

การหาอัตราการแห้งตัวของขนุนโดยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดระบบสุญญากาศ

Determination of Drying Rate of Jackfruit by Infrared Dryer, Vacuum System

เรวัตม์ คำวัน^{1*}, สุรสิทธิ์ เทียงจันทา² และสวัสดิ์ กี่ไสย³

Rawat Kumwan^{1*}, Surasit Thiangchanta² and Sawat Kesai³

^{1*,2,3}สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

128 ถ.ห้วยแก้ว ต.ช้างเผือก อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50300 โทรศัพท์ 0 5392 1444 E-mail : rawat-me@rmutl.ac.th

^{1*,2,3}Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna (RMUTL)

Chaing Mai 128 Huay Kaew Rd, Muang District, Chiang Mai, 50300, Thailand

E-mail : rawat-me@rmutl.ac.th, Tel: +66 5392 1444, Fax: +66 5321 3183

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งขนุน โดยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดระบบสุญญากาศ เพื่อหาอุณหภูมิและระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับเนื้อขนุนที่เหมาะสม เครื่องอบแห้งประกอบด้วย ถังอบแห้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.51 m ยาว 0.8 m ฮีตเตอร์อินฟราเรดขนาด 220 V 250 W จำนวน 2 หลอด เครื่องทำสุญญากาศขนาด 13.42 m³/hr ติดตั้งชุดดักน้ำโดยใช้ระบบทำความเย็นแบบอัดไอขนาด 0.252 kW ทดสอบอบเนื้อขนุนจำนวน 2 kg ที่ความชื้นเริ่มต้น 350 - 400%_{db}. ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส ทำการปรับเปลี่ยนความดันสัมบูรณ์ 1 5 10 และ 15 kPa และทำการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหลอดฮีตเตอร์อินฟราเรดกับชั้นวางขนุน 12 15 และ 18 cm อบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้ายมีค่าไม่เกิน 19%_{db}. พบว่าสภาวะที่เหมาะสมการอบแห้งเนื้อขนุน คือ อุณหภูมิอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 1 kPa ระยะห่างของฮีตเตอร์อินฟราเรดกับชั้นวางที่ 12 cm ซึ่งใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด 480 นาที สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด 21.67 MJ/kg และอัตราการอบแห้งที่สูงที่สุด 0.172 kg/hr เนื่องจากการทำสุญญากาศที่ความดันต่ำ สามารถลดอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำภายในเนื้อขนุน และระยะห่างของฮีตเตอร์อินฟราเรดกับวัสดุที่ใกล้กับเนื้อขนุน ให้กำลังของอินฟราเรดต่อพื้นที่สูงมีผลทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : ผลของสุญญากาศ, การอบแห้งขนุน, เครื่องอบแห้งอินฟราเรด

Abstract

This paper was to study the optimal conditions for jackfruit drying. By infrared dryer, vacuum system. To find the temperature and the distance between the infrared tubes and the appropriate jackfruit. The dryer consists of diameter 0.51 m, length 0.8 m. of drying

room, 2 infrared heaters 220 V. 250 W. the vacuum pump work rate 13.42 m³/hr. And eradication moisture with the Compressor of Refrigeration System size 0.252 kW. The sample for test used jackfruit 2 kg. standard of sample before baking is 350 - 400% of dry basis. Baking sample at 50, 55 and 60 °C. And Change the absolute pressure on 1, 5, 10 kPa and 15 kPa. And Change rang from infrared heater to the jackfruit at 12, 15, and 18 cm. Last moisture will be less than 19% of dry basis. The optimum conditions for jackfruit drying were Drying temperature at 60 °C, 1 kPa, infrared heater distance to 12 cm shelves for minimum drying time of 480 minutes, lowest specific energy consumption of 21.67 MJ/kg, and the highest drying rate was 0.172 kg/hr due to the low pressure vacuum. Can reduce the boiling point of water within the jackfruit. And the distance of the infrared heater to the material near the jackfruit. Higher power consumption per unit of infrared heater. This results in a decrease in specific energy consumption. Increased drying rate.

Keywords : Effect of Vacuum, The Jackfruit drying, Infrared dryers

1.บทนำ

ขนุนเป็นผลไม้ที่นิยมบริโภคมีรสชาติหวาน กลิ่นหอม ในช่วงฤดูกาลที่ขนุนมีปริมาณมากเกินความต้องการของตลาดส่งผลขนุนมีราคาตกต่ำ การแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ขนุนให้สามารถเก็บรักษาไว้เพื่อเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปจะใช้วิธีการทำแห้ง เช่น การตากแดด การอบแห้งแบบลมร้อน การอบแห้งแบบเยือกแข็ง และการอบแห้งสุญญากาศ เป็นต้น โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปขนุน เช่น การอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดและการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมระหว่างรังสีอินฟราเรดกับลมร้อน คือ สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง โดยที่ยังคงรักษาคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์ขนุนและความยอมรับในการบริโภคของขนุนของผู้บริโภคได้เป็นอย่างดี (Supawan, T., 2011) และการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับระบบสุญญากาศ ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพและยังสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้ โดยอาจมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานที่สูงกว่าการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งมีความสิ้นเปลืองต่ำ แต่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ต่ำมีการปนเปื้อนสูง ใช้เวลาในการอบแห้งนาน และอุณหภูมิอบแห้งไม่สม่ำเสมอ โดยการอบแห้งแบบสุญญากาศ เป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมการอบแห้ง (Junlakan, W., 2017) การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบแห้ง (Jutarut, T., 2014) ซึ่งการอบแห้งขนุนโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับระบบสุญญากาศ เป็นการให้ขนุนรับรังสีความร้อนโดยตรงส่งผลให้น้ำในเนื้อขนุนระเหยได้เร็ว (Tirawanichakul, S., 2014)

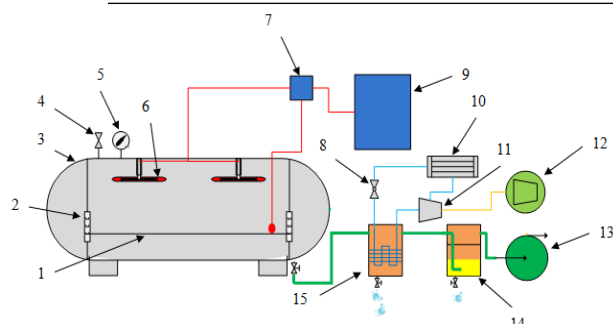
ส่วนระบบสุญญากาศสามารถช่วยลดจุดเดือดของน้ำในเนื้อขนุน และส่งผลให้มีอัตราความชื้นลดลงมากกว่า (Nuthong, P., 2014) เมื่อเทียบกับการอบที่สภาวะความดันบรรยากาศ ณ อุณหภูมิเดียวกัน จากงานวิจัยการอบแห้งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด (Sa-Adchom, P., 2014) พบว่าเมื่อลดความดันสัมบูรณ์หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง จากการศึกษาการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนของเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน พบว่าอัตราการอบแห้งมีค่าแปรผันตรงกับกำลังของหลอดอินฟราเรด

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาหาอัตราการแห้งตัวของเนื้อขนุน ที่สภาวะเหมาะสม ที่ความดันสัมบูรณ์ อุณหภูมิ และระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับภาควัสดุ โดยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดระบบสุญญากาศ

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้ได้ใช้เครื่องอบแห้งอินฟราเรดระบบสุญญากาศที่มีชุดดักน้ำด้วยน้ำมัน และชุดดักน้ำด้วยระบบทำความเย็น เพื่อลดอุณหภูมิและความชื้นที่ปนกับลมร้อนซึ่งส่งผลให้เกิดความเสียหายกับระบบสุญญากาศ ห้องอบทรงแคปซูลวางตัวในแนวนอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.51 m ยาว 0.8 m หนา 0.005 m ติดตั้งฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบแผ่นยี่ห้อ Infara รุ่น aseries ขนาด 60x245 mm ขนาด 220 Volt 250 W จำนวน 2 หลอด ชุดดักน้ำด้วยระบบทำความเย็น ขนาด 0.252 kW ชุดดักน้ำด้วยน้ำมันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 m x 0.27 m ชุดทำสุญญากาศ ขนาด 13.416 m³/hr ซึ่งประกอบด้วยคอมเพรสเซอร์ mitsubishi รุ่น cr2211l-a จำนวน 2 ตัว ต่อแบบอนุกรม มีมอเตอร์ขนาด 2 HP 1450 rpm เป็นต้นกำลัง บันทึกข้อมูลโดย เครื่องชั่งน้ำหนัก ยี่ห้อ Azano รุ่น LVC-50 ช่วงการชั่งน้ำหนัก 0.001-600 kgf ความละเอียด 0.001 kgf อุปกรณ์วัดความดันสุญญากาศ ยี่ห้อ TK ช่วงการวัด 0 ถึง -76 cm.Hg ชุดควบคุมอุณหภูมิ เครื่องวัดอุณหภูมิ ยี่ห้อ DIGICON รุ่น MD-700N ใช้กับสายเทอร์โมคัปเปิล Type K ความละเอียด 0.1 °C และเครื่องวัดการใช้กระแสไฟฟ้า ยี่ห้อ HOLLEY ช่วงการวัด 0.1 ถึง 1,000 kW-h ความละเอียด 0.1 kW-h รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 1



- | | | |
|----------------------------|------------------------|----------------------------------|
| 1 ตะแกรงผลิตภัณฑ์ | 6 หลอดอินฟราเรด | 11 เครื่องอัดไอ |
| 2 ตัวปรับระยะห่างของตะแกรง | 7 ชุดควบคุมอุณหภูมิ | 12 ชุดต้นกำลัง |
| 3 ถังอบแห้งสุญญากาศ | 8 วาล์วลดความดัน | 13 เครื่องทำสุญญากาศ |
| 4 วาล์วอากาศ | 9 หน่วยควบคุมและแสดงผล | 14 ชุดเติมน้ำด้วยน้ำมัน |
| 5 มาตรวัดความดัน | 10 เครื่องควบแน่น | 15 ชุดเติมน้ำด้วยชุดท่อคอยล์เย็น |

ภาพที่ 1 ส่วนประกอบเครื่องอบแห้งอินฟราเรดระบบสุญญากาศ

การวิจัยทดสอบอบแห้งเนื้อขนุน เพื่อศึกษาผลของความดันสัมบูรณ์ และอุณหภูมิที่ใช้การอบแห้งเนื้อขนุนโดยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดระบบสุญญากาศ วัสดุอบแห้งใช้เนื้อขนุนความหนา 3 mm จำนวน 2 kg ที่ความชื้นเริ่มต้น 350-400 %_{db}. ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 55 และ 60 °C ทำการปรับเปลี่ยนความดันสัมบูรณ์ 1 5 10 และ 15 kPa และทำการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหลอดฮีตเตอร์อินฟราเรดกับชั้นวางขนุน 12 15 และ 18 cm อบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้ายมีค่าไม่เกิน 19 %_{db} ซึ่งช่วงการทดลองทำการบันทึกข้อมูลน้ำหนักขนุนและอุณหภูมิในห้องอบแห้งต่อช่วงเวลา



ภาพที่ 2 เครื่องอบแห้งอินฟราเรดระบบสุญญากาศ กรณีศึกษาการอบเนื้อขนุน

สำหรับการทดลองการอบแห้งเนื้อขนุนโดยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดระบบสุญญากาศ สามารถแสดงค่าอัตราส่วนความชื้น อัตราการอบแห้ง และการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพื่อวิเคราะห์ผลความดันสุญญากาศ ระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับภาควัสดุ และอุณหภูมิ

ที่เหมาะสมในการใช้อบแห้งเนื้อขนุน โดยค่าอัตราส่วนความชื้นวัสดุ (Moisture Ratio; MR) (Soponronnarit, S., 1997) สามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} \quad (1)$$

เมื่อ M_t คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ ของวัสดุ (%drybasis)

M_i คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (%drybasis)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ (%drybasis)

เนื่องจากการอบแห้งด้วยอินฟราเรดระบบสุญญากาศวัสดุมีความชื้นสมดุลที่ต่ำมาก การคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้น (MR) ในงานวิจัยนี้เป็นการคำนวณค่าโดยประมาณ คือ ไม่คิดค่าความชื้นสมดุล โดยตั้งสมมติฐานว่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น จึงกำหนดให้ $M_{eq} = 0$ ดังนั้นค่าอัตราส่วนความชื้น (Soponronnarit, S., 1997) สามารถลดรูปได้ดังสมการ

$$MR = \frac{M_t}{M_i} \quad (2)$$

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate: DR) คืออัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงความชื้นในวัสดุอบแห้งต่อเวลาในหน่วย kg/hr สามารถหาได้ดังสมการ

$$DR = \frac{m_d(M_i - M_f)}{t} \quad (3)$$

เมื่อ m_d คือ มวลของวัสดุแห้งไร้ความชื้น (kg)

M_f คือ ความชื้นสุดท้ายของวัสดุ (%drybasis)

t คือ เวลา (hr)

การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption: SEC) คือพลังงานรวมที่ใช้ในการอบแห้งต่อหนึ่งหน่วยมวลความชื้นของวัสดุอบแห้งในหน่วย MJ/kg_{Water} สามารถหาได้ดังสมการ

$$SEC = \frac{(E_{infra} + E_{vac} + E_{dryer})}{m_w} \quad (4)$$

เมื่อ E_{infra} คือ พลังงานที่ใช้กับหลอดอินฟราเรด (kWh)

E_{vac} คือ พลังงานที่ใช้กับเครื่องทำสุญญากาศ (kWh)

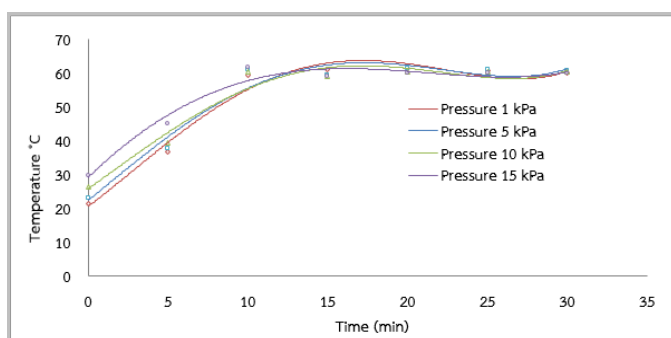
E_{dryer} คือ พลังงานที่ใช้ของชุดตากน้ำ (kWh)

m_w คือ มวลของน้ำที่ระเหยจากวัสดุ (kg)

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

จากวิธีดำเนินการวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทดสอบโดยใช้เนื้อขนุนจำนวน 2 kg ที่ความชื้นเริ่มต้น 350 - 400%db. ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 55 และ 60 °C ทำการปรับเปลี่ยนความดันสัมบูรณ์ 1 5 10 และ 15 kPa และทำการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหลอดฮีตเตอร์อินฟราเรดกับชั้นวางขนุน 12 15 และ 18 cm อบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้ายมีค่าไม่เกิน 19%db

4.1 ผลของอุณหภูมิของห้องอบแห้ง ที่ความดันสัมบูรณ์ต่าง ๆ

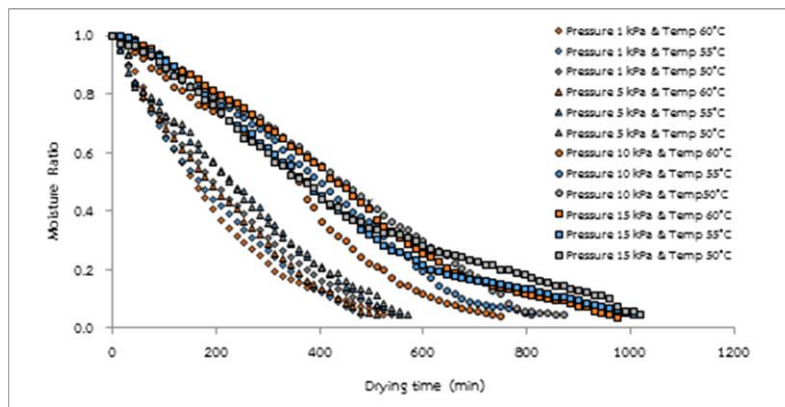


ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของห้องอบแห้งอินฟราเรดระบบสุญญากาศ ที่สภาวะความดันสัมบูรณ์ 1, 5, 10 และ 15 kPa

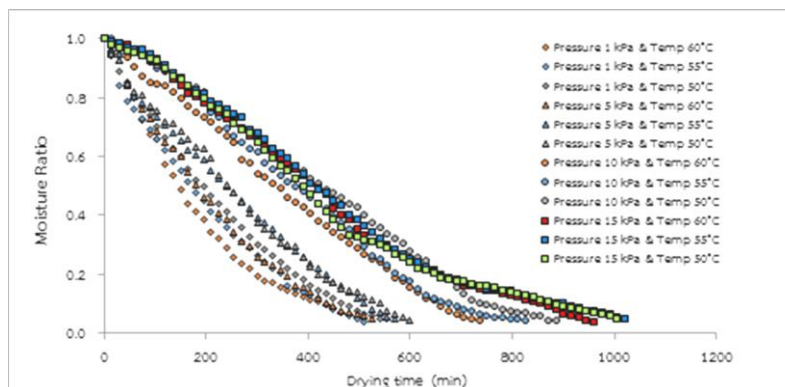
ภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของห้องอบแห้ง ที่สภาวะเริ่มต้นก่อนให้ความร้อนพบว่าที่ห้องอบที่ความดันสัมบูรณ์ต่ำ จะมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ต่ำกว่า ซึ่งเป็นผลจากที่สภาวะความดันต่ำ อุณหภูมิจะต่ำ โดยเริ่มให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ในช่วง 22- 30 °C พบว่าในช่วง 10 นาทีแรก จะมีอัตราการทำความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ หลังจากนั้นจะพบว่าที่ในช่วง 12 - 15 นาที ที่ความดันสัมบูรณ์ต่ำ สามารถเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องอบได้สูงกว่าความดันสัมบูรณ์สูง เนื่องจากที่สภาวะความดันต่ำหรือความดันสุญญากาศประสิทธิภาพในการทำความร้อนในห้องอบสูงกว่า จากนั้นในแต่ละความดันสัมบูรณ์ ค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากถูกควบคุมโดยชุดควบคุมอุณหภูมิ

4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อขนุน ที่ระยะห่าง และความดันสัมบูรณ์ต่าง ๆ

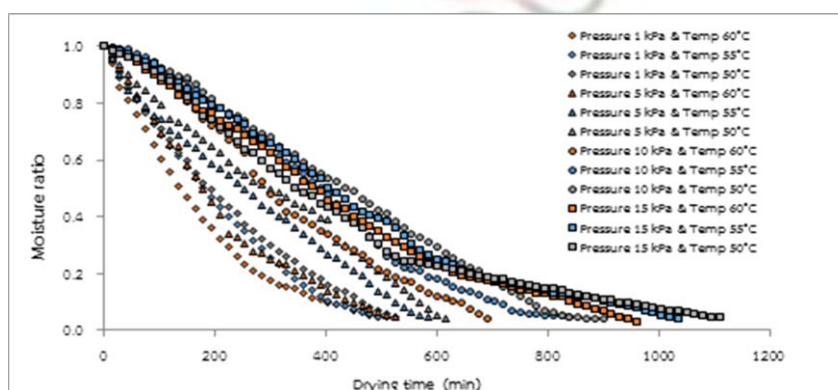
ผลของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อขนุน ที่ระยะห่าง และความดันสัมบูรณ์ ดังภาพที่ 4 5 และ 6



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อขนุน ที่ระยะห่าง 12 cm



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อขนุน ที่ระยะห่าง 15 cm



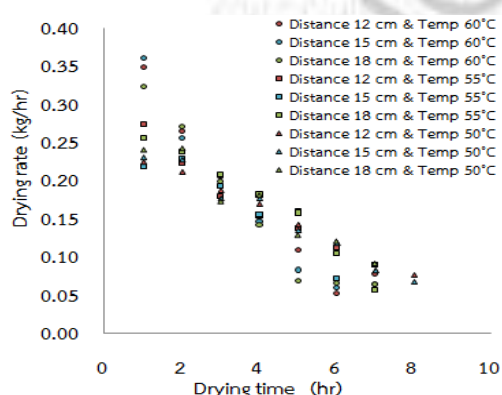
ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อขนุน ที่ระยะห่าง 18 cm

จากภาพที่ 4 5 และ 6 โดยเมื่อพิจารณาที่ของระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับถาดวัสดุ ที่ 12 15 และ 18 cm ที่สภาวะความดันสัมบูรณ์ 1 5 10 และ 15 kPa และอุณหภูมิที่ใช้การอบแห้ง 60 55 50 พบว่าที่สภาวะเหมาะสมการอบแห้งเนื้อขนุน ที่ระยะห่าง 12 cm ที่ความดันสูญญากาศ 1 kPa อุณหภูมิ 60°C ใช้ระยะเวลาในการอบน้อยที่สุด 480 นาที ซึ่งสามารถอบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้ายมีค่าไม่เกิน 19 %db ใช้เวลาน้อยที่สุด ดังตารางที่ 1

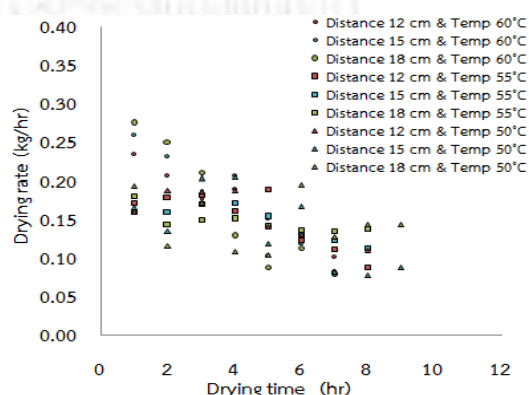
ตารางที่ 1 ผลของความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับภาควัตถุ ที่สภาวะความดันสุญญากาศ และอุณหภูมิที่ใช้การอบแห้ง ที่มีผลต่อเวลาการอบแห้งเนื้อขนุน

Distance (mm)	absolute pressure (kpa)	Drying time (min) temperature		
		50 °C	55 °C	60 °C
12	1	540	525	480
	5	570	555	510
	10	870	810	750
	15	1020	1005	975
15	1	555	525	510
	5	600	570	525
	10	885	825	735
	15	1020	1005	960
18	1	525	510	495
	5	615	585	525
	10	900	840	690
	15	1100	1035	960

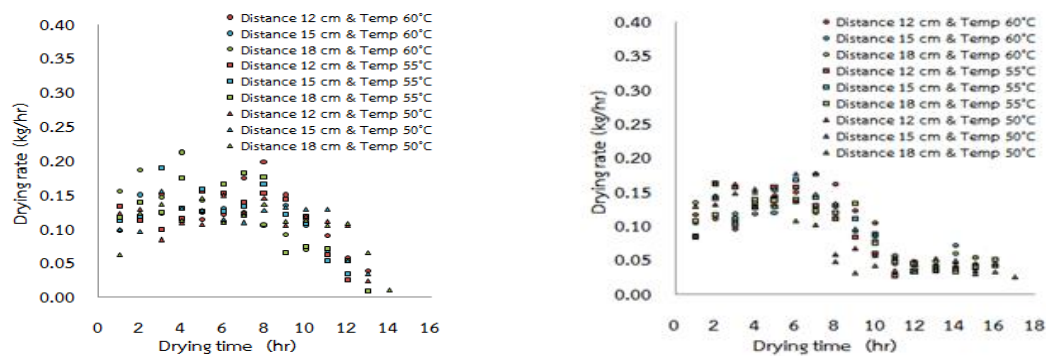
4.3 ผลของความสัมพันธ์ของความดันสัมบูรณ์ ที่มีต่ออัตราการอบแห้ง



A. ความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้ง ที่ความดัน 1 kPa



B. ความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้ง ที่ความดัน 5 kPa



C. ความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้ง ที่ความดัน 10 kPa D. ความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งที่ความดัน 15 kPa

ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้ง ที่สภาวะความดันสัมบูรณ์ 1 - 15 kPa

จากภาพที่ 7 แสดงผลของอัตราการอบแห้งที่สภาวะความดันสุญญากาศ 1 - 15 ที่ระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับถาดวัสดุที่ 12 - 18 cm อุณหภูมิที่ใช้การอบแห้ง 50 - 60 พบว่าที่ความดันสุญญากาศ 1 kPa มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าทุก ๆ ความดันสัมบูรณ์กล่าวคือการลดความดันสัมบูรณ์หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น และพบว่าอุณหภูมิที่อบแห้งที่สูงมีผลทำให้อัตราการอบแห้ง โดยที่อุณหภูมิที่อบแห้งที่ 60 °C อัตราการอบแห้งสูงที่สุด ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลของความสัมพันธ์ของสภาวะความดันสุญญากาศ ระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับถาดวัสดุ และอุณหภูมิที่ใช้การอบแห้ง ที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งเนื้อขนุน

absolute pressure (kPa)	Distance (mm)	Drying Rate _{ave} (kg/hr)		
		temperature		
		50 °C	55 °C	60 °C
1	12	0.151	0.168	0.172
	15	0.149	0.163	0.168
	18	0.147	0.151	0.162
5	12	0.148	0.150	0.169
	15	0.144	0.147	0.168
	18	0.142	0.145	0.163
10	12	0.118	0.126	0.128
	15	0.111	0.121	0.125
	18	0.104	0.114	0.122
15	12	0.090	0.094	0.106
	15	0.089	0.092	0.099

จากการประเมินและการวิเคราะห์ เวลาในการอบแห้งชิ้น และอัตราการอบแห้งเฉลี่ย ยังไม่สามารถ ระบุสภาวะเหมาะสมการอบแห้งเนื้อขนุนได้ เพราะยังต้องพิจารณาปัจจัยของคุณภาพ และความสิ้นเปลืองพลังงานมาประกอบ ดังตารางที่ 3 และภาพที่ 8 จึงสามารถสรุปได้ว่าสภาวะ เหมาะสมการอบแห้งเนื้อขนุนที่ความดันสุญญากาศ 1 kPa อุณหภูมิ 60 °C ที่ระยะห่าง 12 cm พบว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งที่ความดัน 1 kPa มีค่าน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากที่ภาวะความดันต่ำมีผลทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์สามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำทำให้ใช้เวลา อบแห้งน้อยลง ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความดันสุญญากาศและอุณหภูมิอบแห้ง ส่งผลต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอย่างมีนัยยะ โดยทำให้มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ จะลดลง เมื่อลดค่าความดันสมบูรณ์หรือทำการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งที่สภาวะความดันสุญญากาศ 1 - 15 kPa ที่มีผลต่อ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งเนื้อขนุน

Condition	Absolute pressure (kPa)			
	1	5	10	15
Average drying time (min)	480	510	750	975
Average drying Rate (kg/hr)	0.172	0.169	0.128	0.106
Average SEC (MJ/kg _{water})	21.67	24.56	28.94	31.66



ก่อนการอบแห้ง



หลังจากการอบแห้ง

ภาพที่ 8 แสดงการอบแห้งเนื้อขนุนโดยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดระบบสุญญากาศ

5. สรุปผลการวิจัย

การหาอัตราการแห้งตัวของขนุน โดยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดระบบสุญญากาศ ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมการอบแห้งเนื้อขนุน คือ อุณหภูมิอบแห้งที่ 60 °C ความดัน 1 กิโลพาสกาล ระยะห่างของฮีตเตอร์อินฟราเรดกับชั้นวางที่ 12 cm ซึ่งใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด

480 นาที สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด 21.67 MJ/kg และอัตราการอบแห้งที่สูงที่สุด 0.172 kg/hr เนื่องจากการทำสุญญากาศที่ความดันต่ำ สามารถลดอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำภายในเนื้อขนุน และระยะห่างของฮีตเตอร์อินฟราเรดกับวัสดุที่ใกล้กับเนื้อขนุน มีค่าพลังงานต่อหน่วยพื้นที่หลอดฮีตเตอร์อินฟราเรดที่สูงกว่า มีผลทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ ที่ได้สนับสนุนทุนโครงการงานวิจัย และขอขอบคุณ นายชินทร์ เฟื่องนอก นายณัฐพงศ์ บุญยัง และนายปวีร์ เจริญกุล กลุ่มผู้ช่วยวิจัย และสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ สำหรับงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- Junlakan, w., Tirawanichakul, S., & Yamsaengsung, R. (2017). Effects of vacuum drying on structural changes of bananas, pineapples, and apples. **Journal of Food Engineering** ,106(4), 298-305. (in Thai)
- Jutarut, T., Supawan, T., Yutthana, T., (2014). Strategic Development of Crisp Tiny Anchovy Using Hot Air and Infrared Drying. **Burapha Science Journal**, 106(4), 3-10. (in Thai)
- Nuthong, P., Dijkanarukkul, P., Ratchatawan Am-Oht1,R. (2014). Thermal Properties Analyses of Combined Infrared and Hot Air Dryer. **UBU Engineering Journal**, 7(2), 73-81. (in Thai)
- Tirawanichakul, S., Lamaepae, S., and Tirawanichakul, Y. (2014). Combined infrared /microwave and hot air drying for jackfruit: Kinetics, quality and sensory analysis. **Burapha Science Journal**, 17(2), 117-129. (in Thai)
- Sa-Adchom, P. and Swasdisevi,T.(2014). Pork Slices Drying Using a Combined Vacuum and Far-Infrared Radiation Technique. **Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal**, 7(1), 83-97. (in Thai)
- Supawan, T., Jutarut T., Chalerm P., Ratchaneekorn N., Yutthana T., (2011). Effect of Drying Condition on Kinetic and Quality of Jackfruit Drying. **Thaksin University Journal**, 23(4), 83-91. (in Thai)
- Soponronnarit, S., (1997). **Drying of seeds and certain foods**. Bangkok : King Mongkut's University of Technology Thonburi. (in Thai)