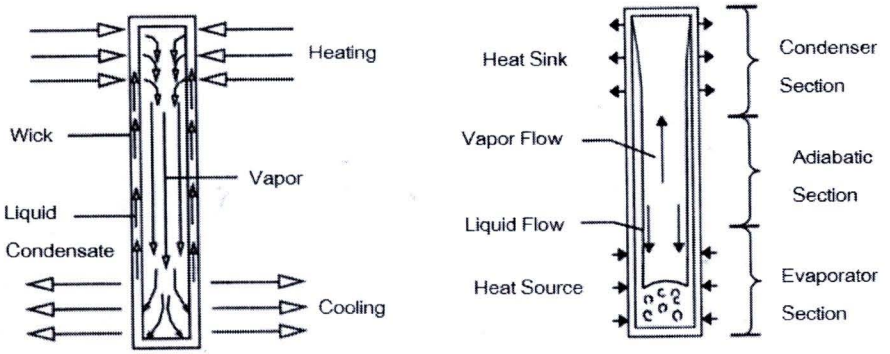
2. ลักษณะของท่อความร้อนและท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

ท่อความร้อน (Heat pipe) เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบปิดสองสถานะที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งทำจากท่อโลหะภายในท่อจะประกอบด้วย วัสดุพรุน และสารทำงานดังที่แสดงในภาพ 7 โดยทั่วไปท่อความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็นสามส่วนคือ ส่วนทำระเหย ส่วนควบแน่นและส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน หลักการทำงานของท่อความร้อนคือ เมื่อมีการให้ความร้อนที่ส่วนทำระเหยสารทำงานที่เป็นของเหลวจะกลายเป็นไอทำให้ไหลไปยังส่วนควบแน่นและเมื่อไอที่ส่วนควบแน่นมีการถ่ายเทความร้อนออกก็จะกลับมาเป็นของเหลวไหลไปยังส่วนทำระเหยโดยอาศัยแรงคาปิลลารีผ่านวัสดุพรุนหรือแรงโน้มถ่วงของโลกและจะทำงานเป็นวัฏจักร



ภาพ 7 ส่วนประกอบภายในของท่อความร้อนแบบมีวัสดุพรุน [16]

จากหลักการของเหลวได้กลายเป็นไอและเคลื่อนตัวไปยังส่วนควบแน่นนั้นจะมีการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยความร้อนแฝงซึ่งได้จากการเปลี่ยนสถานะ ข้อดีของการใช้ท่อความร้อนเป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายความร้อนนอกจากมีค่าการนำความร้อนสูงแล้วยังไม่ต้องใช้พลังงานในการขับเคลื่อนระบบ มีน้ำหนักเบา สร้างและบำรุงรักษาง่าย สะดวกต่อการติดตั้งเนื่องจากท่อความร้อนสามารถทำงานได้ทุกตำแหน่งการวาง



(a) **ท่อความร้อนมีวัสดุพรุน** (b) **ท่อเทอร์โมไซฟอน**

ภาพ 8 ลักษณะของท่อความร้อนธรรมดา [13]

ท่อความร้อนธรรมดา ถูกสร้างขึ้นโดย Gaugler ในช่วงประมาณปี ค.ศ. 1942 เป็นท่อปลายปิดที่มีสารทำงานปริมาณหนึ่งบรรจุไว้ภายใน ดังภาพ 8 (a) โดยที่ของเหลวจะรับความร้อนและกลายเป็นไอในส่วนบนของท่อ หลังจากนั้นไอจะเคลื่อนที่มายังด้านล่างส่วนควบแน่นและคายความร้อนออกมาเพื่อเปลี่ยนเป็นของเหลว แล้วอาศัยแรงคาปิลลารีที่เกิดจากโครงสร้างวัสดุพรุน

(Wick structure) ภายในท่อ ดึงของเหลวนี้กลับขึ้นไปด้านบนไปยังแหล่งกำเนิดความร้อนอีกครั้งหนึ่ง หากแหล่งกำเนิดความร้อนอยู่ต่ำกว่าแหล่งระบายความร้อนดังภาพ 8 (b) ท่อความร้อนก็ไม่จำเป็นต้องใช้โครงสร้างวัสดุพรุน เนื่องจากอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกดึงสารทำงานเหลวกลับลงมายังแหล่งกำเนิดความร้อนแทน ซึ่งเรียกท่อความร้อนธรรมดานี้ว่า เทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) ซึ่งท่อความร้อนถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการพัฒนาทางเทคโนโลยีแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ มีขนาดเล็กลงและมีความร้อนที่ต้องระบายออกสูงขึ้น ดังนั้นท่อความร้อนที่นำมาใช้กับงานนี้ จึงต้องมีขนาดเล็กลง แต่ต้องสามารถดึงความร้อนออกจากแผงวงจรได้มากขึ้น การลดขนาดท่อความร้อนลงอย่างมากจนถึงระดับไมโครเมตรหรือคาปิลลารี (Capillary tube) มีผลทำให้เกิดขีดจำกัดการส่งผ่านความร้อนขึ้น นั่นคือ ขีดจำกัดคาปิลลารีซึ่งเกิดจากโครงสร้างวัสดุพรุน (Wick structure) จึงไม่สามารถนำของเหลวย้อนกลับมายังส่วนทำระเหยได้อย่างเพียงพอ

สำหรับท่อความร้อนธรรมดาที่มีวัสดุพรุนยังมีขีดจำกัดอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดคือ เมื่ออุณหภูมิแตกต่างระหว่างแหล่งให้ความร้อนกับแหล่งระบายความร้อนมีค่าเพิ่มจนถึงจุดๆหนึ่งซึ่งจะมีค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด เรียกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนวิกฤต (Critical heat flux) ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการถ่ายเทความร้อนซึ่งมีอยู่หลายประการด้วยกันคือ

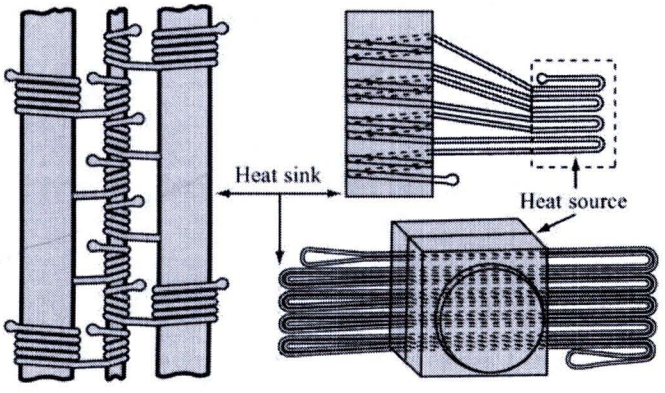
1. ขีดจำกัดความดันไอ (Vapor pressure limit) ที่ภาวะอุณหภูมิการทำงานต่ำ ความหนืดอาจจะมีอิทธิพลเหนือกว่าความดันไอทำให้การไหลไหลลงมา สำหรับท่อความร้อนที่ใช้โลหะเหลว (Liquid-metal) เป็นสารทำงาน ความดันที่ปลายส่วนควบแน่นอาจจะลดลงเหลือศูนย์ ขีดจำกัดความดันไอ (ขีดจำกัดความหนืด) เกิดขึ้นเมื่อท่อความร้อนทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงการทำงานปกติ อย่างเช่น ระหว่างเริ่มทำงานจากสถานะเยือกแข็ง ในกรณีนี้ความดันไอน้อยมากที่ปลายส่วนควบแน่นจนเกือบจะเป็นศูนย์

2. ขีดจำกัดเนื่องจากการเดือด (Boiling limit) จะเกิดขึ้นในสภาวะที่มีการป้อนฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) เข้าสู่ช่วงการระเหยสูงๆทำให้เกิดการเดือดและฟองไอ (Vapor bubble) ไปรวมตัวกับฟิล์มของไอที่ผนังอย่างรวดเร็ว ฟิล์มไอนี้จะเป็นฉนวนไม่ให้เกิดการระเหยจากผิวของเหลว และกันความร้อนไม่ให้ผ่านผนังทำให้อุณหภูมิของผนังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเกิดเป็นจุดร้อนจัด (Hot spot) ขึ้นขัดขวางการหมุนเวียนของของเหลว

3. ขีดจำกัดหมุนเวียน (Countercurrent flow limit) เมื่อเติมสารทำงานที่เพียงพอที่ไม่ทำให้เกิดการแห้ง (Dry out) อัตราการถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นที่มักจะเกิดขึ้นคือ

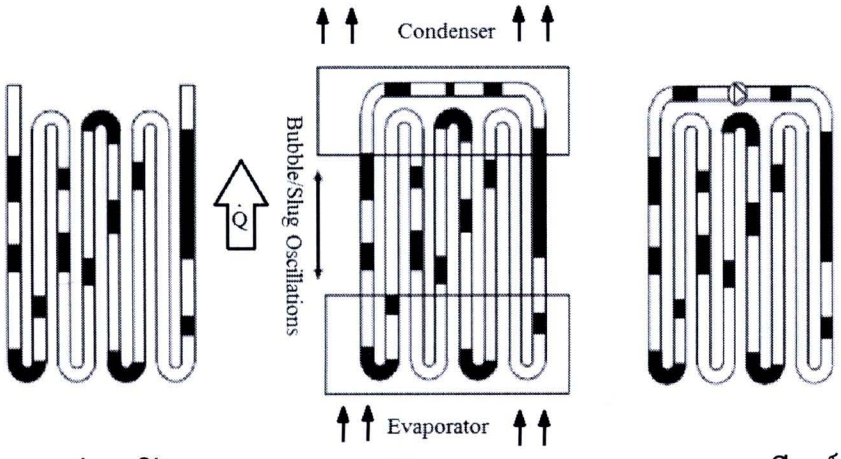
แรงดันไอของสารทำงานจะดันสารทำงานที่กลั่นตัวเป็นของเหลวไม่ให้ไปยังส่วนทำระเหย เกิดเป็นแอ่งของเหลว เรียกปรากฏการนี้ว่า Flooding หรือ Entrainment limit

จะเห็นได้ว่าปัญหาของท่อความร้อนธรรมดาคือ ขีดจำกัดทางด้านแรงคาปิลลารีและขีดจำกัดการหมุนเวียนเมื่อท่อมีขนาดเล็กมาก เพื่อแก้ปัญหานี้จึงมีการพัฒนาท่อความร้อนชนิดใหม่ขึ้นเรียกว่า ท่อความร้อนแบบสั่น (Pulsating or Oscillating heat pipe, OHP) ถูกค้นพบโดย Akachi ในปี ค.ศ. 1990 [12] มีลักษณะดังภาพ 9



ภาพ 9 ท่อความร้อนแบบสั่น [17]

ท่อความร้อนแบบสั่นได้ถูกสร้างขึ้นจากท่อขนาดคาปิลลารีเดี่ยวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเล็กมากและไม่มีโครงสร้างวัสดุพรุนภายในท่อ นำมาดัดขดไปมาระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อนและแหล่งระบายความร้อนเกิดเป็นโค้งเลี้ยวขึ้น (Meandering turns) เนื่องจากผลของความตึงผิวทำให้สารทำงานปริมาณหนึ่งที่บรรจุอยู่ภายในท่อเรียงตัวอยู่ในรูปแท่งของเหลว (Liquid slug) และฟองไอ (Vapor bubble) สลับกันไปตลอดความยาวทั้งหมดของท่อ การถ่ายเทความร้อนจะเกิดจากการเคลื่อนที่แบบสั่นของสารทำงานที่เกิดขึ้นด้วยการกระตุ้นการสั่นด้วยตัวมันเอง (Self-excite oscillation) โดยทั่วไปสามารถแบ่งท่อความร้อนแบบสั่นได้ 3 ประเภท ตามลักษณะโครงสร้างของท่อดังภาพ 10



(a) **ปลายปิด** (b) **วงรอบ** (c) **วงรอบแบบมีวาล์วกันกลับ**

ภาพ 10 ประเภทของท่อความร้อนแบบสั่น [14]

โดยภาพ 10 (a) แสดงท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด (Closed-end oscillating heat pipe, CEOHP) ซึ่งปลายท่อทั้งสองถูกปิดและแยกออกจากกัน ภาพ 10 (b) ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบซึ่งจะเชื่อมปลายทั้งสองข้างเข้าด้วยกัน (Closed-loop oscillating heat pipe, CLOHP) ภาพ 10 (c) ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีวาล์วกันกลับซึ่งจะเชื่อมปลายทั้งสองข้างเข้าด้วยกันและภายในมีวาล์วกันกลับ (Closed-loop oscillating heat pipe with check valve, CLOHP/CV) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลของสารทำงาน

เมื่อมีการให้ความร้อนที่แหล่งกำเนิดความร้อน ความร้อนจะไปสร้างฟองไอเพิ่มขึ้นทำให้แท่งของเหลวถูกผลักไปยังส่วนควบแน่น ทำให้สารทำงานเกิดการไหลขึ้นและที่แหล่งระบายความร้อน ความร้อนจะถูกถ่ายเทออกไปทำให้ฟองไอจะยุบตัวลงหรือกลายเป็นของเหลวไปรวมกับแท่งของเหลวที่อยู่ติดกันทำให้เกิดแรงไหลย้อนกลับไปยังแหล่งกำเนิดความร้อน และเมื่อการไหลของทั้งสองแหล่งไหลชนกันทำให้เกิดการสั่นขึ้นตามแนวแกนการไหลของท่อ ซึ่งปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของสารทำงานภายในท่อความร้อนนี้จึงมีความซับซ้อนมาก

ถึงแม้ว่าท่อความร้อนแบบสั่นที่มีวาล์วกันกลับจะทำให้สารทำงานไหลเวียนได้ง่ายในทิศทางที่กำหนดแต่มีความยุ่งยากในการสร้าง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิดกับท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบซึ่งสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบจะมีฟลักซ์ความร้อนสูงกว่าท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิดอย่างเห็นได้ชัด จึงมีความสนใจในการนำท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 18 ต.ค. 2555
250039
เลขทะเบียน.....
เลขเรียกหนังสือ.....

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

ท่อความร้อนแบบสั่นจะสามารถทำงานได้โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของก้อนของเหลวและฟองไอภายในท่อซึ่งจะเกิดขึ้นได้นั้นสารทำงานจะต้องมีการจัดตัวอยู่ในรูปฟองไอและก้อนของเหลวสลับกันไปและการที่สารทำงานจะสามารถจัดตัวให้อยู่ในรูปก้อนของเหลวและฟองไอได้นั้นจะพิจารณาถึงแรงตึงผิวและความหนาแน่นของสารทำงานที่อุณหภูมิทำงานเพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสูงสุดของท่อความร้อนแบบสั่นได้ดังสมการที่ 2

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

โดยที่ $D_{i,\max}$ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสูงสุด, เมตร

σ คือ แรงตึงผิวของสารทำงาน, นิวตันต่อเมตร

ρ_l คือ ความหนาแน่นของสารทำงาน, กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, เมตรต่อวินาที^{2}

4. ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

การนำความร้อนเป็นปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของความร้อน จากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่อุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่โมเลกุลของตัวกลางมีการสัมผัสกันโดยตรง ปริมาณของความร้อนที่เกิดการถ่ายโอนนั้นมีค่าแปรผันกับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิตามระยะทางดังสมการที่ 3 ซึ่งเป็นการนำความร้อนในลักษณะสองมิติตามแนวแกน x และ y โดยขึ้นอยู่กับเวลาและมีความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวกลาง

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k\left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right] + \dot{q}_{gen} \tag{3}$$

กระบวนการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนเป็นปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของพลังงาน จากแหล่งอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่โมเลกุลตัวกลางมีการเคลื่อนที่ไปด้วย ตัวอย่างเช่น การเคลื่อนที่ของลมที่ผ่านหน้าขดลวดความร้อน ซึ่งลมดังกล่าวก็จะมีอุณหภูมิสูงตามไปด้วย การพาความร้อนสามารถจำแนกได้ออกเป็น 2 แบบดังนี้

1. การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection) กลไกการเกิดการถ่ายโอนความร้อนมักเกิดเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นในระบบ ตัวอย่างเช่น ถ้าในบ้านมีอุณหภูมิสูงกว่าภายนอกเมื่อเปิดหน้าต่างลมจากภายนอกจะพัดเข้ามาแล้วพาความร้อนในบ้านออกไปทำให้ภายในบ้านมีอุณหภูมิลดลง เป็นต้น ซึ่งการถ่ายเทความร้อนในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นค่อนข้างช้า

2. การพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่พร้อมๆกับทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อน ซึ่งจะต้องอาศัยอุปกรณ์ช่วย ตัวอย่างเช่น การใช้พัดลมระบายความร้อน โดยการพาความร้อนแบบบังคับนี้จะมีประสิทธิภาพมากกว่าการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

ไม่ว่าจะเป็นการถ่ายโอนความร้อนแบบพาในลักษณะใดก็ตามแต่มีสมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการถ่ายโอนความร้อนเหมือนกันคือ

$$q = hA\Delta T \tag{4}$$

เมื่อ q คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดการถ่ายโอนเนื่องจากการพา, วัตต์

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, วัตต์ต่อตารางเมตร-เคลวิน

A คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน, ตารางเมตร

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ

5. การถ่ายเทความร้อนใน 2 มิติ

ในการหาสมการ Finite-Difference สำหรับโนดแต่ละโนดนั้น จะต้องใช้การประยุกต์จากกฎการอนุรักษ์พลังงานของปริมาตรควบคุมของโนดนั้นๆ สำหรับการนำความร้อนในสภาวะคงตัวและมีแหล่งกำเนิดความร้อน ซึ่งข้าวเปลือกถือว่ามีแหล่งกำเนิดความร้อนเนื่องจากกระบวนการหายใจของข้าวเปลือก โดยสามารถเริ่มต้นพิจารณาจากสมการการสมดุลพลังงานได้ดังนี้

$$\dot{E}_g + \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \tag{5}$$

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

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

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

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

ในการคำนวณอุณหภูมิข้าวเปลือกกำหนดให้สภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตพิจารณาเป็นไปดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \qquad \text{ที่ } r = 0 \tag{6}$$

$$T(r,z,0) = T_0(r,z) \qquad \text{ที่ } t = 0 \tag{7}$$

$$-k_{eff}\frac{\partial T}{\partial r} = h_s(T - T_a) \qquad \text{ที่ } r = I \tag{8}$$

$$-k_{eff}\frac{\partial T}{\partial z} = h_t(T - T_a) \qquad \text{ที่ } z = J \tag{9}$$

$$-k_{eff}\frac{\partial T}{\partial z} = h_b(T - T_a) \qquad \text{ที่ } z = 0 \tag{10}$$

พลังงานที่เกิดจากข้าว คือ ความร้อนของข้าวเปลือกที่เกิดการหายใจของข้าวเปลือก ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อข้าวเปลือกมีการหายใจเกิดขึ้นจะมีความร้อนในข้าวเปลือกซึ่งเป็นความสัมพันธ์กับฟังก์ชั่นของเวลาและความร้อนที่เกิดขึ้นจากการหายใจในแต่ละช่วงเวลาสามารถคำนวณได้จากสมการของ Seib, et al. (1980) [24] ดังนี้

$$Term = A\left(\frac{t}{1000}\right)^C \exp[D(1.8T_b - 28)]\exp[E(M_w - 0.14)] \tag{11}$$

โดยที่ $A = 0.041889$, $C = 0.4101$, $D = 0.0274$, $E = 35.63$

M_w คือ ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก, %

T_b คือ อุณหภูมิในข้าวเปลือก, องศาเซลเซียส

t คือ ช่วงเวลาในการเก็บข้าวเปลือก, ชั่วโมง

ความเสียหายเนื่องจากความร้อนในข้าวเปลือก จะหาได้จากสมการที่ 12 และ 13 ดังนี้

$$DML = 1 - \exp(-Term) \tag{12}$$

$$\Delta T = \frac{15778(DML)}{c_p} \tag{13}$$

โดยที่ DML คือ Dry matter loss

c_p คือ ค่าความจุความร้อนของข้าวเปลือก, กิโลจูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน

ΔT คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิในข้าวเปลือก, องศาเซลเซียส

ความร้อนของข้าวเปลือกมีความสัมพันธ์กับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิได้จากสมการที่ 14

$$Q_{Paddy} = mc_p\Delta T \tag{14}$$

โดยที่ Q_{Paddy} คือ ความร้อนของข้าวเปลือก, วัตต์

m คือ มวลของข้าวเปลือกในปริมาตรควบคุม, กิโลกรัม

ประสิทธิภาพของระบบการระบายความร้อนด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบเป็นสัดส่วนของความสามารถในการระบายความร้อนได้ของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบต่อความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาข้าวเปลือก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 15

$$\eta = \frac{Q_{CLOHP}}{Q_{Paddy}} \times 100 \tag{15}$$

โดยที่ η คือ ประสิทธิภาพของระบบการระบายความร้อนด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

Q_{CLOHP} คือ ความร้อนที่ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบสามารถระบายได้, วัตต์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

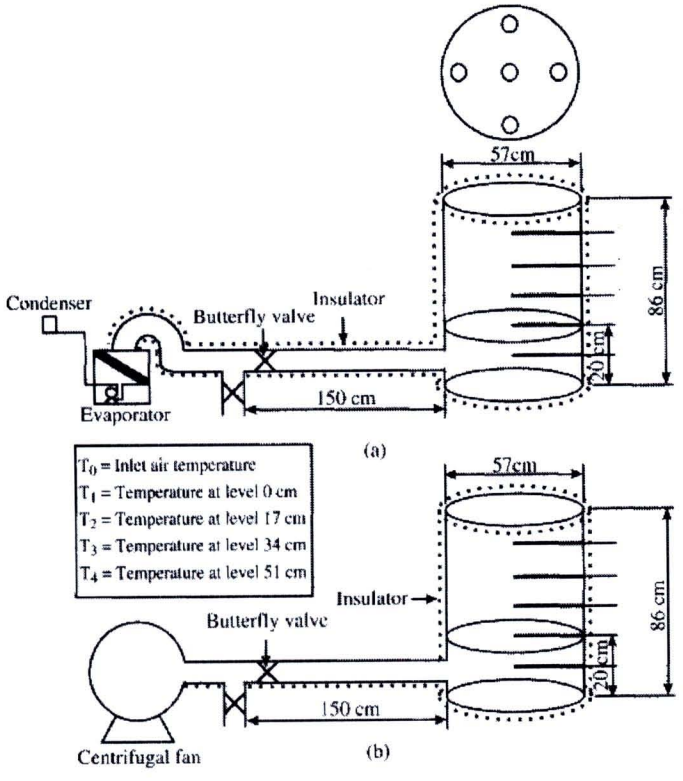
1. รูปแบบของการเก็บรักษาข้าวเปลือก

จากงานวิจัยของ สุภัทร หนูสวัสดิ์, พิมล วุฒิสินธ์, นิทัศน์ ตั้งพินิจกุล, ยงยุทธ คงซ่าน, สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, วิบูลย์ เทเพนทร์, และไมตรี แนวพานิช (1994) [1] ได้ศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของข้าวเปลือกระหว่างการเก็บรักษาในไซโลเหล็กเป็นเวลา 7 เดือน เพื่อนำข้อมูลพื้นฐานที่ได้มาวิเคราะห์หาสาเหตุของการเสื่อมคุณภาพและแนวทางการปฏิบัติเพื่อป้องกันการเสื่อมคุณภาพของข้าวเปลือกระหว่างการเก็บรักษาในไซโลเหล็ก โดยการทดลองใช้ไซโลเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร สูง 6 เมตร จำนวน 3 ไซโล บรรจุข้าวเปลือกได้ไซโลละ 20 ตัน จากผลการวิเคราะห์ตัวอย่างข้าวเปลือกที่สุ่มมาทุกเดือนและข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในไซโล พบว่าสาเหตุของการเสื่อมคุณภาพของข้าวเปลือกระหว่างการเก็บรักษาในไซโล เกิดจากการหายใจของข้าวเปลือกและแมลง ซึ่งในกระบวนการหายใจจะเกิดการคายความร้อนและความชื้นจากข้าวเปลือกสู่บรรยากาศในกองข้าวเปลือก ทำให้อุณหภูมิของข้าวเปลือกบริเวณกึ่งกลางของไซโลสูงกว่าอุณหภูมิที่ผนัง 5 - 10 องศาเซลเซียส อากาศร้อนชื้นจะลอยตัวขึ้นจึงทำให้เกิดการหมุนเวียนของอากาศภายในไซโล และอาจเกิดการควบแน่นเป็นหยดน้ำที่ผนังซึ่งมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า โดยความชื้นข้าวเปลือกบริเวณริมผนังไซโลเริ่มสูงขึ้นหลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลา 5 เดือน ข้าวเปลือกตัวอย่างถึงแม้ว่าจะยังอยู่ในสภาพดีหลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลานาน 7 เดือน แต่ลักษณะของความชื้นที่เริ่มสูงขึ้นหลังจากการเก็บรักษานาน 5 เดือน จึงไม่ควรเก็บข้าวเปลือกนานกว่า 4 เดือน ซึ่งจากผลการทดลองนี้ทำให้ทราบถึงแนวทางในการใช้ไซโลเหล็กในการเก็บรักษาให้ปลอดภัยจากการเสื่อมคุณภาพ โดยภายในไซโลจำเป็นจะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดอุณหภูมิภายในไซโลและระบบระบายความร้อนและอากาศที่เหมาะสม

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ ทิพาพร อยู่วิทยา และ อรรถพร อภิวัฒนานุกูล (1995) [2] ได้ศึกษาการชะลอความเสียหายของกองข้าวเปลือกชื้นโดยการระบายอากาศ ซึ่งแบ่งการทดลองเป็น 2 การทดลองคือ การระบายอากาศโดยการเป่าอากาศเย็นที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส อย่างต่อเนื่อง และการระบายอากาศโดยการเป่าอากาศแวดล้อมอย่างต่อเนื่องโดยเปรียบเทียบกับข้าวเปลือกที่ไม่มีการระบายอากาศซึ่งกองข้าวเปลือกมีความชื้นเฉลี่ย 22.2 % มาตรฐานเปียก จากการทดลองพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 34 วัน การระบายอากาศโดยการเป่าอากาศเย็นทำให้ความชื้นเฉลี่ยของกองข้าวเปลือกลดลงเหลือ 14 % มาตรฐานเปียก อุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกลดลงเหลือ 20 องศาเซลเซียส ส่วนของการระบายอากาศโดยใช้อากาศแวดล้อมทำให้ความชื้นลดลงเหลือ 17 % มาตรฐานเปียก และเมื่อพิจารณาคุณภาพหลังการสีในแง่ของความขาวของเมล็ดข้าวสาร พบว่าการระบายอากาศโดยใช้อากาศแวดล้อมให้คุณภาพดีกว่ากรณีที่ไม่ได้ระบายอากาศ

และการระบายด้วยอากาศเย็น ซึ่งให้คุณภาพทั้งในแง่ของความขาวและเปอร์เซ็นต์ข้าวสารเต็มเมล็ดสูงสุด ซึ่งทำให้เห็นได้ว่าไม่มีความจำเป็นในการใช้อากาศเย็นในการระบายอากาศสำหรับการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ไม่ใช่เมล็ดพันธุ์

ต่อมาผลงานวิจัยของ A. Apivathananukul, et al. (1996) [4] ได้ศึกษาการชะลอการเสียหายของข้าวเปลือกชื้นโดยการระบายด้วยอากาศเย็นและอากาศแวดล้อมแบบต่อเนื่องและแบบเป็นช่วงดังภาพ 11 โดยใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 21.0, 22.2 และ 26.0 % มาตรฐานเปียก ซึ่งพบว่าสามารถลดอุณหภูมิข้าวเปลือกเหลือระดับ 20 องศาเซลเซียส และใกล้เคียงอากาศแวดล้อมในเวลา 1 วัน และสามารถรักษาคุณภาพข้าวเปลือกให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้นานกว่า 1 เดือน ทั้งสองกรณี และระบบที่มีการระบายด้วยอากาศเย็นและอากาศแวดล้อมเสียค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน 236.1 และ 13.7 บาท/ลูกบาศก์เมตร-ข้าวเปลือก ตามลำดับ สำหรับกรณีที่ไม่มีการระบายความร้อนพบว่าสามารถรักษาคุณภาพของข้าวเปลือกไว้ได้น้อยกว่า 5 วัน



ภาพ 11 ชุดทดลองการชะลอการเสียหายของข้าวเปลือกชื้นโดยการระบายอากาศ [4]

(a) การระบายอากาศด้วยอากาศเย็น

(b) การระบายอากาศด้วยอากาศแวดล้อม

จากผลงานวิจัยของ ศรีสมร ทวีโชคชาญชัย (1997) [5] ได้ศึกษาแนวทางชะลอการเสื่อมคุณภาพข้าวเปลือกความชื้นสูง โดยการฝังท่อเพื่อระบายอากาศออกจากกองข้าวเปลือกในระหว่างที่ไม่สามารถทำการตากหรืออบลดความชื้นได้ ซึ่งแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหารูปแบบและความเป็นไปได้ในการระบายอากาศโดยการฝังท่อและการศึกษาเพื่อปรับปรุงวิธีการฝังท่อให้สามารถระบายอากาศได้ดีขึ้น โดยมีค่าชี้วัดผลการศึกษาคือ อุณหภูมิบริเวณตำแหน่งต่างๆ ในกองข้าวเปลือก, เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว, เปอร์เซ็นต์ข้าวสารรวม, และเปอร์เซ็นต์ความขาวของข้าวสาร ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

ในการศึกษาเบื้องต้นพบว่า การฝังท่อระบายอากาศทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวและเปอร์เซ็นต์ข้าวสารรวมใกล้เคียงกันกับข้าวที่ไม่ฝังท่อระบายอากาศ แต่สิ่งที่เห็นได้ชัดคือ การที่อุณหภูมิภายในกองข้าวที่มีการฝังท่อระบายอากาศต่ำกว่ากองข้าวที่ไม่มีการระบายอากาศถึง 18.17 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลให้สีของข้าวต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยได้เปอร์เซ็นต์ความขาวของข้าวสารสูงกว่าข้าวที่ไม่ระบายอากาศ 5.82 ถึง 16.50 % และมีความขาวน้อยกว่าข้าวที่ตากแผ่เพียง 3 %

ส่วนการศึกษาภาคสนามจะทดสอบกับข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยกองข้าวบนโครงไม้ไผ่ยกพื้นโปร่งเปรียบเทียบกับข้าวที่ไม่มีการระบายอากาศและข้าวที่ตากแผ่ จากการทดลองพบว่าข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงหากไม่มีการระบายอากาศมีเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสูงกว่าข้าวที่มีการระบายอากาศและข้าวจากการตากแผ่ แต่มีความขาวของข้าวสารต่ำกว่าข้าวจากกองที่มีการระบายอากาศ และข้าวจากการตากแผ่ถึง 18.34 และ 22.00 % ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองโดยรวมพบว่า การระบายความร้อนออกจากกองข้าวโดยการกองข้าวบนโครงไม้ไผ่ยกพื้นโปร่งเป็นวิธีที่สามารถชะลอการเสื่อมคุณภาพข้าวที่มีความชื้นสูงได้โดยไม่ทำให้คุณภาพของข้าวลดลงมาก

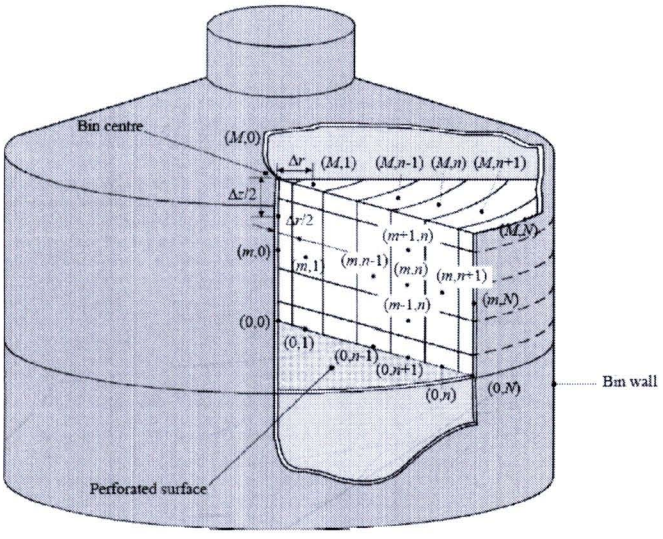
จากการที่ได้ศึกษาในเรื่องของการเก็บรักษาข้าวเปลือกจะเห็นได้ว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ที่ผ่านมาจะเน้นการศึกษาทางด้านการระบายความร้อนด้วยการใช้พัดลมซึ่งมีหลากหลายรูปแบบแตกต่างกันออกไป จึงทำให้เห็นว่าการระบายความร้อนที่เกิดจากกระบวนการหายใจของข้าวเปลือกมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงกับคุณภาพและระยะเวลาในการเก็บรักษาข้าวเปลือก และเพื่อให้ได้ระบบที่มีการระบายความร้อนที่ดีและเหมาะสมต่อการเก็บรักษาข้าวเปลือกจึงมีความจำเป็นในการศึกษาลักษณะการกระจายอุณหภูมิของข้าวเปลือกในระหว่างที่เก็บรักษาต่อไป

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

2. ลักษณะแบบจำลองของการกระจายอุณหภูมิภายในถังเก็บข้าวเปลือก

จากงานวิจัย นราธิป ศุขโข และคณะ (1996) [3] ได้ศึกษาการกระจายอุณหภูมิภายในแบบจำลองไซโลเก็บข้าวเปลือก โดยใช้ผลิตผลทางการเกษตรที่ยังไม่ได้แปรรูปที่อยู่ในช่วงการเก็บรักษาจะเก็บไว้ในไซโล โดยสร้างแบบจำลองที่เป็นถังทรงกระบอกตั้งอยู่ภายในพื้นที่ปิดเพื่อทำให้การให้ความร้อนกับแบบจำลองสามารถควบคุมได้ ความร้อนที่ให้กับแบบจำลองได้จากขดลวดความร้อนที่ติดตั้งอยู่รอบๆ โดยการให้ความร้อนจะกระทำที่อุณหภูมิคงที่ การควบคุมการทำงานของขดลวดความร้อนทำด้วยสัญญาณจากเทอร์โมสตัท (Thermostat) เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายของอุณหภูมิภายในแบบจำลอง จากการทดลองพบว่าภายในแบบจำลองที่ระยะรัศมีเดียวกันแต่ความสูงต่างกันอุณหภูมิจะไม่เท่ากัน โดยที่ส่วนบนจะมีอุณหภูมิสูงและจะลดลงตามความสูงที่ลดลง ทั้งนี้เกิดจากความชื้นภายในแบบจำลองได้รับความร้อนแล้วลอยตัวสูงขึ้นและอุณหภูมิบริเวณกลางแบบจำลองจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากหรือไม่เปลี่ยนแปลงเลย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความร้อนจากภายนอกมีผลต่ออุณหภูมิบริเวณกลางแบบจำลองน้อยมาก

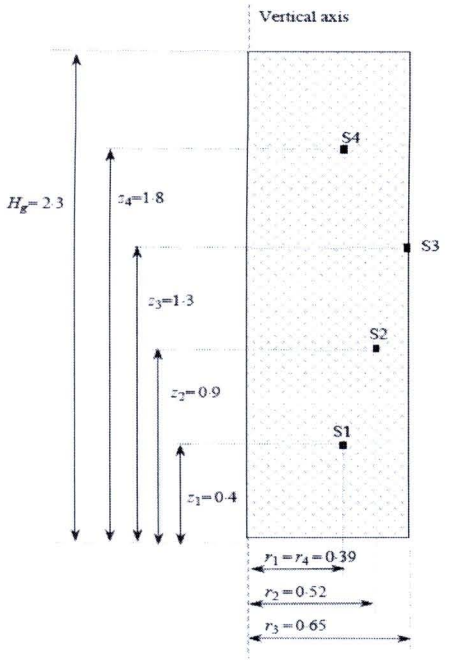
จากผลงานวิจัยของ A. Iguaz, et al. (2003, 2004) [7, 21] ได้ศึกษาและทำการทดลองเพื่อศึกษาการกระจายอุณหภูมิและหาคุณสมบัติทางความร้อนเชิงกายภาพของข้าวเปลือก ได้แก่ ความหนาแน่น, ค่าความจุความร้อนจำเพาะ และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของข้าวเปลือก โดยอธิบายถึงผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นในแต่ละค่าของคุณสมบัติทางความร้อน ซึ่งขนาดของถังเก็บมีความสูง 155 มิลลิเมตร ความกว้าง 70.79 มิลลิเมตร ความลึก 71 มิลลิเมตร ความชื้นของข้าวเปลือก 14.9 – 16.6 % จากผลการทดลองอุณหภูมิในช่วง 3 – 41 องศาเซลเซียส มีค่าความจุความร้อนจำเพาะ 1.1502 – 2.1464 กิโลจูลต่อกิโลกรัม-องศาเซลเซียส ที่ความชื้น 5.45 – 24.4 % ในขณะที่สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของข้าวเปลือกอยู่ระหว่าง 0.0758 – 0.1472 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส ที่ความชื้น 8.25 – 25.08 % ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อค่าความร้อนจำเพาะค่าการนำความร้อนของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิและความชื้นเพิ่มขึ้นด้วย โดยการจำลองและทดสอบการถ่ายเทความร้อนในการเก็บข้าวเปลือกโดยไม่มีการระบายอากาศ ซึ่งได้กล่าวถึงอุณหภูมิและความชื้นเนื่องจากเป็นตัวแปรที่สำคัญในการเก็บรักษาข้าวเปลือกโดยที่ไม่มีการระบายอากาศ ในแบบจำลองนี้เป็นการนำวิธี finite difference มาใช้ในการจำลองระบบเพื่อที่จะทำนายค่าของอุณหภูมิและความชื้นในการเก็บรักษาข้าวเปลือกภายในถังเก็บรักษาดังภาพ 12



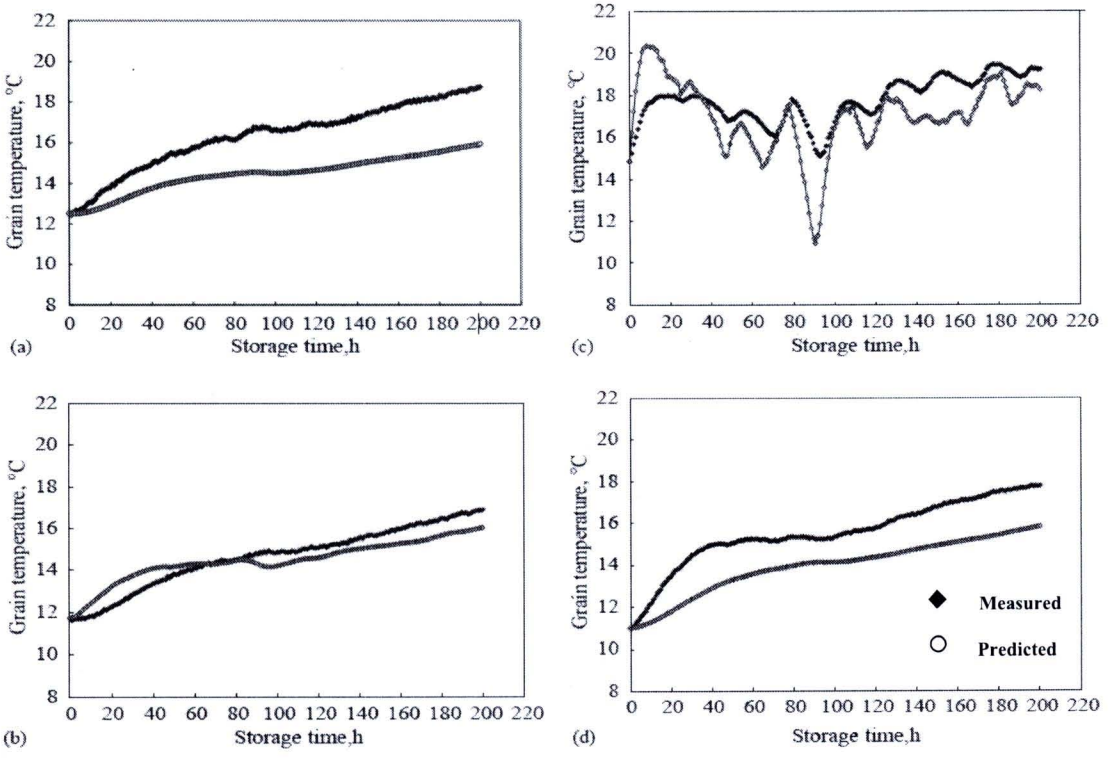
ภาพ 12 ลักษณะของถังเก็บและการแบ่งระยะในแนวระดับและรัศมี [21]

โดยการทดลองนี้จะใช้ถังทรงกระบอกโลหะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.3 เมตร และความสูง 3.95 เมตร ซึ่งสามารถบรรจุข้าวได้ 1,800 กิโลกรัมและความชื้นของข้าวเปลือกเริ่มต้น 10.6 % โดยในการวัดอุณหภูมิจะแบ่งออกเป็น 4 ตำแหน่งโดยแต่ละตำแหน่งจะมีระยะห่างที่แตกต่างกันไปซึ่งแสดงดังภาพ 13

และจากภาพ 14 (a) ตำแหน่ง S1, (b) ตำแหน่ง S2, (c) ตำแหน่ง S3, และ (d) ตำแหน่ง S4 โดยที่กราฟเส้นรูปสี่เหลี่ยมข้าวหลาวตัดจะเป็นผลที่ได้จากการทดลอง ส่วนกราฟเส้นรูปวงกลมเป็นผลที่ได้จากแบบจำลอง ซึ่งจากการทดลองพบว่าแบบจำลองของงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการทำนายอุณหภูมิของข้าวเปลือกในการเก็บรักษาที่ไม่มีการระบายอากาศได้ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน 0.62 – 2.03 องศาเซลเซียส โดยงานวิจัยที่กล่าวมามีสมการของคุณสมบัติทางความร้อนเชิงกายภาพที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ดังสมการต่อไปนี้



ภาพ 13 ตำแหน่งของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิภายในถังทรงกระบอก [21]



ภาพ 14 อุณหภูมิของข้าวเปลือกระหว่างแบบจำลองและผลที่ได้จากการทดลอง [21]

$$\rho = 171.02 \times M_w + 560.16 \quad (16)$$

$$c_p = 3.1 \times M_w + 1.2648 \quad (17)$$

$$k_{eff} = 0.27 \times M_w + 0.0653 \quad (18)$$

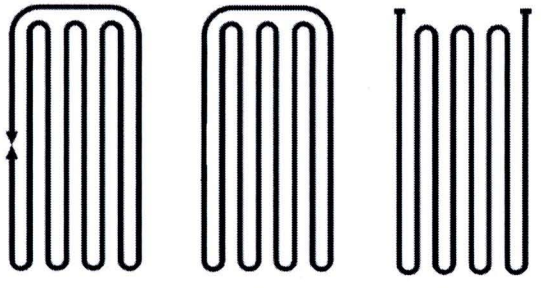
โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของข้าวเปลือก, กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

c_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะ, กิโลจูลต่อกิโลกรัม-องศาเซลเซียส

k_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของข้าวเปลือก, วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส

3. ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

โดยในการแบ่งรูปแบบของท่อความร้อนแบบสั่นได้มีงานวิจัยของ Maezawa S. et al. (1995) [14] ซึ่งทำการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นและแบบที่มีวาล์วควบคุมการไหล โดยได้แบ่งรูปแบบของท่อความร้อนแบบสั่นเป็น 3 แบบหลักๆ แสดงดังภาพ 15 แบบแรกสร้างขึ้นด้วยท่อความร้อนขนาดคาปิลลารีเดี่ยวขดเป็นวงส่วนที่ปลายนั้นเชื่อมต่อกัน ซึ่งมีวาล์วควบคุมการไหลหนึ่งตัวหรือหลายตัวในวงรอบ ดังนั้นสารทำงานนั้นจะไหลในทิศทางที่ถูกกำหนดไว้นั้นส่งผลให้ความร้อนไหลอย่างรวดเร็ว ดังภาพ 15 (a) แบบที่สองประกอบด้วยท่อความร้อนขนาดคาปิลลารีเดี่ยวนั้นขดเป็นวงปิดโดยไม่มีวาล์วควบคุมการไหล ซึ่งความร้อนจะถูกถ่ายเทโดยการสั่นของสารทำงานตามแนวแกนความยาวของท่อ ดังภาพ 15 (b) และแบบสุดท้ายจะไม่มีวาล์วควบคุมการไหลและเป็นปลายปิดทั้งสองด้าน ซึ่งจะประกอบด้วยท่อเดี่ยวยาวขนาดคาปิลลารีขดไปมา ในกรณีนี้การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นโดยการสั่นอาจจะกระตุ้นโดยการผันผวนของคลื่นความดันที่รวดเร็ว เกิดจากการเดือดเป็นฟองในสารทำงาน ดังภาพ 15 (c)



ภาพ 15 รูปแบบท่อความร้อนแบบสั่น [20]

จากการศึกษาท่อความร้อนแบบปลายปิดประกอบด้วยท่อทองแดง 20 โค้งเลี้ยว ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 1 มิลลิเมตร สารทำงาน R142b และอัตราส่วนการเติมสารทำงานที่ 30 %, 50 % และ 70 % ของปริมาตรทั้งหมด ได้ให้ความร้อน 2 แบบ แบบแรกนั้นให้ความร้อนที่ส่วนล่างของท่อในการวางท่อแนวดิ่ง แต่การให้ความร้อนในส่วนบนไม่สามารถทำงานได้ แบบที่สองให้ความร้อนแนวระนาบ ซึ่งพบว่าที่อัตราส่วนการเติมสารทำงานที่ 50 % จะให้สมรรถนะดีที่สุด โดยท่อความร้อนแบบไม่เป็นวงปิดสามารถถ่ายเทความร้อนโดยการสั่นขึ้นๆลงๆ ของสารทำงาน อาจจะเป็นกระบวนการของการจัดเรียงตัวของฟองก๊าซโดยการเดือด ที่เติบโตขึ้น ที่แตกออกในส่วนของการทำระเหยและการยุบตัวในส่วนของการควบแน่น ส่วนลักษณะของการผันผวนในท่อความร้อนขนาดคาปิลลารีที่ขดไปมามีความซับซ้อนมากและส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการเติมสาร รูปแบบการทำงาน ขนาดท่อและจำนวนโค้งเลี้ยว

ต่อมาในงานวิจัยของ Gi K., et al. (1999) [18] ได้ทำการศึกษาท่อความร้อนแบบสั่น 2 แบบคือ แบบปลายปิดและแบบวงรอบ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของท่อความร้อนแบบสั่นโดยท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในเท่ากับ 4 มิลลิเมตร และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยใช้สารทำงาน R142b ความยาวส่วนทำระเหย ส่วนควบแน่น และส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน มีความยาวเท่ากับ 15 เซนติเมตร, 15 เซนติเมตร และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ ในระหว่างการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นนี้จะทำงานที่อุณหภูมิส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนเกือบคงที่อยู่ที่ 35 องศาเซลเซียส หรือ 45 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ สมรรถนะทางความร้อนขึ้นอยู่กับความเร็วของการไหลและความรุนแรงของการสั่นของสารทำงาน อัตราส่วนการเติมที่ 50 % - 60 % ให้ความเร็วการไหลสูงสุด และความเร็วจะเพิ่มขึ้นทีละน้อยตามมุมเอียงจนกระทั่งอยู่ในแนวดิ่ง สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุดอยู่ที่มุมเอียงใกล้กับแนวดิ่ง ซึ่งจะสร้างการสั่นที่รุนแรงโดยความยาวของไอและของเหลวสั้น สำหรับท่อความร้อนแบบปลายปิด สารทำงานไม่สามารถไหลได้ แต่ความร้อนจะถูกส่งผ่านโดยการสั่นของสารทำงานระหว่างส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่น การสั่นภายในแบบปลายปิดนั้นเกิดขึ้นง่ายที่มุมเอียงน้อยจากแนวระนาบ และอัตราส่วนการเติมสารทำงานน้อยถึงปานกลาง เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองแบบ ซึ่งทำให้เห็นว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบจะมีการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าแบบปลายปิด เนื่องจากแบบวงรอบมีการไหลของสารทำงานซึ่งช่วยในการถ่ายเทความร้อนด้วย

ในการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนได้มีการศึกษาในหลายลักษณะ ซึ่งขึ้นอยู่กับสิ่งที่สนใจ เช่น มุมเอียงในการทำงาน อัตราส่วนการเติมสารทำงาน ชนิดสารทำงาน ขนาดของท่อความร้อน จำนวนโค้งเลี้ยว เป็นต้น ในการศึกษาตัวแปรได้มีงานวิจัยของ

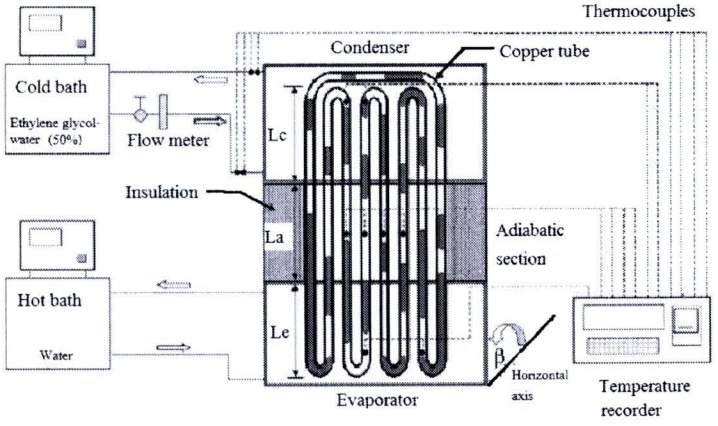
Charoensawan P., et al. (2003) [20] ได้ทำการศึกษาผลของตัวแปรที่ส่งผลต่อท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ในการทดสอบสมรรถนะของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ โดยจะควบคุมอุณหภูมิส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นให้คงที่ ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงเป็นตัวแปรพิจารณา โดยเริ่มต้นจะมีตัวแปรสามตัวถูกกำหนดค่าไว้คือ

1. อุณหภูมิเฉลี่ยของส่วนทำระเหยจะรักษาให้คงที่เท่ากับ 80±0.5 องศาเซลเซียส ซึ่งไหลเวียนจากอ่างน้ำร้อน

2. ภายในส่วนควบแน่นสารละลายหล่อเย็นที่ใช้คือ สารละลายเอธีลีนไกลโคในน้ำที่ความเข้มข้น 50 % โดยปริมาตร โดยรักษาอุณหภูมิที่ทางเข้าส่วนควบแน่นอยู่ที่ 20 องศาเซลเซียส ไหลจากอ่างน้ำเย็น

3. มีอัตราส่วนการเติมสารทำงานคงที่ 50 % ของปริมาตรทั้งหมดภายในท่อ

โดยการทดลองมีลักษณะดังภาพ 16 ประกอบด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ใช้ในการทดสอบ อ่างน้ำร้อนและน้ำเย็น เครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิและเครื่องวัดอัตราการไหล



ภาพ 16 ชุดทดลองสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ [20]

จากการศึกษาเชิงการทดลองถึงผลของตัวแปรต่างๆคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ มุมเอียงการทำงาน สารทำงาน และจำนวนโค้งเลี้ยวที่มีต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนแบบสั่นวงรอบ สามารถสรุปได้ว่า

1. แรงโน้มถ่วงมีผลต่อปริมาณการถ่ายเทความร้อน ถึงแม้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อที่ถูกทดสอบในการศึกษาครั้งนี้จะถูกกำหนดโดย Bond number เป็นข้อจำกัดเฉพาะเจาะจงของขนาดภายในท่อ แต่แรงลอยตัวก็ยังส่งผลต่อรูปร่างของฟองก๊าซ

2. จำนวนโค้งเลี้ยววิกฤตเป็นตัวกำหนดในการคาดคะเนความเป็นไปได้ที่แนวระนาบจะทำงานได้และยิ่งกว่านั้นยังเป็นตัวเชื่อมความแตกต่างของสมรรถนะระหว่างการทำงานในแนวดิ่งและแนวระนาบ จำนวนโค้งเลี้ยววิกฤตนี้คาดว่าจะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของการรบกวนภายใน

3. ของไหลที่แตกต่างกันจะทำงานได้ดีภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่ต่างกัน ภาวะที่ดีที่สุดของสมบัติทางความร้อนเชิงกายภาพจะขึ้นอยู่กับการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตกลไกทางความร้อน

4. สำหรับผลต่างอุณหภูมิการทำงานที่กำหนดไว้สมรรถนะจะดีขึ้นได้ก็ต่อเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน แต่ยังคงมีขีดจำกัดบนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ ซึ่งทำให้เกิดการทำงานแบบท่อความร้อนแบบสั่นขึ้น

เพื่อต้องการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ จึงมีงานวิจัยของ Charoensawan P., et al. (2007) [27] ที่ได้ศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบจะเป็นฟังก์ชันของตัวแปรหลายชนิดด้วยกันที่มีผลต่อกระบวนการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบดังสมการ $q = f\left(D_i, L_e, n, T_e, FR, workingfluid\right)$ โดยสมการของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบจะพิจารณาในรูปแบบของตัวแปรไร้มิติ ซึ่ง Prandtl number จะบ่งบอกถึงการพาความร้อนในหนึ่งสถานะระหว่างผนังท่อและลำของสารทำงานที่เคลื่อนที่ผ่านผิวท่อดังสมการที่ 19

$$Pr_l = \left(\frac{c_p \mu}{k} \right)_l \tag{19}$$

ที่ c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่

μ คือ ค่าของความหนืด

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ซึ่งคุณสมบัติต่างๆของสารทำงานจะอยู่ในสภาวะของเหลว ส่วน Karman number หรือ Ka เป็นตัวแปรที่แสดงถึงอัตราส่วนของแรงขับเคลื่อนของผลต่างของความดันไอที่เกิดขึ้นภายในระหว่างท่อในส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่นเพื่อที่จะทราบถึงแรงเสียดทานของการเคลื่อนที่ของสารทำงานดังสมการที่ 20

$$Ka = \frac{\rho_l \Delta P D_i^3}{\mu_l^2 L_{eff}} \tag{20}$$

โดยที่ ρ_l คือ ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะของเหลว

ΔP คือ ผลต่างของความดันไออิ่มตัวของสารทำงานระหว่างส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่น

และมี $L_{eff} = (L_e + L_c)/2$ ซึ่ง L_{eff} คือ effective length, L_e และ L_c เป็นความยาวของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นตามลำดับ ส่วน Modified Jacob number หรือ Ja^* เป็นอัตราส่วนของพลังงานความร้อนสัมผัสที่เปลี่ยนเป็นความร้อนแฝงระหว่างสถานะของของเหลวกลายเป็นไอดังสมการที่ 21

$$Ja^* = \frac{(FR) c_{p,l} \Delta T}{(1-FR) h_{lv}} \tag{21}$$

โดยที่ FR คือ อัตราส่วนการเติมสารทำงาน

ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น

h_{lv} คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำงาน

ตัวแปรถัดมาคือ Bond number หรือ Bo เป็นอัตราส่วนของแรงลอยตัวต่อแรงตึงผิวของของไหลสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 22

$$Bo = \frac{g(\rho_l - \rho_v) D_i^2}{\sigma} \tag{22}$$

โดยที่ g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

ρ_v คือ ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะไอ

σ คือ แรงตึงผิว

ในการคำนวณค่า Kutateladze number หรือ Ku ซึ่งเป็นอัตราส่วนของค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนที่ให้ต่อค่าการถ่ายเทความร้อนวิกฤตของของไหล โดยหาได้จาก Charoensawan P., et al. (2008) [28] ซึ่งได้จากการทดลองดังสมการที่ 23 และ 24

$$Ku_{pre} = 2.13\times10^{-9} Pr_l^{0.75} Ja^{*-0.38} Bo^{-0.84} Ka^{0.58} \left(k_c / k_a\right)^{1.21} \tag{23}$$

$$Ku = \frac{q''}{h_{lv}\rho_v \left(\frac{\sigma g\left(\rho_l - \rho_v\right)}{\rho_v^2}\right)^{\frac{1}{4}}} \tag{24}$$

ที่ q'' คือ radial heat flux ของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 25

$$q'' = \frac{q}{2n\pi D_i L_e} \tag{25}$$

ที่ q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

n คือ จำนวนโค้งเลี้ยวของท่อ

ซึ่งคุณสมบัติของสารทำงานทั้งหมดที่ใช้ในการคำนวณตัวแปรไร้มิติจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบคือ $\left(T_e + T_c\right)/2$ เมื่อ T_e, และ T_c เป็นอุณหภูมิส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นตามลำดับ โดยในส่วนควบแน่นจะมีการพาความร้อนออกด้วยอากาศที่อุณหภูมิแวดล้อม

จากการศึกษาเกี่ยวกับท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบสามารถนำสมการที่ 19 – 25 ที่ได้จากงานวิจัย [27, 28] มาประยุกต์ใช้คู่กับการพัฒนาแบบจำลองของการระบายความร้อนภายในถังเก็บข้าวเปลือกด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

4. การประยุกต์ใช้งานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

จากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้าพบว่าส่วนใหญ่เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบรวมถึงสมการที่ใช้ในการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ต่อมาได้มีการนำท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบมาประยุกต์ใช้ซึ่งในการประยุกต์ใช้งานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบสามารถนำไปใช้งานได้หลายด้าน โดยงานวิจัยของ

สุวรรณ วาวแวว และคณะ (2004) [25] ได้มีการนำท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบมาใช้ในการทดสอบ ซึ่งเป็นท่อคาปิลลารีที่ทำมาจากท่อทองแดงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1.778 และ 2.032 มิลลิเมตร ปลายทั้งสองถูกนำมาเชื่อมต่อกันเป็นวงรอบ ความยาวส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเท่ากับ 170 มิลลิเมตร สารทำงานที่ใช้คือ R12, R22 และน้ำ ที่อัตราการเติมเท่ากับ 50 % โดยปริมาตรทั้งหมดภายในท่อ และมุมเอียงในการทำงานคือ 90 องศาจากแนวระดับ ได้ทำการทดลองโดยให้ความร้อนแก่ส่วนทำระเหยด้วยอากาศร้อนที่ผ่านการอัดจากเทอร์โบชาร์ท และระบายความร้อนในส่วนควบแน่นด้วยอากาศ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 2.032 มิลลิเมตร ที่มีความยาวรวมเท่ากับ 20 เมตร ที่ใช้สารทำงาน R12 ให้สมรรถนะของเครื่องยนต์สูงสุด จากนั้นได้มีการนำผลทดลองมาเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ที่ติดตั้งอินเตอร์คูลเลอร์พบว่า เครื่องยนต์ที่ติดตั้ง CLOHP มีแรงบิดและกำลังงานต่อพื้นที่การรับความร้อนสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ติดตั้งอินเตอร์คูลเลอร์ 9.2 และ 9.2 เท่าตามลำดับ

ส่วนเรืองฤทธิ์ ลำมะยศ และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาถึงวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนโดยการนำท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบมาระบายความร้อนของสารทำความเย็นก่อนที่จะไหลเข้าสู่แผงระบายความร้อน โดยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบนี้จะหล่อเย็นโดยใช้ลมที่ออกจากแผงระบายความร้อนโดยไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก ซึ่งใช้เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนขนาด 13,000 Btu/h พบว่าเมื่อทำการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ทำด้วยท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3.8 มิลลิเมตร จำนวน 13 โค้งเลี้ยว เติมสารทำงาน R123 จำนวน 120 ลูกบาศก์เซนติเมตร ติดตั้งระหว่างเครื่องอัดไอและแผงระบายความร้อน จะทำให้ความดันอิ่มตัวในแผงระบายความร้อนลดลงโดยเฉลี่ย 21 Psi (179.27 kPa) ความดันอิ่มตัวในแผงคอยล์เย็นลดลงโดยเฉลี่ย 18 Psi (137.9 kPa) ซึ่งทำให้การระบายความร้อนที่แผงระบายความร้อนเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 4.0 % ในขณะที่อัตราการทำความเย็นที่คอยล์เย็นเพิ่มขึ้น 5.02 % อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงโดยเฉลี่ย 8.51 % ซึ่งเป็นผลให้ค่า COP และ EER เพิ่มขึ้น 14.79 % จากผลของการศึกษานี้ทำให้สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 754.79 บาท/ปี-ตัน

จะเห็นได้ว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบสามารถนำไปประยุกต์ได้หลายทางในการนำความร้อนกลับมาใช้หรือระบายความร้อน ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของเครื่องยนต์หรือระบบปรับอากาศก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงานได้ ซึ่งเป็นอีกเหตุผลที่น่าสนใจในการทำวิจัยเกี่ยวกับการ

นำท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบมาประยุกต์ใช้ในเรื่องการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่มีการระบายความร้อนซึ่งเกิดจากกระบวนการหายใจของข้าวเปลือกด้วยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ