การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17
15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัดปราจีนบุรี

การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

STUDY ON THE PERFORMANCE OF A COMBINED HEAT PUMP-HEAT PIPE DRYER

นิรุบล กาญจนางกูรพันธุ์[1] และตุลย์ มณีวัฒนา[2]
[1] นิสิตปริญญาโท
[2] ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีอาคารและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพ ฯ 10330
โทร 0 – 2218 – 6640 โทรสาร 0 – 2252 – 2889 E-mail: fmetmn@eng.chula.ac.th[2]

Nirubon Kanjanangkoonphun[1] and Tul Maneewattana[2]
[1] Graduate student
[2] Building Technology and Environment Laboratory, Mechanical Engineering Department,
Chulalongkorn University Phyathai Rd, Patumwan, Bangkok 10330
Tel : 0 – 2218 – 6640 Fax : 0 – 2252 – 2889 E-mail: fmetmn@eng.chula.ac.th[2]

บทคัดย่อ

การอบแห้งเป็นวิธีที่ช่วยให้สามารถเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตรที่มีมากในแต่ละฤดูกาลไว้ได้นาน กระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งชนิดใช้เครื่องทำความร้อนเป็นวิธีหนึ่งที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน แต่ปัญหาที่สำคัญของการใช้เครื่องอบแห้งแบบนี้คือ มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูง การออกแบบเครื่องอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลงได้ นอกจากนั้นแล้ว ยังจะช่วยเพิ่มคุณภาพของผลผลิตอีกด้วย งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อน และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการอบแห้งแบบใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อน กับการอบแห้งแบบใช้เครื่องทำความร้อน จากการทดลองเพื่อหาจุดทำงานที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่า อุณหภูมิอบแห้งที่เหมาะสมมีค่าอยู่ที่ประมาณ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลมของอากาศประมาณ 1.20 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิและความเร็วลมดังกล่าวเครื่องจะสามารถอบแห้งได้ภายในเวลาประมาณ 16 ชั่วโมง และสามารถทำให้น้ำระเหยออกประมาณ 0.55 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 111.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งานที่ใช้ในการอบแห้งจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 46.9 บาทต่อกิโลกรัมน้ำระเหย ผลจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยรวมจากการใช้เครื่องอบแห้งทั้ง 2 ชนิด พบว่า เครื่องอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพสูงกว่า และสามารถลดค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานและประหยัดพลังงานไฟฟ้าลงได้ประมาณ 23 และ 35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Abstract

Drying process is the method to help preserve the excess agricultural products in its season for later use. Drying process by using electric heater is one of the methods practically use today, however the cost of the energy consumption is very high. The alternative drying method that use a combined heat pump-heat pipe drying process is a better way to decrease the energy consumption expenses and also increase the product quality. This research studied the performance of a combined heat pump-heat pipe dryer and compare the differences between a drying process using heater and a combined heat pump-heat pipe. Experiment was conducted to find the optimum operating point for dryer with a combined heat pump-heat pipe. It was found that the optimum drying temperature is approximately 60 $^{\circ}$C and the optimum wind velocity is approximately 1.20 m/s. At this temperature and wind velocity the machine could dry the product within about 16 hours and make the water evaporates out at the rate of about 0.55 kg per hour. The energy consume is approximately 111.9 MJ per kg of water evaporated. The average life cycle cost per kg of water evaporated is approximately 46.9

baht. Results from the comparison between the efficiency of both machines indicate that a combined heat pump-heat pipe dryer has a much better efficiency and it could decrease a life cycle cost and save electrical energy consumption to approximately 23 and 35 percent respectively.

1. บทนำ

การอบแห้งอาหาร หมายถึง การกำจัดความชื้นออกจากอาหาร ดังนั้น วิธีการอบแห้งอาหารจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงหลักการในการกำจัดความชื้น โดยทำลายคุณภาพของผลิตภัณฑ์น้อยที่สุด การที่เราจะออกแบบกระบวนการอบแห้ง จึงจำเป็นต้องทราบหลักพื้นฐานของกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้ง สำหรับวิธีการอบแห้งผลไม้ที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ การใช้ความร้อนเพื่อกำจัดความชื้นที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ โดยที่ตัวเครื่องอบอาจมีลักษณะเป็นแบบตู้ หรืออุโมงค์ หรือใช้สายพานอบแห้ง จนความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงถึงระดับหนึ่งแล้วจึงค่อยใช้วิธีการอบในถัง นอกจากการอบแห้งด้วยลมร้อนแล้วยังอาใช้วิธีการอบแห้งแบบอื่นๆ เช่น การอบแห้งแบบแช่แข็ง การอบแห้งแบบไมโครเวฟ การลดความชื้นโดยออสโมซิส และการอบแห้งแบบใช้ฮีตปั๊ม รวมทั้งได้มีการประยุกต์อุปกรณ์ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้งแบบใช้ฮีตปั๊มให้สูงขึ้นด้วย

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ และความเร็วลมของอากาศ ที่มีผลต่อคุณภาพของการอบแห้ง และหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้ง เมื่อทำการทดลองอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้เครื่องทำความร้อนด้วย กับการอบแห้งชนิดใช้เครื่องทำความร้อนอย่างเดียว

2.1 ทฤษฎีกระบวนการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่มีการถ่ายเทความร้อน และถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน ในทางปฏิบัติมักจะใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้งผลไม้โดยการผ่านอากาศร้อนไปยังผิวด้านนอกของผลไม้ ซึ่งจะเกิดการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน และความร้อนสัมผัสจากอากาศที่ผลไม้ได้รับส่วนใหญ่ จะใช้ในการทำให้น้ำระเหยออกจากผลไม้ ซึ่งทฤษฎีที่เกี่ยวกับกระบวนการอบแห้งผลไม้ชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ในส่วนที่สำคัญสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ได้ดังนี้

2.1.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา

ในกรณีที่อากาศร้อนไหลผ่านวัสดุชื้นจะทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุและพาไอน้ำออกไปด้วย ถ้าอากาศร้อนมีอุณหภูมิและความชื้นคงที่ จะพบว่า ปรากฏการณ์ของกระบวนการอบแห้งเกิดขึ้นสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกอัตราการอบแห้งจะคงที่ และเมื่ออบแห้งต่อไปจนวัสดุลดความชื้นลงถึงค่าหนึ่ง จะพบว่าอัตราการอบแห้งจะเริ่มลดลง เรียกความชื้นที่จุดนี้ว่าความชื้นวิกฤต ถ้าค่าความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่าความชื้นวิกฤติในการอบแห้ง จะมีช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ผิวของวัสดุจะมีน้ำเกาะอยู่เป็นจำนวนมาก การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิววัสดุเท่านั้น อัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมโดยความเร็วลม อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงอิทธิพลของอากาศภายนอกจะลดลงด้วย อัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมโดยอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำที่ออกมาจากวัสดุเท่านั้น

2.1.2 ความชื้นสมดุล

ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง จำเป็นต้องทราบความชื้นสมดุลของผลไม้ และคุณสมบัติเชิงความร้อนทางฟิสิกส์บางอย่าง เช่น ความร้อนจำเพาะของผลไม้ ความหนาแน่นของผลไม้ เมื่อทำการอบแห้งผลไม้โดยใช้อากาศที่มีสภาวะคงที่ ความชื้นของผลไม้จะลดต่ำจนถึงค่า ๆ หนึ่งซึ่งผลไม้มีความชื้นคงที่ หรือความชื้นในผลไม้จะมีความดันไอเท่ากับความดันของอากาศที่อยู่รอบ ๆ เรียกความชื้นนี้ว่าปริมาณความชื้นสมดุล ค่าปริมาณความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้อบแห้ง

อารีย์ เทียนไชย [1] ได้ทำการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของสับปะรดแช่อิ่มแล้วนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองต่าง ๆ พบว่าสมการแบบจำลองความชื้นสมดุลที่มีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง คือ รูปแบบสมการของ Iglesias & Chirife ดังนี้

$$M_{eq} = \frac{exp\left[2\left(A + B \cdot RH\right)\right] - M_{0.5}}{2\,exp\left(A + B \cdot RH\right)} \qquad .....(1)$$

2.1.3 การคำนวณสภาวะอากาศหลังการอบแห้ง

จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ เมื่อกำหนดให้ตู้อบแห้งเป็นปริมาตรควบคุมที่พิจารณาและมีอากาศร้อนไหลผ่านตู้อบแห้ง จะได้ว่า ผลรวมของความแตกต่างของเอนทาลปีของอากาศชื้นที่ไหลเข้าและออกจากปริมาตรควบคุมและการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในของปริมาตรควบคุม เท่ากับ ผลรวมของความร้อนที่เปลี่ยนระหว่างปริมาตรควบคุมกับสิ่งแวดล้อม ดังนี้

$$\left[c_a\left(T_o - T_i\right) + c_v\left(w_o T_o - w_i T_i\right) + h_{fg}\left(w_o - w_i\right)\right] + \Delta u_p = Q \qquad .....(2)$$

เมื่อ

ΔU_p = การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของผลไม้แช่อิ่มต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง มีค่าน้อยมาก จึงอาจตัดทิ้งได้ (kJ/kg-dry air)

Q = ความร้อนที่สูญเสียของตู้อบแห้งต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง ซึ่งสมมติว่ามีค่าเป็นศูนย์ (kJ / kg-dry air)

W = อัตราส่วนความชื้นของอากาศ (kg-H_2O / kg-dry air)

c = ความร้อนจำเพาะ (kJ / kg$^{\circ}$C)

h_{fg} = ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ (kJ / kg-H_2O)

T = อุณหภูมิ ($^{\circ}$C)

สัญลักษณ์กำกับล่าง

a = อากาศแห้ง

v = ไอน้ำ

i = อากาศเข้าตู้อบแห้ง

o = อากาศออกจากตู้อบแห้ง

เมื่อจัดเทอมต่าง ๆ จะได้อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากตู้อบแห้งดังนี้

$$T_o = \frac{Q + c_a T_i + W_i\left(h_{fg} + c_v T_i\right) - W_o h_{fg} - \Delta U_p}{c_a + W_o c_v} \quad .....(3)$$

2.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการอบแห้ง

การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพด้านการอบแห้งของเครื่องอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อน สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

2.2.1 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate)

การหาอัตราการอบแห้งของเครื่องอบแห้ง เป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่แสดงถึงค่าประสิทธิภาพในการอบแห้งลดความชื้นของผลไม้ ประทาน รักปรางค์ [2] ได้เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งจากสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

อัตราการอบแห้ง = ปริมาณน้ำที่ระเหยจากผลไม้ /เวลาใช้อบแห้ง

(kg water evaporated / hr) .....(4)

2.2.2 อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ (Specific Air Flow Rate)

อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ x 3600 / มวลผลไม้แห้ง

(kg dry air / hr-kg dry fruits) .....(5)

2.2.3 ความสิ้นเปลืองพลังงาน

สำหรับการวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงาน สามารถเสนอได้ 2 รูปแบบ คือ

2.2.3.1 ความสิ้นเปลืองพลังงาน (Energy Consumption) จะแสดงในรูปของพลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น ซึ่งการแสดงค่าแบบนี้เป็นที่นิยมใช้กันในด้านการอบแห้ง สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

ความสิ้นเปลืองพลังงาน = ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ / ปริมาณน้ำที่ระเหยจากผลไม้

(MJ/kg water evaporated) .....(6)

2.2.3.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specfic Moisture Extraction Rate , SMER) เป็นการแสดงปริมาณความสิ้นเปลืองพลังงาน ที่นิยมแสดงใช้ในด้านระบบฮีตปั๊ม มีรูปแบบของสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ = ปริมาณน้ำที่ระเหยจากผลไม้ / ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้

(kg water evaporated/kW-hr) .....(7)

2.3 ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

ในการทำวิจัยครั้งนี้ระบบฮีตปั๊ม จะมีส่วนประกอบของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของระบบ ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน คือ อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนชนิดพิเศษ ซึ่งสามารถถ่ายเทความร้อนได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ แม้ในสภาพอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นท่อโลหะ (มักเป็นทองแดง) ซึ่งได้ทำให้ภายในเป็นสูญญากาศ แล้วบรรจุของเหลวคุณสมบัติพิเศษ คือ สารทำความเย็นหรือ Refrigerant (ฟรีออน-22) ก่อนที่จะปิดผนึกหัวท้าย เนื่องจากท่อแลกเปลี่ยนความร้อนถ่ายเทความร้อนโดยหลักการของการระเหยและการ กลั่นตัวของของเหลว จึงไม่มีความจำเป็นต้องใช้เครื่องกลไกหรือพลังงานจากภายนอกใด ๆ ในการทำงาน

ในการทำงาน ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ส่วนให้ความเย็นเบื้องต้น (Precool heat pipe section) ซึ่งอยู่ทางช่องลมเข้า ก่อนที่จะผ่านตัวคอยล์เย็น เมื่ออากาศร้อนผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนนี้ อากาศร้อนก็จะถ่ายเทความร้อนให้แก่ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้น อากาศที่ออกจากท่อแลกเปลี่ยนความร้อนนี้จะมีอุณหภูมิลดลง และผ่านไปยังคอยล์เย็น จึงทำให้อากาศมีอุณหภูมิต่ำกว่าปกติ ทำให้คอยล์เย็นทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากอุณหภูมิที่ผ่านคอยล์เย็นจะเย็นกว่าปกติ และทำให้ไอน้ำกลั่นตัวได้มากขึ้น

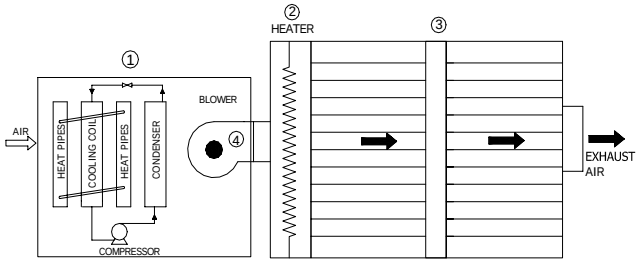
ในขณะที่ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนแรก (Precool) รับพลังงานจากอากาศร้อนที่ผ่านสารทำความเย็นภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน จะระเหยและพาความร้อนที่ได้รับจากอากาศร้อนนั้นไปยังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนที่ 2 เรียกว่า ส่วนเพิ่มความร้อน (Reheat heat pipe section) โดยสารทำความเย็นระเหยลอยไปตามท่อไปยังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนนี้ เมื่ออากาศที่ออกจากคอยล์เย็นผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อนในส่วนนี้ ก็จะได้รับความร้อน (พลังงาน) จากส่วนนี้ ทำให้อากาศที่ผ่านระบบมีอุณหภูมิที่พอเหมาะ โดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มความร้อน ส่วนสารทำความเย็นที่คายความร้อนให้แก่อากาศ อุณหภูมิจะลดลงและเปลี่ยนสถานะไหลกลับลงมาตามท่อและไหลไปยังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนแรก (Precool)

3. การทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ และความเร็วลมของอากาศ ที่มีผลต่อคุณภาพของการอบแห้ง และหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้ง โดยทำการทดลองอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้เครื่องทำความร้อนด้วย กับทำการทดลองอบแห้งชนิดใช้เครื่องทำความร้อนอย่างเดียว ที่อุณหภูมิของอากาศต่างๆ ความเร็วลมของอากาศต่างๆ และระยะเวลาที่ใช้อบแห้งต่างๆ รวมทั้งเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้เครื่องทำความร้อนด้วย กับการอบแห้งชนิดใช้เครื่องทำความร้อนอย่างเดียว โดยพิจารณาจากระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลือง

พลังงานของระบบ (SEC) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบ (SMER) ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ และการประเมินค่าใช้จ่าย

3.1 การอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้เครื่องทำความร้อนด้วย

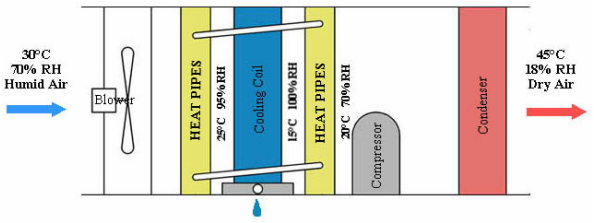


รูปที่ 1 การทำงานของระบบอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้เครื่องทำความร้อนด้วย

ประกอบด้วย 4 ส่วน คือ

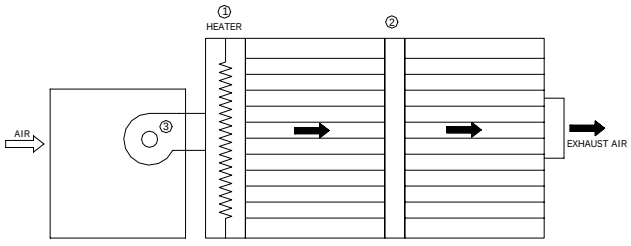
1. ฮีตปั๊มที่มีท่อแลกเปลี่ยนความร้อน
2. เครื่องทำความร้อน
3. ตู้อบแห้ง
4. พัดลมหอยโข่ง

อากาศจากภายนอกผ่านเข้ามายังส่วนฮีตปั๊มที่มีท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้นและมีความชื้นลดลง กล่าวคือ เป็นอากาศที่ร้อนและแห้ง หลังจากนั้นก็ผ่านไปยังส่วนเครื่องทำความร้อน เพื่อเพิ่มและควบคุมอุณหภูมิของอากาศ หลังจากนั้นอากาศจะผ่านไปยังส่วนตู้อบแห้ง เพื่ออบแห้งผลไม้แช่อิ่ม และอากาศที่ผ่านส่วนตู้อบแห้งจะถูกปล่อยสู่บรรยากาศ ซึ่งส่วนที่ 1 มีลักษณะการทำงานดังรูป



รูปที่ 2 สภาวะของอากาศที่ผ่านในส่วนของฮีตปั๊มที่มีท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

3.2 การอบแห้งชนิดใช้เครื่องทำความร้อนอย่างเดียว



รูปที่ 3 การทำงานของระบบอบแห้งชนิดใช้เครื่องทำความร้อนอย่างเดียว

ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

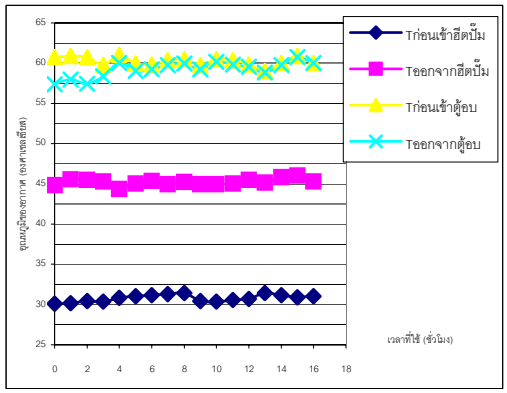
1. เครื่องทำความร้อน
2. ตู้อบแห้ง
3. พัดลมหอยโข่ง

อากาศจากภายนอกถูกพัดลมหอยโข่งดูดเข้ามา ผ่านมายังเครื่องทำความร้อนทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้นและเพื่อควบคุมอุณหภูมิในการอบแห้ง หลังจากนั้นก็ผ่านไปยังส่วนตู้อบแห้ง เพื่ออบแห้งผลไม้แช่อิ่ม และอากาศที่ผ่านส่วนตู้อบแห้งจะถูกปล่อยสู่บรรยากาศ

4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามจุดต่าง ๆ

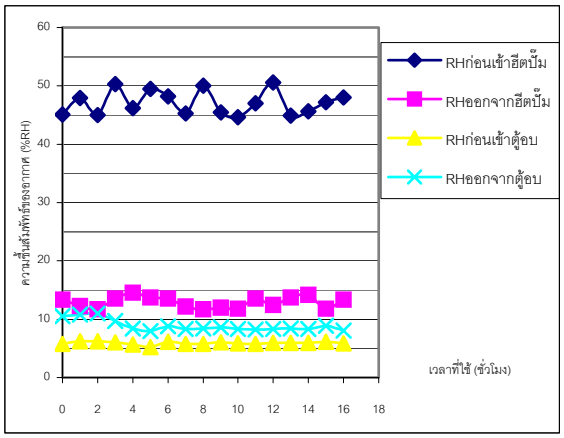
จากการทดลองวัดและเก็บข้อมูลของอุณหภูมิตามจุดต่างๆ ของระบบ แล้วนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอากาศกับเวลาที่ใช้อบแห้ง พบว่า อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าฮีตปั๊มเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส หลังจากผ่านฮีตปั๊มที่ประกอบด้วยท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้อุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้นเท่ากับ 45 องศาเซลเซียส แล้วผ่านเครื่องทำความร้อนตามอุณหภูมิที่กำหนดไว้ จะเห็นว่า เมื่ออากาศเข้าไปยังตู้อบแห้ง ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลสารระหว่างอากาศกับสับปะรด อากาศที่ออกจากตู้อบแห้งในช่วงแรกจะมีอุณหภูมิที่ลดลงต่ำกว่าช่วงหลัง เนื่องจากอัตราการอบแห้งในช่วงแรกสูงกว่าอัตราการอบแห้งในช่วงหลัง และในช่วงหลังอุณหภูมิของอากาศเปลี่ยนแปลงน้อยมากดังกราฟรูปที่ 4



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ของระบบกับเวลาที่ใช้

4.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศตามจุดต่าง ๆ

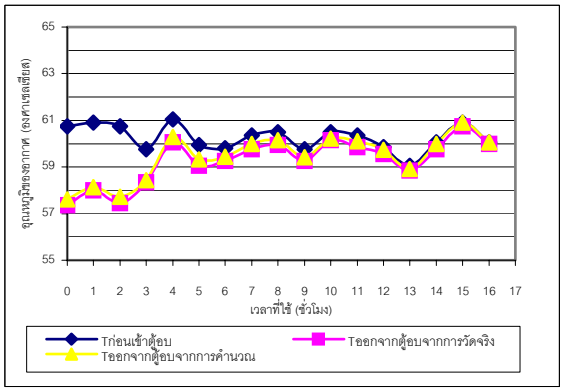
จากการทดลองวัดและเก็บข้อมูลของความชื้นสัมพัทธ์ ของอากาศตามจุดต่างๆ ของระบบ แล้วนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศกับเวลาที่ใช้อบแห้ง พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังจากผ่านฮีตปั๊มที่ประกอบด้วยท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศลดลง แล้วเมื่ออากาศเข้าไปยังตู้อบแห้ง ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลสารระหว่างอากาศกับสับปะรด ทำให้อากาศมีค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นเนื่องจากได้รับความชื้นจากสับปะรดแช่อิ่ม ดังกราฟรูปที่ 5



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่จุดต่างๆ ของระบบกับเวลาที่ใช้

4.3 เปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากตู้อบแห้งจากการคำนวณ และจากการทดลอง

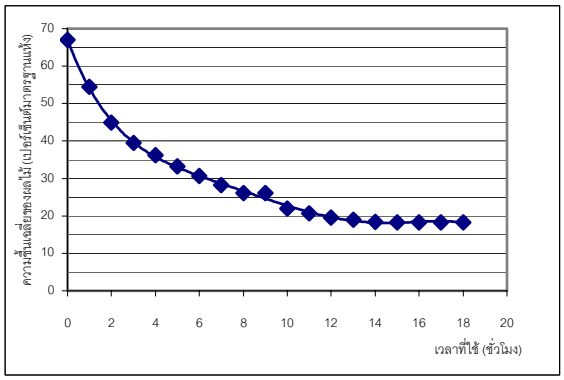
จากสมการคำนวณหาอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากตู้อบแห้ง และจากการทดลองวัดค่าอุณหภูมิที่ออกจากตู้อบแห้ง พบว่า อุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง ดังกราฟรูปที่ 6 ซึ่งลักษณะของกราฟมีแนวโน้มของอุณหภูมิที่แตกต่างจากอุณหภูมิที่เข้าตู้อบแห้งลดลง เมื่อเวลาที่ใช้อบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลสารระหว่างอากาศกับสับปะรด มีค่าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอากาศกับเวลาที่ใช้

4.4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของสับปะรดแช่อิ่ม

จากการทดลองสามารถที่จะทราบความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลาได้ เนื่องจากการอ่านค่าปริมาณน้ำที่ระเหยของสับปะรดแช่อิ่มจากเครื่องชั่ง นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเฉลี่ยของสับปะรดแช่อิ่มกับเวลาที่ใช้อบแห้ง ดังกราฟรูปที่ 7 พบว่า ในช่วงแรกความชื้นเฉลี่ยลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความชื้นในสับปะรดแช่อิ่มมีค่ามาก ทำให้มีการถ่ายเทมวลสารระหว่างอากาศกับสับปะรดอย่างรวดเร็ว แต่ในช่วงหลังการเปลี่ยนแปลงของความชื้นเฉลี่ยของสับปะรดแช่อิ่มค่อนข้างน้อย จนกระทั่งไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความชื้นของสับปะรดแช่อิ่มมีค่าน้อย



รูปที่ 7กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเฉลี่ยของสับปะรดแช่อิ่มกับเวลาที่ใช้

4.5 การทดลองที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

จากการเปรียบเทียบความชื้นเฉลี่ยที่ลดลงของสับปะรดแช่อิ่มกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ความชื้นของสับปะรดแช่อิ่มลดลงได้ดีขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงปริมาณน้ำในสับปะรดแช่อิ่มสามารถระเหยได้ดี

4.6 การทดลองที่ความเร็วลมของอากาศแตกต่างกัน

จากการเปรียบเทียบความชื้นเฉลี่ยที่ลดลงของสับปะรดแช่อิ่มกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ความเร็วลมแตกต่างกัน พบว่า เมื่อความเร็วลมของอากาศสูงขึ้น ทำให้ความชื้นของสับปะรดแช่อิ่มลดลงได้ดีขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำในสับปะรดแช่อิ่มสามารถระเหยได้ดี

4.7 การทดลองที่ระยะเวลาแตกต่างกัน

จากการเปรียบเทียบความชื้นเฉลี่ยที่ลดลงของสับปะรดแช่อิ่มกับที่ระยะเวลาต่างๆ พบว่า เมื่อเวลาที่ใช้อบแห้งมากขึ้น ทำให้ความชื้นของสับปะรดแช่อิ่มลดลงได้ดีขึ้น แต่ถ้าระยะเวลาที่ใช้นานเกินไปจะทำให้สับปะรดแช่อิ่มมีลักษณะแห้ง ไม่น่ารับประทาน

4.8 เปรียบเทียบการทดลองอบแห้งสับปะรดแช่อิ่มชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้เครื่องทำความร้อนด้วยกับการทดลองอบแห้งสับปะรดแช่อิ่มชนิดใช้เครื่องทำความร้อนอย่างเดียวที่สภาวะดีที่สุด

จากการเปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเฉลี่ยของสับปะรดแช่อิ่มกับเวลาที่ใช้อบแห้ง ในการทดลองอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้เครื่องทำความร้อนด้วยกับการทดลองอบแห้งชนิดใช้เครื่องทำความร้อนอย่างเดียว พบว่าการทดลองอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้เครื่องทำความร้อนด้วยมีค่าความชื้นเฉลี่ยลดลงมากกว่าการทดลองอบแห้งชนิดใช้เครื่องทำความร้อนอย่างเดียว

4.8.1 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate)

จากการคำนวณจะได้ว่า การทดลองอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้เครื่องทำความร้อนด้วยมีอัตราการ อบแห้งเท่ากับ 0.55 กิโลกรัมน้ำที่ระเหยต่อชั่วโมง และการทดลองอบแห้งชนิดใช้เครื่องทำความร้อนอย่างเดียวมีอัตราการอบแห้งเท่ากับ 0.23 กิโลกรัมน้ำที่ระเหยต่อชั่วโมง พบว่า ในช่วงเวลาเท่ากัน การทดลองอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้เครื่องทำความร้อนด้วยสามารถอบแห้งสับปะรดแช่อิ่มได้ในปริมาณที่สูงกว่ามาก คือ 0.32 กิโลกรัมน้ำที่ระเหยต่อชั่วโมง

4.8.2 ความสิ้นเปลืองพลังงาน

4.8.2.1 ความสิ้นเปลืองพลังงาน

จากการคำนวณจะได้ว่า การทดลองอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้เครื่องทำความร้อนด้วย จะต้องใช้พลังงานในการทำให้ปริมาณน้ำระเหยจากสับปะรดแช่อิ่มเท่ากับ 111.91 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย และการทดลองอบแห้งชนิดใช้เครื่องทำความร้อนอย่างเดียว จะต้องใช้พลังงานในการทำให้ปริมาณน้ำระเหยจากสับปะรดแช่อิ่มเท่ากับ 388.02 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย พบว่า ในการทำให้ปริมาณน้ำระเหยจากสับปะรดแช่อิ่มที่ปริมาณเท่ากัน การทดลองอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้เครื่องทำความร้อนด้วยจะใช้พลังงานน้อยกว่าการทดลองอบแห้งชนิดใช้เครื่องทำความร้อนอย่างเดียว ซึ่งการทดลองอบแห้งชนิดใช้เครื่องทำความร้อนอย่างเดียวจะใช้พลังงานมากกว่าถึง 276.11 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย

4.8.2.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SMER)

จากการคำนวณจะได้ว่า การทดลองอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้เครื่องทำความร้อนด้วย สามารถทำให้ปริมาณน้ำระเหยจากสับปะรดแช่อิ่มเท่ากับ 0.0322 กิโลกรัมน้ำที่ระเหยต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง และการทดลองอบแห้งชนิดใช้เครื่องทำความร้อนอย่างเดียวสามารถทำให้ปริมาณน้ำระเหยจากสับปะรดแช่อิ่ม เท่ากับ 0.0093 กิโลกรัมน้ำที่ระเหยต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง พบว่า พลังงานไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์-ชั่วโมงสามารถทำให้ปริมาณน้ำระเหยจากสับปะรดแช่อิ่มจากการทดลองอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้เครื่องทำความร้อนด้วยได้มากกว่าการทดลองอบแห้งชนิดใช้เครื่องทำความร้อนอย่างเดียว เท่ากับ 0.0229 กิโลกรัมน้ำที่ระเหยต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง

4.8.3 ระยะเวลาที่ใช้อบแห้ง

จากการทดลองอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้เครื่องทำความร้อนด้วยใช้เวลาอบแห้งเท่ากับ 16 ชั่วโมง และการทดลองอบแห้งชนิดใช้เครื่องทำความร้อนอย่างเดียวใช้เวลาอบแห้งเท่ากับ 36 ชั่วโมง พบว่า การทดลองอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้เครื่องทำความร้อนด้วย ใช้เวลาอบแห้งน้อยกว่าการทดลองอบแห้งชนิดใช้เครื่องทำความร้อนอย่างเดียว เท่ากับ 20 ชั่วโมง

4.8.4 เปรียบเทียบค่าใช้จ่าย

จากการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างการทดลองอบแห้งสับปะรดแช่อิ่มชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้เครื่องทำความร้อนด้วย กับการทดลองอบแห้งสับปะรดแช่อิ่มชนิดใช้เครื่องทำความร้อนอย่างเดียว พบว่า ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการทดลองอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้เครื่องทำความร้อนด้วยน้อยกว่าการทดลองอบแห้งชนิดใช้เครื่องทำความร้อนอย่างเดียวถึง 90. 2 บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย

5. สรุปผลการวิจัย

1.การอบแห้งสับปะรดแช่อิ่มชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้เครื่องทำความร้อนด้วย

1.1 อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทดลองคือ 60 องศาเซลเซียส

1.2 ความเร็วลมของอากาศที่เหมาะสมสำหรับการทดลองคือ 1.20 เมตรต่อวินาที

1.3 เวลาที่ใช้ในการอบแห้งประมาณ 16 ชั่วโมง

1.4 อัตราการอบแห้ง สามารถทำได้ 0.55 กิโลกรัมน้ำที่ระเหยต่อชั่วโมง

1.5 ความสิ้นเปลืองพลังงาน ปริมาณพลังงานที่ใช้ในระบบเท่ากับ 111.91 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย หรือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SMER) เท่ากับ 0.0322 กิโลกรัมน้ำที่ระเหยต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง

1.6 จากการประเมินค่าใช้จ่ายในงานวิจัยครั้งนี้ พบว่า จะมีค่าใช้จ่ายในการ อบแห้งสับปะรดแช่อิ่มทั้งหมดเท่ากับ 46.88 บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย โดยแยกออกเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งเท่ากับ 8.95 บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเท่ากับ 36.02 บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย และค่าใช้จ่ายในด้านการบำรุงรักษาเท่ากับ 1.91 บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย

2. การอบแห้งสับปะรดแช่อิ่มชนิดใช้เครื่องทำความร้อนอย่างเดียว

2.1 อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทดลองคือ 60 องศาเซลเซียส

2.2 ความเร็วลมของอากาศที่เหมาะสมสำหรับการทดลองคือ 1.20 เมตรต่อวินาที

2.3 เวลาที่ใช้ในการอบแห้งประมาณ 36 ชั่วโมง

2.4 อัตราการอบแห้ง สามารถทำได้ 0.23 กิโลกรัมน้ำที่ระเหยต่อชั่วโมง

2.5 ความสิ้นเปลืองพลังงาน ปริมาณพลังงานที่ใช้ในระบบเท่ากับ 388.02 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย หรือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SMER) เท่ากับ 0.0093 กิโลกรัมน้ำที่ระเหยต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง

2.6 จากการประเมินค่าใช้จ่ายในงานวิจัยครั้งนี้ พบว่า จะมีค่าใช้จ่ายในการ อบแห้งสับปะรดแช่อิ่มทั้งหมดเท่ากับ 137.08 บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย โดยแยกออกเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งเท่ากับ 10.92 บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย ค่าใช้จ่ายด้าน

พลังงานเท่ากับ 125.40 บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย และค่าใช้จ่ายในด้านการบำรุงรักษาเท่ากับ 0.76 บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย

3.การอบแห้งสับปะรดแช่อิ่มด้วยฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้เครื่องทำความร้อนด้วยมีประสิทธิภาพสูงกว่าการอบแห้งด้วยเครื่องทำความร้อนอย่างเดียว

4.ในการลงทุนสร้างเครื่องอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้เครื่องทำความร้อนด้วย จะมีค่าลงทุนในการสร้างสูงกว่าการลงทุนสร้างเครื่องอบแห้งชนิดใช้เครื่องทำความร้อนอย่างเดียว แต่ค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานจะมีค่าต่ำกว่า ดังนั้น ถ้าพิจารณาว่าเดินเครื่องตลอด 24 ชั่วโมง ในวันทำงานจริง จะสามารถคืนทุนได้ภายในระยะเวลาประมาณ 1 ปี 9 เดือน และสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 35 %

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ บริษัท เนเชอรัลกรีน อินโนเวชัน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ยืมเครื่องอบแห้งชนิดใช้ฮีตปั๊มร่วมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับใช้ในการทำวิจัย และคุณกิตติ ลีลาวณิชไชย ที่ได้ช่วยเหลือให้คำปรึกษาและข้อแนะนำต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ โรงงาน เกรทฟู้ดส์ (ดิไฮเดรชัน) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สับปะรดแช่อิ่มสำหรับใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณภาควิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ยืมใช้เครื่องวัดความชื้น

เอกสารอ้างอิง

[1] อารีย์ เทียนไชย. การศึกษาหาพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์อบแห้งสับปะรดแช่อิ่ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ , 2532

[2] ประทาน รักปรางค์. การอบแห้งผลไม้โดยใช้ปั๊มความร้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2539.