การนำความร้อนทิ้งของระบบทำน้ำเย็นมาใช้ในการอบแห้งในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด

Utilization of Heat from Chiller in Infrared Vacuum Dryer

ปฏิวัติ เกิดมงคล จุฬาภรณ์ เบญจปิยะพร ฉัตรชัย เบญจปิยะพร อภิชาติ อาจนาเสียว
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการนำความร้อนทิ้งของระบบทำน้ำเย็นมาใช้ในการอบแห้งในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด โดยทำการศึกษา อัตราการอบแห้ง เวลาในการอบแห้งและการใช้พลังงาน เมื่อมีการใช้แหล่งความร้อนจากอินฟราเรดแหล่งเดียวกับการใช้แหล่งความร้อนจากอินฟราเรดร่วมกับการนำความร้อนทิ้งของระบบทำน้ำเย็น ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C ความดัน 0.1 บาร์ ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการอบแห้งได้แก่ พริกและสับปะรด ที่มีความชื้นเริ่มต้น 329% และ 567% d.b. ตามลำดับ อบแห้งจนความชื้นสุดท้ายของพริกและสับปะรดเหลือ 12% และ 20% d.b. ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้งของพริกและสับปะรดมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงแรกการใช้แหล่งความร้อนจากอินฟราเรดจะสูงกว่าการใช้แหล่งความร้อนร่วมประมาณ 0.005 และ 0.007 (kg/min).(kg water/kg dry product) ตามลำดับ ส่วนเวลาที่ใช้ในการอบแห้งพริกและสับปะรด คือ 5 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ พลังงานที่ใช้อบแห้งจากอินฟราเรดแหล่งเดียว เท่ากับ 5.56 และ 8.45 kwh /วัตถุดิบสด 1 kg ตามลำดับ เมื่อนำความร้อนทิ้งของระบบทำน้ำเย็นมาใช้ในการอบแห้งพริกและสัปปะรดใช้พลังงาน เท่ากับ 4.8 และ 14.2 kwh /วัตถุดิบสด 1 kg ซึ่งสามารถช่วยลดพลังงานลงได้ 13.9 และ 14.2 % ตามลำดับ

คำสำคัญ : สุญญากาศ, อินฟราเรด, ความร้อนทิ้ง, พลังงาน

Abstract

This article presents the utilization of waste heat for chiller system with the drying process in a infrared vacuum dryer. The experiments were conducted to compare the drying rate, the drying time and the energy consumption between the cases of using an infrared heat source alone and using an infrared heat source with the waste heat from a cooling water system. The temperature and the pressure of the dryer chamber were 60 °C and 0.1 bar, respectively. Chillies and pineapples were dried from 329% to 12% and 567% to 20% d.b., respectively. The results showed that the drying rates of both products had a similar trend. For the initial period, using of infrared heat source alone provided the higher rate of drying than the combined heat sources about 0.005 and 0.007 (kg/min). (kg water/kg [dry product) for chillies and pineapple, respectively. The drying time to obtain the final moisture content were 5 and 8 hours,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

respectively. The energy usage of using infrared alone were 5.56 and 8.45 kwh/kg fresh product for chillies peppers and pineapple, respectively. It can be concluded that energy usage of the combined sources was reduced to 4.8 and 7.25 kwh/kg, respectively. The waste heat from the cooling water system used in the vacuum infrared dryer can reduce the power consumption for peppers and pineapple drying about 13.9 and 14.2%, respectively.

Keywords : Vacuum, Infrared, Waste heat, Energy

1. บทนำ

การอบแห้งด้วยสุญญากาศเป็นกระบวนการลดความดันในขณะอบแห้ง เพื่อช่วยให้น้ำในเนื้อผลิตภัณฑ์ระเหยที่อุณหภูมิต่ำซึ่งเป็นการลดพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งด้วย [1] ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งด้วยสุญญากาศมีสี รสชาติ กลิ่น และคุณประโยชน์ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์สด เพราะการทำงานของเอนไซม์ที่เป็นต้นเหตุทำให้สีและรสชาติเปลี่ยนแปลงไม่สามารถเกิดขึ้นได้มาก เนื่องจากอุณหภูมิในการอบแห้งต่ำ ปริมาณออกซิเจนน้อย และใช้เวลาไม่นาน เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อนทั่วไป [2] แหล่งความร้อนที่นำมาใช้อบแห้งในสภาวะสุญญากาศมีหลายรูปแบบ เช่น ลวดความร้อน ไฟฟ้า คลื่นไมโครเวฟ อินฟราเรด ไอน้ำ และเครื่องสูบความร้อน [3] ซึ่งแต่รูปแบบมีข้อดีและข้อเสียต่างกันยกตัวอย่าง เช่น แหล่งความร้อนจากอินฟราเรด ที่กำลังเป็นที่นิยม เนื่องจากรังสีอินฟราเรดสามารถแผ่ทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุสั่นและเกิดความร้อน ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิในเนื้อวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว ส่งผลให้ผิวภายนอกของวัสดุอบแห้งไม่เหี่ยวย่น และยังคงสมบัติของผลิตภัณฑ์ไว้ใกล้เคียงกับวัตถุดิบที่นำมาอบแห้ง [4] นอกจากนี้ แหล่งความร้อนจากอินฟราเรด ยังให้ความร้อนได้อย่างรวดเร็ว และกระจายความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอ ติดตั้งง่าย ประหยัดพลังงานและลดระยะเวลาในการอบแห้ง [5] ส่วน แหล่งความร้อนจากเครื่องสูบความร้อน เป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้ให้ความร้อนแก่เครื่องอบแห้งสุญญากาศอีกชนิดหนึ่ง เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ คือ มีความสามารถในการประหยัดพลังงานสูง เพราะสามารถใช้พลังงานความร้อนทั้งที่อยู่ในรูปความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง สามารถลดความชื้นของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งให้ต่ำลงได้ มีผลให้สามารถทำการอบแห้งภายใต้อุณหภูมิต่ำได้เหมาะสำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีความไวต่อความร้อนสูง นอกจากนี้ความเย็นที่ได้จากคอยล์เย็นของเครื่องสูบความร้อนยังสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์อื่นได้ เช่น ระบบทำความเย็นในอาคารและระบบหล่อเย็นปั๊มสุญญากาศ

ในระบบการอบแห้งสุญญากาศ จะใช้ปั๊มสุญญากาศในการดึงอากาศออกจากห้องอบแห้งเพื่อให้อยู่ในสภาวะสุญญากาศและปั๊มที่นิยมใช้จะเป็นปั๊มสุญญากาศแบบ Liquid ring ที่ต้องใช้น้ำเย็นเพื่อหล่อเย็น [6] ดังนั้นในระบบจะต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้ทำน้ำเย็น ซึ่งเครื่องทำน้ำเย็นนี้มีประโยชน์ 2 ประการ คือ 1. ใช้หล่อเย็นปั๊มสุญญากาศ และ 2. น้ำเย็นบางส่วนจะถูกนำไปทำการแลกเปลี่ยนความเย็นในห้องอบแห้งหรือควบแน่นความชื้นที่ออกมาจากผลิตภัณฑ์ในห้องอบแห้งด้วย ซึ่งเครื่องน้ำเย็น คือ ระบบปรับอากาศ ชนิดหนึ่งที่มีทั้งด้านที่ดึงความเย็นและด้านที่ระบายความร้อน ซึ่งความร้อนนี้ส่วนมากระบายทิ้ง ถือว่าเป็นความสูญเสีย นักวิจัยจึงทำการตรวจสอบงานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่า ยังไม่มีนักวิจัยใดทำการศึกษาการนำความร้อนจากระบบทำน้ำเย็นไปใช้ในการอบแห้งสุญญากาศ

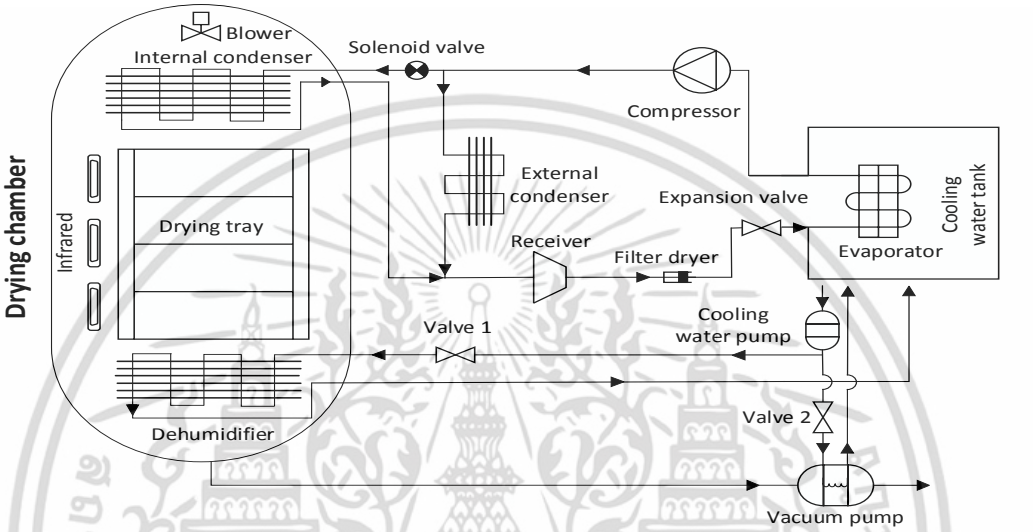
ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการนำความร้อนทิ้งของระบบทำน้ำเย็นมาใช้ร่วมกับอินฟราเรดในการอบแห้งในเครื่องอบแห้งสุญญากาศ โดยทำการเปรียบเทียบอัตราการอบแห้ง เวลาในการอบแห้ง และค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งของพริกและสับปะรดในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด (IR) กับเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรดร่วมกับความร้อนทิ้งของระบบทำน้ำเย็น (IR+W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เครื่องมืออุปกรณ์และวิธีการทำทดลอง

2.1 เครื่องมืออุปกรณ์ทดลอง

2.1.1 เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR และ IR+W ลักษณะเป็นทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร ยาว 1.2 เมตร ด้านในห้องอบแห้งประกอบไปด้วย อินฟราเรด 3 ตัว ขนาดตัวละ 1000 วัตต์ คอยล์น้ำเย็นลดความชื้น และพัดลมหมุนเวียนอากาศ เครื่องชั่งน้ำหนัก สามารถชั่งได้ 50 กิโลกรัม และถาด ขนาด 70 cm x100 cm เครื่องทำน้ำเย็น ขนาด 18,000 บีทียูต่อชั่วโมง ปั๊มสุญญากาศแบบ Liquid ring ขนาด 1.2 กิโลวัตต์ และปั๊มน้ำ ขนาด 100 วัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR และ IR+W

2.1.2 แผงควบคุม ทำหน้าที่ควบคุมระบบในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR และ IR+W คือ ควบคุมอุณหภูมิในห้องอบแห้งควบคุมปั๊มสุญญากาศ และควบคุมระบบทำน้ำเย็น

2.1.3 โซลินอยด์วาล์ว ทำหน้าที่ควบคุมการ เปิด-ปิด ระบบการไหลสารทำความเย็น

2.1.4 Watt-hour-meter ยี่ห้อ Chauvin Arnoux รุ่น C.A. 8332B ใช้วัดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองการอบแห้งสุญญากาศ

2.1.5 Thermocouple type K ใช้วัดอุณหภูมิในห้องอบแห้งสุญญากาศ

2.1.6 Temperature controller ยี่ห้อ Eliwell รุ่น IC Plus 902 ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิอินฟราเรด ในห้องอบแห้งสุญญากาศ

2.1.7 Pressure control digital ยี่ห้อ Autonics รุ่น PSA-V01 ทำหน้าที่ควบคุมความดันในห้องอบแห้งสุญญากาศ

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 การเตรียมผลิตภัณฑ์

1. พริก คัดเลือกพริกจากจังหวัดชัยภูมิแหล่งเดียว แล้วนำไปล้างน้ำให้สะอาด จากนั้นนำไปผึ่งลมให้หมาดๆ แล้วเลือกเฉพาะสีที่แดงสดแล้วนำใส่ลงในถาด จำนวน 4 ถาดที่เตรียมไว้ ถาดละ 1 kg จากนั้นจึงนำเข้าห้องอบแห้ง

2. สับปะรด นำสับปะรดจากแหล่งเดียว มาสับเป็นชิ้นเท่า ๆ กัน แล้วนำใส่ลงในถาด จำนวน 4 ถาดที่เตรียมไว้ ถาดละ 1 kg จากนั้นจึงนำเข้าห้องอบแห้ง

2.2.2 ทดลองอบแห้งพริกและสับปะรดด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR และ IR+W ที่ความดัน 0.1 บาร์ เนื่องจากประสิทธิภาพของปั๊มสุญญากาศที่ใช้ทดลองสามารถลดความดันต่ำสุดได้เพียงเท่านี้ และอุณหภูมิที่ใช้ 60 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ไม่ทำให้ Compressor เกิดความเสียหาย [6]

2.2.3 การเก็บข้อมูลการวิจัย ทำการบันทึกน้ำหนักกับเวลาในการอบแห้ง โดยบันทึกน้ำหนักทุก ๆ 30 นาที พริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นเริ่มต้น 329% d.b. อบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้ายที่ 12 % d.b. ส่วนสับปะรดมีความชื้นเริ่มต้น 567% d.b. อบแห้งจนมีความชื้นสุดท้าย 20% d.b. จากนั้นทำการบันทึกปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งระบบที่จุดเบรกเกอร์ก่อนเข้าตู้คอนโทรลไฟฟ้ารวม โดยใช้อุปกรณ์ Watt-hour-meter

2.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การหาอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) หาได้จากสมการ

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

เมื่อ M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ, % d.b.

M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น, % d.b.

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล, % d.b.

ค่าความชื้นสมดุลภายใต้สภาวะสุญญากาศมีค่าน้อยมากจนถือได้ว่าเท่ากับศูนย์ [6]

อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นต่อหน่วยเวลา ซึ่งจะคำนวณได้จากสมการ

$$DR = -M_S \frac{dM}{dt} \quad (2)$$

เมื่อ M_s คือ มวลแห้งของวัสดุ, Kg

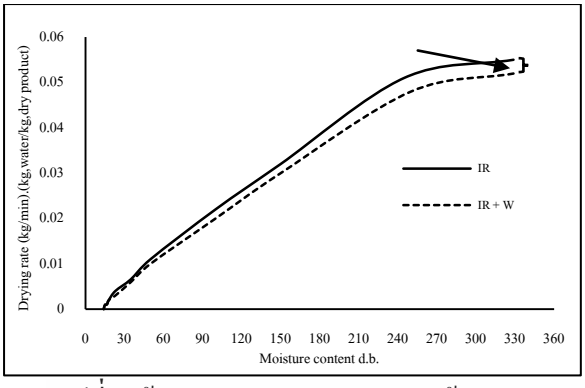
M คือ ความชื้นของวัสดุ, % d.b.

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, min

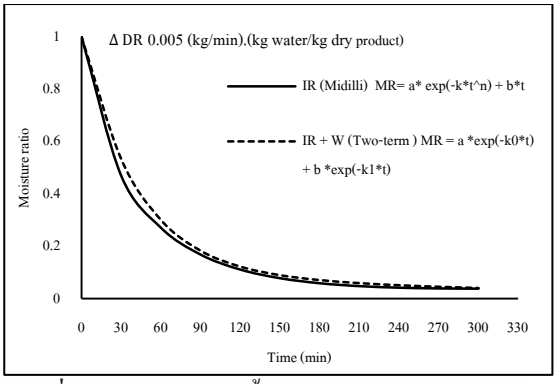
3. ผลการทดลอง

การอบแห้งวัสดุทั่วไป แบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ 1. ช่วงอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เป็นช่วงที่อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของวัสดุที่เพิ่มขึ้นจากการได้รับความร้อน 2. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เป็นช่วงที่อุณหภูมิของวัสดุสูงถึงอุณหภูมิของน้ำที่ผิววัสดุสามารถระเหยออกไปได้ ซึ่งช่วงนี้จะมีค่านานหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ผิวของวัสดุ กรณีมีน้ำมาก ช่วงนี้จะมีระยะเวลามาก แต่ถ้ามีน้ำน้อยช่วงนี้จะมีระยะเวลาสั้น 3. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เกิดจากน้ำที่ผิววัสดุระเหยหมดไปแล้ว และน้ำจากส่วนภายในเนื้อวัสดุ แพร่ออกมาไม่ทันกับการระเหยไปของน้ำจากผิววัสดุ แต่จากการทดลองอบแห้งพริกในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR และ IR+W ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่า ไม่มีช่วงอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้แหล่งความร้อนเป็นอินฟราเรดจะสามารถแผ่รังสีมีความร้อนให้กับพริกได้อย่างรวดเร็ว จนทำให้อุณหภูมิของพริกสามารถเพิ่มถึงอุณหภูมิที่น้ำบนผิวพริกระเหยได้ในระยะเวลาสั้นจนไม่สามารถสังเกตได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [6] นอกจากนี้ยังไม่พบ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ด้วย เนื่องจากเป็นการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ 0.1 บาร์ และอุณหภูมิ 60 ℃ ซึ่งที่สภาวะสุญญากาศ 0.1 บาร์ จุดเดือดของน้ำมีค่าต่ำกว่า 60 ℃ [6] เมื่อทำการอบแห้งที่อุณหภูมิที่ 60 ℃ น้ำที่ผิวของพริกจึงหมดไปอย่างรวดเร็ว การอบแห้งพริกมีเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยที่ระยะแรกของช่วงนั้น อัตราการอบแห้งลดลงน้อยมาก ที่ความชื้นของพริกในช่วง 250-329 % d.b. เนื่องจากความชื้นพริกส่วนมากอยู่ที่ผิวทำให้มีปริมาณน้ำมากพอที่จะทำให้การระเหยมีต่อเนื่องใกล้เคียงกัน แต่ที่ผิวพริกมีความแข็งแรงและมีไขมันบางๆเคลือบไว้ทำให้อัตราการแพร่ของน้ำในผิวพริกมีค่าน้อยกว่าอัตราการระเหยของน้ำไปจากผิวพริก จึงมีผลทำให้อัตราการอบแห้งลดลงเล็กน้อย ซึ่งใช้เวลานานจนสามารถสังเกตได้ หลังจากนั้นในช่วงความชื้นของพริก 12-250% d.b. อัตราการอบแห้งจะลดลง เพราะปริมาณน้ำในพริกมีค่าลดลง จึงทำให้การระเหยของน้ำมีค่าลดลงตามไปด้วยจนถึงความชื้น 12% d.b. อัตราการอบแห้งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งแสดงว่าความชื้นสุดท้ายของพริกมีค่าเท่ากับ 12% d.b. ส่วนการอบแห้งพริกในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR+W มีอัตราการอบแห้งน้อยกว่าแบบ IR ประมาณ 0.005 (kg/min).(kg water/kg dry product)ในช่วงแรกแต่หลังจากนั้นความแตกต่างของอัตราการอบแห้งจะลดลงเรื่อย ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งพริก



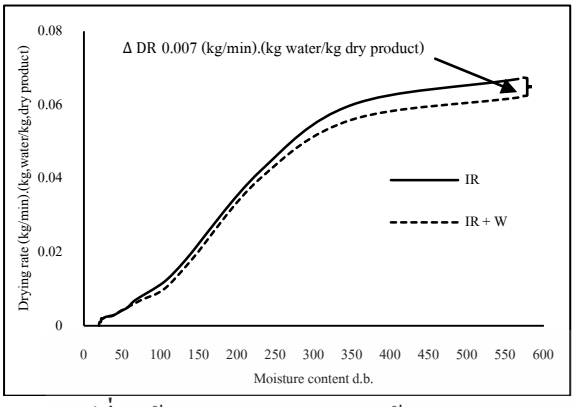
รูปที่ 3 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งพริก

ส่วนการหาอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งพริกที่แสดงในรูปที่ 3 พบว่า การอบแห้งในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR และ IR+W มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยที่ช่วงแรก อัตราส่วนความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยมีอัตราการลดลงคงที่ จนถึงเวลา 30 นาที อัตราการลดลงของความชันจะน้อยลงและมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 240 นาที แต่เมื่อพิจารณาช่วงเวลา 30 นาที ถึง 90 นาที พบว่า การอบแห้งในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR มีความชันกราฟมากกว่าแบบ IR+W เนื่องจากอินฟราเรดทำงานและให้ความร้อนได้ต่อเนื่อง และด้วยคุณสมบัติของอินฟราเรดที่สามารถทะลุทะลวงเข้าถึงความชื้นด้านในพริกได้รวดเร็ว [5] เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปหาสมการแบบจำลองชั้นบางที่เหมาะสมโดยสมการที่พิจารณามีดังนี้ Lewis MR = exp(-k*t), Page MR = exp (-k*t^n), Modified Page MR = exp(-k*t)^n, Henderson and Pabis MR = a *exp(-k*t), Logarithmic MR = a* exp (-k*t) + c, Two-term MR = a*exp(-k0*t) + b *exp (-k1*t), Approximation of diffusion MR= a*exp (-k*t) + (1-a)*exp (-k *a *t), Wang and Singh MR = 1 + a*t + b*t^2, Midilli MR = a*exp (-k*t^n) + b*t [6] พบว่า การอบแห้งพริกในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR สมการMidilli สามารถอธิบายการอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด ส่วนแบบ IR+W เป็น สมการTwo-term

ส่วนการหาอัตราการอบแห้งกับเวลาของสับปะรดแสดงในรูปที่ 4 โดยการอบแห้งในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR และ IR+W พบว่า ไม่มีช่วงอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เช่นเดียวกับการอบแห้งพริกที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น เนื่องจากเป็นการอบแห้งภายใต้สภาวะอากาศที่ 0.1 บาร์ และอุณหภูมิ 60 °C ซึ่งจะมีเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น โดยระยะแรกของอัตราการอบแห้งลดลงน้อยมาก ที่ความชื้นของสับปะรดในช่วง 300-567% d.b. เนื่องจากความชื้นที่ผิวของสับปะรดมีปริมาณน้ำมากพอที่จะทำให้การระเหยมีอย่างต่อเนื่องแต่เนื้อสับประรดมีเส้นใยที่มีความหนาแน่น จึงทำให้อัตราการแพร่ของน้ำในเนื้อสับปะรดมีค่าน้อยกว่าอัตราการระเหยของน้ำไปจากผิวสับปะรด จึงมีผลทำให้อัตราการอบแห้งลดลงเล็กน้อย ซึ่งใช้เวลานานจนสังเกตได้หลังจากนั้นในช่วงความชื้นของสับปะรด 20-300% d.b. อัตราการอบแห้งลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากปริมาณน้ำในสับปะรดมีค่าลดลง จึงทำให้การระเหยของน้ำมีค่าลดลงด้วยจนถึงความชื้น 20% d.b. อัตราการอบแห้งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งแสดงว่าความชื้นสุดท้ายของสับปะรดมีค่าเท่ากับ 20% d.b. ส่วนการอบแห้งในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR+W มีอัตราการอบแห้งน้อยกว่า การอบแห้งในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR ประมาณ 0.007 (kg/min).(kg water/kg dry product) ในช่วงแรกแต่หลังจากนั้น

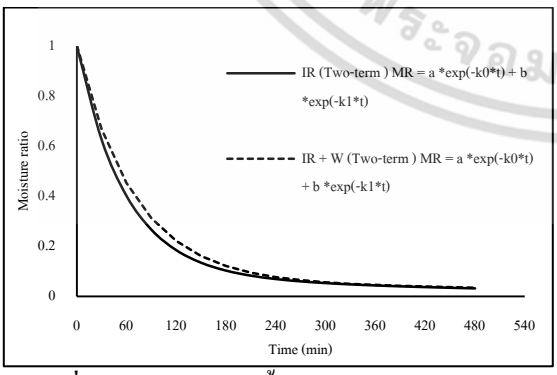
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแตกต่างของอัตราการอบแห้งจะลดลงเรื่อย ๆ



รูปที่ 4 เส้นลักษณะของการอบแห้งสับปะรด

ส่วนการหาอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งสับปะรดแสดงในรูปที่ 5 โดยการอบแห้งในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR และIR+W มีแนวโน้มในช่วงแรกใกล้เคียงกัน อัตราส่วนความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยมีอัตราการลดลงอย่างคงที่ จนถึงเวลา 40 นาที อัตราการลดลงมีความชันกราฟน้อยลงและมีค่าคงที่เมื่อเวลา 400 นาที แต่เมื่อพิจารณาในช่วงเวลา 40 นาที ถึง 180 นาที พบว่า การอบแห้งในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR มีความชันกราฟมากกว่า การอบแห้งในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR+W เนื่องจากอินฟราเรดทำงานต่อเนื่องและให้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอ เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปหาสมการแบบจำลองชั้นบางที่เหมาะสม พบว่า การอบแห้งสับปะรดในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR และแบบ IR+W สมการ Two-term สามารถอธิบายการอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 5 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งสับปะรด

เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานในการอบแห้งพริกและสับปะรด จากผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 1 พบว่า การอบแห้งพริกและสับปะรดในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR+W ใช้พลังงานน้อยกว่าการอบแห้งในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR เท่ากับ 13.9% และ 14.2% ตามลำดับ

ตารางที่ 1 การแสดงพลังงานงานที่ใช้ในการอบแห้ง

แหล่งความร้อน	พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง (kwh/kg, เปียก)	
	พริก (1 kg)	สับปะรด (1 kg)
Infrared	5.56	8.45
Infrared + waste heat	4.8	7.25
% ส่วนต่าง	13.9	14.2

4. สรุปผลการวิจัย

การอบแห้งพริกและสับปะรดในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR และ IR+W มีเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น โดยในช่วงแรก การอบแห้งในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR มีอัตราการอบแห้งสูงกว่า การอบแห้งในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR+W ประมาณ ประมาณ 0.005 สำหรับพริก และ 0.007 (kg/min).(kg water/kg dry product) สำหรับสับปะรด ตามลำดับ การอบแห้งในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR และ IR+W มีอัตราการอบแห้งแตกต่างกันในช่วงแรก ซึ่งแบบ IR มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าแบบ IR+W ส่วนใช้เวลาอบแห้งใกล้เคียงกัน โดย พริก และ สับปะรด ใช้เวลา 5 ช.ม และ 8 ช.ม ตามลำดับ พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งพริกในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR และ IR+W คือ 5.56 และ 4.8 (kwh /วัตถุดิบสด 1 Kg) ตามลำดับ คิดเป็นส่วนต่าง 13.9 % ส่วนการอบแห้งสับปะรดในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบ IR และ IR+W คือ 8.45 และ 7.25 (kwh /วัตถุดิบสด 1 Kg) ตามลำดับ คิดเป็นส่วนต่าง 14.2%

5. กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจาก ศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Jaya and H. Das, “A vacuum drying model formango pulp,” Drying Technology, Vol.21, No7, pp.1215- 1234, 2003.

[2] D. Akal and K. Kahveci and A. Cihan “Mathematical modelling of drying of rough rice in stacks” Food science & Technology International, Vol.13, pp.437-445, 2007.

[3] T. Abe and T.M. Afzal, “Thin-layer infrared radiation drying of rough rice” Journal of Agricultural Engineering Research,Vol.67, pp.289-297, 1997.

[4] M. Vogt, “Infrared drying lowers energy costs and drying times” Plastics, Additives andCompounding, Vol. 9, pp.58-61, 2007.

[5] Rittigrai Ngamchum and Somchart Soponronnarit, “ Far Infrared Radiation – Vacumm Drying of Sliced Cavendish” Master of Engineering Field of Study Energy Technology, Faculty School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 2547

[6] Apichart Artnaseaw and Somnuk Theerakulpisut and Chatchai Benjapiyaporn, “Vacuum Heat Pump Drying of Herbs” Doctor of Philosophy Thesis in Mechanical Engineering, Graduate School, Khon Kaen University, 2552.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้